

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

Заместители главного редактора:
Гордон В.А., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Коробко В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Савин С.Ю., канд. техн. наук, доц. (Россия)
Финадеева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

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

Бакаева Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Бок Т., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Булгаков А.Г., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)
Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)
Карпенко Н.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Колесникова Т.Н., д-р арх., проф. (Россия)
Колчунов В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Коробко А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Король Е.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Кривошапко С.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кудряшов Н.Н., канд. арх., проф. (Россия)
Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)

Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)
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)

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

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

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

Исполнительный редактор:

Амелина М.А., (Россия)

Адрес редакции:
302030, Орловская обл., г. Орёл,
ул. Московская, д. 77.
Тел.: +79065704999
<http://oreluniv.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169
от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294**
по объединенному каталогу «Пресса России»
на сайтах www.pressa-rl.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Антонов А.И., Гусев В.П., Леденев В.И., Матвеева И.В. Оценка акустической эффективности системы звукопоглощающих кулис кессонного типа.....	3
Канев Н.Г., Долгер А.Р. Снижение шума экраном в виде решетки твердых пластин.....	14
Кабанцев О.В., Крылов С.Б., Трофимов С.В. Методика экспериментальных исследований прочности толстых железобетонных плит при действии продавливающей нагрузки.....	22
Овсянников С.Н. Развитие методологии расчета звукоизоляции с использованием метода статистического энергетического анализа.....	41
Селяев В.П., Уткина В.Н., Бабушкина Д.Р., Архипов И.В. Методологические принципы построения теории разрушения бетона	52
Трошин М.Ю., Коробко А.В. Методика оценки несущей способности перекрытий из древесины перекрестно клееной с варьируемыми параметрами сечений.....	61
Фёдоров В.С., Лазуткин Ю.В., Купчикова Н.В. Планирование эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта.....	71

Безопасность зданий и сооружений

Мацевич Т.А., Андреев И.Ф. Оценка выносливости подкрановой балки при коррозии арматурных канатов.....	82
Савин С.Ю. Живучесть и техническое состояние железобетонных конструкций каркаса здания в результате особого воздействия.....	91

Архитектура и градостроительство

Федоровская А.А., Калайчева Е.С., Шеина С.Г. Методика информационного сопровождения безбарьерной среды в гостиничной недвижимости.....	103
---	-----

Строительные материалы и технологии

Федосов С.В., Пуляев И.С., Александрова О.В., Митягина А.Н. Моделирование процессов теплопереноса при бетонировании массивных железобетонных конструкций.....	120
--	-----

Editor-in-Chief
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Savin S.Yu., candidate sc. tech., docent (Russia)
Finadeeva E.A., candidate sc. tech., docent (Russia)

Editorial Board
Akimov P.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bakaeva N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bock T., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Bulgakov A.G., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)
Karpenko N.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kolesnikova T.N., doc. arc., prof. (Russia)
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korol E.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Krivoshapko S.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kudryashov N.N., candidate arc., prof. (Russia)
Lafhaj Z., doc. sc. tech., prof. (France)
Melkumov V.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Orlovic R.B., doc. sc. tech., prof. (Poland)
Ptichnikova G.A., doc. arc., prof. (Russia)
Rebolj D., doc. sc. tech., prof. (Slovenia)
Rimshin V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treschev A.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tur V.V., doc. sc. tech., prof. (Belorussia)
Fedorov V.S., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Fedorova N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Iakovenko I.A., doc. sc. tech., prof. (Ukraine)

Managing Editor:
Amelina M.A., (Russia)

The edition address:
302030, Oryol region., Oryol,
Moskovskaya Street, 77
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications
The certificate of registration:
ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»
86294 on the websites www.pressa-ru.ru and
www.akc.ru

© Orel State University, 2025

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Antonov A.I., Gusev V.P., Ledenev V.I., Matveeva I.V.** Evaluation of the acoustic efficiency of a sound-absorbing curtain wall system..... 3
- Kanev N.G., Dolger A.R.** Noise reduction by a barrier in the form of a solid plate grid..... 14
- Kabantsev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V.** Experimental research methodology for punching shear strength of thick reinforced concrete slabs.... 22
- Ovsyannikov S.N.** Development of the methodology for calculating sound insulation using the method of statistical energy analysis..... 41
- Selyaev V.P., Utkina V.N., Babushkina D.R., Arkhipov I.V.** Methodological principles of constructing the theory of concrete destruction..... 52
- Troshin M.Yu., Korobko A.V.** Method for assessing the load-bearing capacity of cross-laminated timber floor structures with variable section parameters..... 61
- Fedorov V.S., Lazutkin Yu.V., Kupchikova N.V.** Planning an evaluation experiment effect of the complexity of the combination of dynamic impacts from surface and underground..... 71

Building and structure safety

- Matseevich T.A., Andreev I.F.** Assessment of the endurance of a crane beam in corrosion of reinforcement ropes..... 82
- Savin S.Y.** Robustness and technical condition of reinforced concrete frame structures as a result of accidental action..... 91

Architecture and urban planning

- Fedorovskaya A.A., Kalaicheva E.S., Sheina S.G.** Methodology of information support of barrier-free environment in hotel real estate..... 103

Construction materials and technologies

- Fedosov S.V., Pulyaev I.S., Alexandrova O.V., Mityagina A.N.** Modeling of heat transfer processes in concreting of massive reinforced concrete structures..... 120

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 534.2

DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-3-13

А.И. АНТОНОВ¹, В.П. ГУСЕВ¹, В.И. ЛЕДЕНЕВ^{1,2}, И.В. МАТВЕЕВА²

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН)», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия

ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КУЛИС КЕССОННОГО ТИПА

Аннотация. В практике снижения шума в помещениях кроме обычных плоских звукопоглощающих облицовок применяются также конструкции кулисного типа, размещаемые на потолках помещений в виде различных систем. В настоящее время отсутствуют простые методы оценки акустической эффективности таких систем, что в значительной мере ограничивает их применение, и в частности, применение кулисных систем кессонного типа. В статье предлагается численный метод расчета акустической эффективности кессонной системы кулис, основанный на геометрическом методе прослеживания лучей при различном характере отражения звука от ограждений. Показано, что метод может использоваться при выборе размеров кессонной структуры кулис исходя из звукопоглощающих характеристик элементов кулис и звукопоглощения потолка. Метод на ранних стадиях проектирования объектов позволит производить предварительную оценку влияния различных параметров кессонных систем кулис на их акустическую и экономическую эффективность.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, звукопоглощающие кулисы, расчет акустической эффективности звукопоглощения, защита от шума.

A.I. ANTONOV¹, V.P. GUSEV¹, V.I. LEDENEV^{1,2}, I.V. MATVEEVA²

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

² Tambov State Technical University, Tambov, Russia

EVALUATION OF THE ACOUSTIC EFFICIENCY OF A SOUND- ABSORBING CURTAIN WALL SYSTEM

Abstract. In the practice of noise reduction in rooms, in addition to conventional flat sound-absorbing linings, rocker-type structures are also used, placed on the ceilings of rooms in the form of various systems. Currently, there are no simple methods for evaluating the acoustic efficiency of such systems, which significantly limits their use, and in particular, the use of rocker systems of the caisson type. The article proposes a numerical method for calculating the acoustic efficiency of a coffered curtain wall system based on a geometric ray tracing method with different types of sound reflection from fences. It is shown that the method can be used when choosing the dimensions of the coffered structure of the wings based on the sound-absorbing characteristics of the curtain elements and the sound absorption of the ceiling. The method at the early stages of object design will allow for a preliminary assessment of the impact of various parameters of the curtain wall systems on their acoustic and economic efficiency.

Keywords: sound-absorbing structures, sound-absorbing wings, calculation of acoustic efficiency of sound absorption, noise protection.

1. Введение

В настоящее время для снижения шума в зданиях используются звукопоглощающие конструкции, применяемые в виде плоских звукопоглощающих облицовок, объемных звукопоглощающих элементов и звукопоглощающих элементов кулисного типа [1]. При выборе указанных конструкций для снижения шума в помещении необходимо выполнять оценку их акустической эффективности. Наиболее просто такая оценка производится при размещении в помещении плоских звукопоглощающих облицовок. В этом случае необходимо знать только их частотные коэффициенты звукопоглощения, которые в настоящее время надежно определяются в условиях реверберационных измерительных камер. Более сложно определяется акустическая эффективность снижения шума объемными и кулисными звукопоглотителями. Эффективность таких элементов зависит не только от акустических свойств одного элемента, определяемого в условиях реверберационной камеры, но и от других факторов, таких, например, как геометрические размеры элемента, их взаимное расположение относительно друг друга, а также их размещение по отношению к ограждениям помещения и источникам шума [1].

Ниже в статье рассмотрены проблемы оценки акустической эффективности снижения шума в помещении звукопоглощающими кулисами, размещаемыми в помещении в виде системы кессонов.

Системы звукопоглощающих элементов кулисного типа впервые были подробно рассмотрены в середине 20-го века [2]. Каждый отдельный элемент системы представляет собой плоский элемент прямоугольной формы, у которого толщина существенно меньше его высоты и длины. На поверхностях такого элемента кроме поглощения падающей на него звуковой энергии происходят также процессы рассеяния и дифракции звука. Эти процессы существенно усложняются при размещении элементов в виде определенного типа систем. На рис.1 приведены имеющиеся в практике схемы размещения кулис.

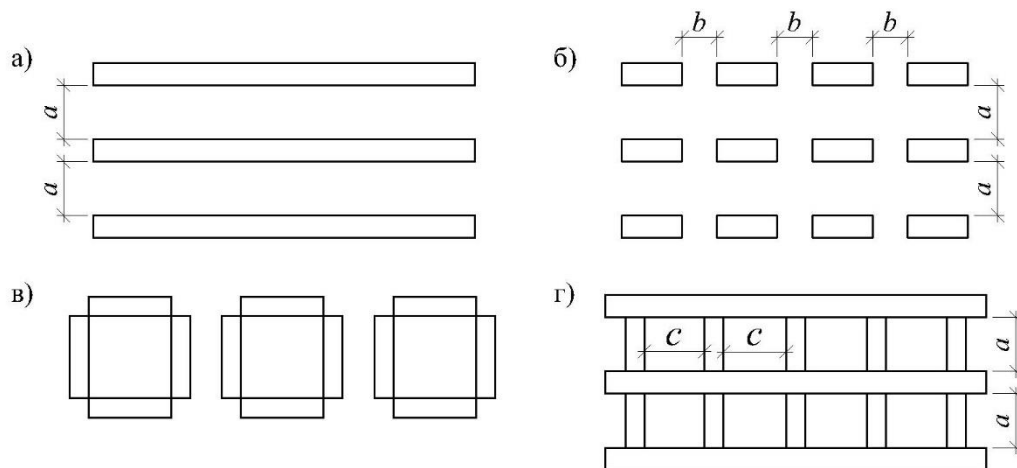


Рисунок 1 – Возможные системы размещения кулис в помещениях: а) рядовая непрерывная система, б) рядовая прерывистая система, в) ячейковая система, г) кессонная система

В начале 80-х годов 20-го века в НИИСФе было предложено аналитическое решение для плоской системы кулисных элементов, соответствующей рис.1, а [3,4]. Использованная расчетная схема к этому случаю приведена на рис.2.

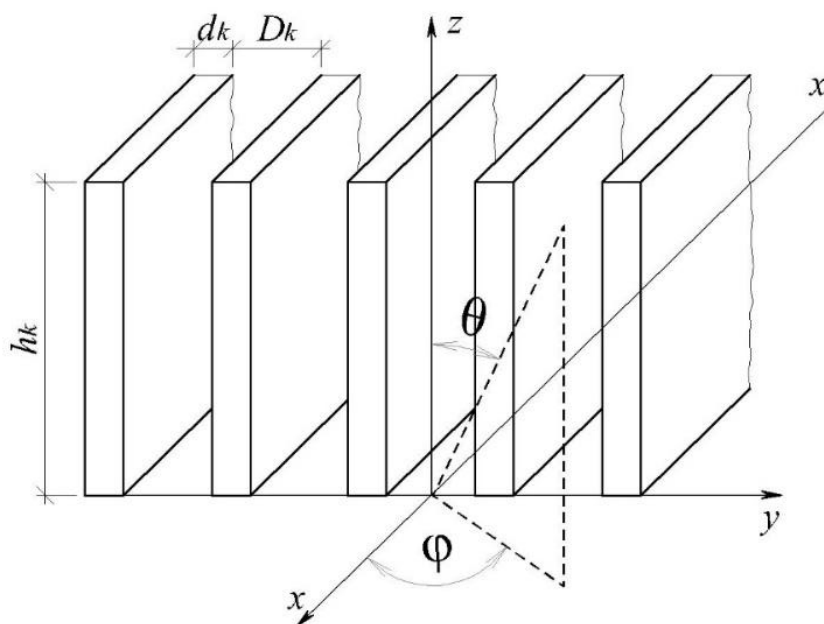


Рисунок 2 – Расчетная схема рядовой бесконечной системы кулис

Аналитическое решение было получено авторами на основе метода, предложенного в работе [5] для оценки дифракции плоской электромагнитной волны на абсолютно отражающей решетке.

Основным результатом аналитического решения явилось определение диффузного коэффициента звукопоглощения для такой расчетной схемы размещения кулис $\alpha_{\text{эkd}}$. Далее при наличии сведений о величине $\alpha_{\text{эkd}}$ расчет снижения шума за счет устройства кулис в помещении предлагалось производить, как и при устройстве плоской облицовки существующими методами расчета, учитывающими пропорции помещений и другие факторы, влияющие на распределение прямого и отраженного шума в объеме помещений [6].

Согласно [1] в случае высоких частот, когда геометрические параметры системы h_k и D_k больше длины волны, формула для определения $\alpha_{\text{эkd}}$ имеет вид

$$\alpha_{\text{эkd}} = \alpha_{\text{эп}} \cdot b \cdot \text{arctg}(1/2b), \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{эп}}$ – коэффициент звукопоглощения плоского элемента, изготовленного из того же пористо-волокнутого материала с той же толщиной d_k и уложенного на жестком основании; $b = h_k/L_k$ – параметр системы, связанной с высотой кулисы h_k и периодом решетки системы, равным $L_k = D_k + d_k$.

В [1] указано, что формула (1) справедлива при значениях $b < 0.5$. При значениях параметра b , когда $L_k > 3h_k$, формула для определения $\alpha_{\text{эkd}}$ имеет более простой вид

$$\alpha_{\text{эkd}} = \alpha_{\text{эп}} 2b(1 - b). \quad (2)$$

При этом в [1] сказано, что при таких соотношениях L_k и h_k система оказывается акустически более эффективной, чем облицовка из плоских элементов.

Следует иметь ввиду, что решение было получено для наиболее простого случая размещения звукопоглощающих элементов в виде бесконечной решетки и со значительными упрощениями процессов формирования звукового поля в пределах рассматриваемой решетки. Подобных решений в настоящее время не имеется для других, указанных на рис.1, кулисных систем. В [1] сказано, что в этом случае оценка их акустической эффективности возможна только экспериментально. В настоящее время это выполнить практически неосуществимо.

Так как отсутствует надежная методика оценки акустической эффективности для сложных кулисных систем, нами предлагается производить оценку эффективности приближенным расчетным методом, основанным на принципах геометрической теории

акустики. Для этой цели использован метод прослеживания лучей. Метод давно и широко используется в практике расчетов звуковых полей помещений. Он позволяет выполнять расчеты отраженного звука как при зеркальной, так и при рассеянной моделях отражения звуковой энергии от ограждений [7-12]. В статьях [13-14], в частности, показано, что метод может быть применен для оценки шума в помещениях с подобными данному случаю условиями.

2. Модели и методы

Для выполнения необходимых расчетов с использованием метода прослеживания лучей разработана компьютерная программа. Алгоритм численного метода, заложенный в компьютерную программу, разработан в соответствии с методикой, изложенной в [7].

Излучаемая источником звуковая энергия распределяется между большим количеством испускаемых источником лучей с бесконечно малыми пространственными углами распространения. Распределение звуковой мощности между лучами принимается пропорциональным пространственной диаграмме излучения. При каждом отражении луча его звуковая энергия уменьшается в соответствии с коэффициентом поглощения поверхности, от которой отражается луч. Направления отраженных лучей определяются согласно принятой диаграмме отражения. В случае зеркального отражения направление отраженного луча принимается из условия равенства, падающего и отраженного углов. Диффузное (рассеянное) отражение моделируется вероятностно согласно диаграмме рассеивания, например, в соответствии с законом Ламберта.

Уровень звукового давления в расчетных точках помещения определяется прямыми лучами, приходящими непосредственно от источника, и отраженными звуковыми лучами

$$L_i = 10 \lg \left[\frac{c(\varepsilon_i^{\text{пр}} + \varepsilon_i^3)}{I_0} \right], \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости; c – скорость звука в воздухе; $\varepsilon_i^{\text{пр}}$, ε_i^3 – плотности звуковой энергии, создаваемой в i -ой расчетной точке прямым звуком и зеркально отраженной звуковой энергией.

Плотность прямой звуковой энергии, приходящей в i -ую расчетную точку, определяется по выражению

$$\varepsilon_i^{\text{пр}} = \frac{W}{cNS_{\text{пр}}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_{\text{пр}}} \exp(-m_{\text{в}} r_{k\text{пр}i}) \right\}, \quad (4)$$

а плотность отраженных звуковых лучей, проходящих i -ую расчетную точку, по выражению

$$\varepsilon_i^3 = \frac{W}{cNS_{\text{пр}}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_3} \left[\exp(-m_{\text{в}} r_{ki}) \prod_{p=1}^p (1 - \alpha_p)^{D_p} \right] \right\}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5): W – акустическая мощность источника звука; N – количество лучей, исходящих из источника; $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения приемника звуковой энергии, который может приниматься в виде сферы с центром в расчетной точке; $K_{\text{пр}}$ – количество прямых лучей, приходящих в расчетную точку; K_3 – количество зеркально отраженных лучей, приходящих в расчетную точку; $m_{\text{в}}$ – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе; D_p – количество актов падения луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние r_{ki} до i -ой расчетной точки; $r_{k\text{пр}i}$ – расстояние, прошедшее k -м прямым лучом от источника до i -ой расчетной точки; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч.

3. Результаты исследования и их анализ

Оценка акустической эффективности кулис предложенным методом выполнена для условий помещения размерами $36 \times 24 \times 6$ м. Расчеты произведены в октавной полосе частот со среднегеометрической частотой $f_{cp}=1000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения всех необлицованных поверхностей ограждений помещений принят равным $\alpha=0.10$. Уровень акустической мощности источника в полосе с $f_{cp}=1000$ Гц равен 105 дБ. Источник располагается на уровне 1.5 м от пола. Излучение звуковой энергии производится в сферу. Расчетные точки приняты на высоте 1.5 м от пола помещения.

Исследование акустической эффективности выполнено для кулис кессонной системы. Рассматривались варианты кулис высотой 0.5 и 1.0 м, расположенные в виде ячеек с размерами в плане 1.5×1.5 м. Звукопоглощение поверхностей кулис принималось с коэффициентами $\alpha_k=0.10$ и $\alpha_k=0.80$. Расчеты производились при расположении кулис на потолке без звукопоглощения с $\alpha_n=0.10$ и со звукопоглощающей облицовкой потолка с $\alpha_n=0.80$.

Схемы размещения расчетных точек в помещении и кулис приведены на рис.3.

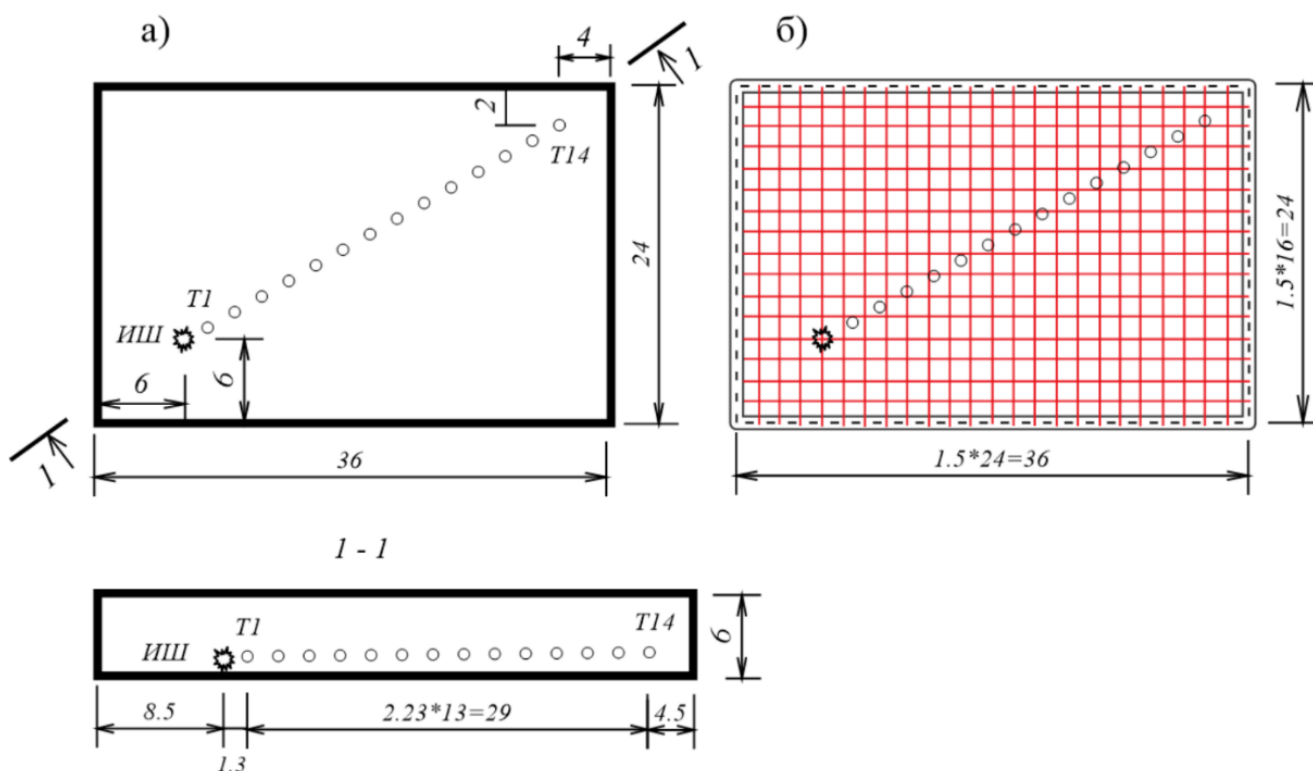


Рисунок 3 – Схемы расположения в помещении:
 а) источника (ИШ) и расчетных точек (РТ); б) кулис. Размеры даны в метрах

Кроме метода прослеживания лучей при расчетах для сравнения использовались результаты, полученные численным статистическим энергетическим методом, дающим возможность выполнять расчеты уровней звукового давления в помещениях со сложной структурой. Он, в частности, был предложен нами для расчетов шума в помещениях с перегородками при диффузном отражении звука от ограждений [15]. Аналогичный подход к расчету применен и в данном случае для помещения с кулисами.

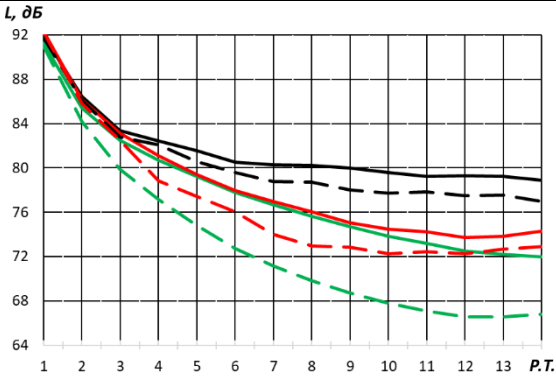
При анализе также использовались результаты расчетов методом прослеживания лучей и численным статистическим энергетическим методом в помещении без кулис при отсутствии и наличии звукопоглощающей облицовки на потолке. Результаты расчетов при наличии кулис

разной высоты и с разными коэффициентами звукопоглощения кулис и потолка приведены в таблице 1. На графиках в таблице 1 приведены для сравнения также и результаты расчетов в помещении без кулис.

Таблица 1 – Уровни звукового давления в помещении с кулисами кессонного типа

№ п/п	Варианты	Уровни звукового давления в расчетных точках
1	2	3
1	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.10$	
2	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.10$	
3	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_p = 0.10$	

1	2	3
4	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_p = 0.10$	
5	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.80$	
6	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.80$	
7	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_p = 0.80$	

1	2	3
8	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка	 Условные обозначения Помещение без кулис: — расчет методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука; — то же при рассеянном отражении; — расчет статистическим энергетическим методом при диффузном отражении. Помещение с кулисами: — расчет методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука; — то же при рассеянном отражении; — расчет статистическим энергетическим методом при диффузном отражении.

Акустическая эффективность кессонной системы кулис зависит от характера отражения звука от поверхностей кулис и от ограждений помещения. При диффузном (рассеянном) отражении звука эффективность кулис выше, чем при зеркальном отражении. Эта разница существенно возрастает при росте звукопоглощения кулис, и особенно, при одновременном росте звукопоглощения кулис и потолка. В наибольшей мере эта разница проявляется в дальней от источника зоне помещения.

1. Сравнение расчетов, полученных методом прослеживания лучей, с данными расчетов статистическим энергетическим методом показывают, что последний существенно завышает эффективность шума. Распределение отраженной звуковой энергии в большей мере соответствует зеркально-диффузной лучевой модели отражения. Об этом, в частности, свидетельствует сравнение результатов, полученных методом прослеживания лучей при рассеянном отражении и при комбинированном методе, реализующем зеркально-диффузную модель отражения звука [7, 16, 17]. В случае данного помещения результаты расчетов методом прослеживания лучей при рассеянном отражении звука совпадают с результатами расчетов комбинированным методом, когда коэффициент рассеяния составляет 40% от падающей на ограждение зеркальной энергии. В тоже время в помещении без кулис расчеты обоими методами полностью совпадают при отсутствии звукопоглощающей облицовки на потолке (см. пункты 1-4 табл.1), а при ее наличии расхождения не превышают 1.0 дБ (см. пункты 5-8 табл.1). В целом сравнения результатов расчетов разными методами показывают, что наиболее приемлемым методом для расчетов в помещении с кулисами является метод прослеживания лучей при рассеянном отражении звука от ограждений.

2. Акустическая эффективность кулис в наибольшей мере проявляется при отсутствии звукопоглощающих облицовок на потолке помещения, и при этом существенно зависит от звукопоглощающих характеристик самих кулис. В данном случае при отсутствии звукопоглощающих облицовок на потолке и при малом звукопоглощении кулис акустическая эффективность системы не превышает 4 дБ в дальней от источника зоне помещения (см.

пункты 1-2 табл.1). При высоком коэффициенте звукопоглощения кулис их акустическая эффективность возрастает до 10 дБ (см. пункты 3-4 табл.1). При наличии звукопоглощающих облицовок на потолке акустическая эффективность данной системы кулис не превышает эффективности звукопоглощающей облицовки потолка в помещении без кулис (см. пункты 5-8 табл.1). Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости при выборе кулис данной системы исходить не только из их акустической эффективности, но и учитывать экономическую целесообразность их применения. Как видно из пунктов 5-8 таблицы 1, при этих вариантах кессонная система при равенстве акустической эффективности менее экономична, чем плоская звукопоглощающая облицовка.

3. Расчеты уровней звукового давления при разной высоте кулис показали, что метод реагирует на изменение их высоты. Результаты показывают, что изменение высоты кулис дает повышение эффективности не более чем на 2.0 дБ. Видно, что в данном случае эффективность несущественно изменяется при изменении высоты кулис. Установлено, что эффективность кулис зависит от звукопоглощения потолка и кулис (см. пункты 5-8 табл.1). Это, в частности, свидетельствует о реагировании принятого метода расчета на изменение геометрических и акустических характеристик кессонной системы кулис.

4. Заключение

1. С использованием рассмотренной методики выполнена оценка акустической эффективности кессонной системы кулис. Несмотря на приближенный характер методики, она дает возможность оценить влияние на акустическую эффективность геометрических и акустических характеристик системы, а также оценить экономическую эффективность ее применения по сравнению с другими методами снижения шума.

2. Методика может быть рекомендована к применению на ранних стадиях проектирования шумозащитных мероприятий в зданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов, Е.Я. Юдин, Г. Хюбнер и др. Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1987. 558 с.
2. Beranek L.L. Noise Reduction/ New York: MCGraw-Hill, 1960/
3. Борисов Л.А., Сергеев М.В., Чудинов Ю.М. Метод расчета звукопоглощающих систем кулисного типа / Труды НИИСФ: Исследования по строительной акустике. М., 1981. С.15-22.
4. Чудинов Ю.М. Определение коэффициента звукопоглощения системы акустических кулис методом геометрической акустики (высокие частоты) / Тр. НИИСФ: Проблема борьбы с промышленными и городскими шумами в зданиях и на территории застройки. М., 1982. С. 10-14.
5. Дерюгин Л.Н. О теории дифракции на отражающей решетке. ДАН СССР, 93, 6. М., 1953.
6. Антонов А.И., Бацунова А.В., Шубин И.Л. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях // Приволжский научный журнал. 2015. Т.3. №35. С 89-96.
7. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. – М.: ООО «Директмедиа Паблишинг», 2022. 192 с.
8. Dai Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation // Acustica. 1983. V.54. P. 43-45.
9. Embrechts J.J. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques // Acustica. 1984. V.51, №6. P. 288-295.
10. Hodgson, M. On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms // Journal of the Acoustical Society of America. 1990. Vol. 88. N. 2. P. 871–878.
11. Santon F., Daumas A. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles // Rev d'acoustique. 1983. №65. P.109-112.
12. Hodgson M., Cousins O., Chan G., Valeau V. Ray-tracing prediction of sound-pressure and sound-intensity fields in empty and fitted rooms / J. Acoust. Soc. Am. 123, 3760 (2008). DOI.org/10.1121/1.2935343.
13. Chevret P., Chatillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices / J. Acoust. Soc. Am. 132, 3125-3137 (2012). DOI.org/10.1121/1.4754554.
14. Keränen J., Saarinen P., Hongisto V. Prediction accuracies of ray-tracing and regression models in open-plan offices / Building and Environment/ Vol.239, 1 July 2023, 110406. DOI.org/10.1016/j.buildenv.2023.110406.

15. Гусев В.П., Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных помещениях с перегородками неполной высоты // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2(368). С. 260-267.
16. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). P. 13-22. DOI 10.18720/MCE.77.2.
17. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Меркушева Н.П. Цифровизация акустических расчетов при автоматизированном проектировании зданий // Приволжский научный журнал. 2019. № 4(52). С. 31-40.

REFERENCES

1. Osipov G.L., Yudin E.Ya., Hyubner G. et al. Noise reduction in buildings and residential areas / Ed. by G.L. Osipov, E.Ya. Yudin. Moscow: Strojizdat, 1987. 558 p. (rus)
2. Beranek L.L. Noise Reduction. New York: McGraw-Hill, 1960.
3. Borisov L.A., Sergeev M.V., Chudinov Yu.M. Calculation method for sound-absorbing systems of the rocker type. Trudy NIISF: Issledovaniya po stroitel'noj akustike [Proceedings of the NIISF: Research on building acoustics]. Moscow, 1981. Pp. 15-22. (rus)
4. Chudinov Yu.M. Determination of the sound absorption coefficient of the acoustic curtain system by geometric acoustics (high frequencies). Tr. NIISF: Problema bor'by s promyshlennymi i gorodskimi shumami v zdaniyah i na territorii zastrojki [Tr. NIISF: The problem of combating industrial and urban noise in buildings and on the territory of development]. Moscow, 1982. Pp. 10-14. (rus)
5. Deryugin L.N. On the theory of diffraction on a reflecting grating. DAN SSSR, 1953. Vol. 93. No. 6. (rus)
6. Antonov A.I., Bacunova A.V., Shubin I.L. The conditions determining the processes of formation of the noise regime in closed volumes, and their consideration when assessing the distribution of sound energy in rooms. Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2015. Vol. 3. No. 35. Pp. 89-96. (rus)
7. Antonov A.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Calculations of noise in civil and industrial buildings with mirror-diffuse reflection of sound from fences. Moscow: Direktmedia Publishing, 2022. 192 p. (rus)
8. Dai Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation. Acustica. 1983. Vol. 54. Pp. 43-45.
9. Embrechts J.J. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques. Acustica. 1984. Vol. 51. No. 6. Pp. 288-295.
10. Hodgson M. On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms. Journal of the Acoustical Society of America. 1990. Vol. 88. No. 2. Pp. 871-878.
11. Santon F., Dumas A. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles. Revue d'acoustique. 1983. No. 65. Pp. 109-112.
12. Hodgson M., Cousins O., Chan G., Valeau V. Ray-tracing prediction of sound-pressure and sound-intensity fields in empty and fitted rooms. Journal of the Acoustical Society of America. 2008. Vol. 123. Pp. 3760. DOI:10.1121/1.2935343.
13. Chevret P., Chatillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices. Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 132. Pp. 3125-3137. DOI:10.1121/1.4754554.
14. Keränen J., Saarinen P., Hongisto V. Prediction accuracies of ray-tracing and regression models in open-plan offices. Building and Environment. 2023. Vol. 239. 110406. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110406.
15. Gusev V.P., Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenyov V.I. Noise calculations in the design of noise protection in industrial premises with partitions of incomplete height. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. 2017. No. 2(368). Pp. 260-267. (rus)
16. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). Pp. 13-22. DOI:10.18720/MCE.77.2.
17. Antonov A.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V., Merkusheva N.P. Digitalization of acoustic calculations in automated building design. Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2019. No. 4(52). Pp. 31-40. (rus)

Информация об авторах

Антонов Александр Иванович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, д-р. техн. наук, ст. науч. сотр.

E-mail: niisf@mail.ru

Гусев Владимир Петрович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, д-р.
техн. наук, вед. науч. сотр.
E-mail: niisf@mail.ru

Леденев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Матвеева Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Information about authors

Antonov Alexander Iv.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., senior researcher
E-mail: niisf@mail.ru

Gusev Vladimir P.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., leading researcher
E-mail: niisf@mail.ru

Ledenev Vladimir Iv.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. «Urban development and roads»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Matveeva Irina VI.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. «Urban development and roads»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 11.06.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

Н.Г. КАНЕВ^{1,2}, А.Р. ДОЛГЕР²¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия²Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

СНИЖЕНИЕ ШУМА ЭКРАНОМ В ВИДЕ РЕШЕТКИ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИН

Аннотация. Вентилируемые звукоизоляционные конструкции сегодня востребованы для защиты зданий и территорий от шума технологического оборудования, для штатной работы которого требуется подача воздуха. Проектировщиками уделяется значительное внимание разработке продуваемых шумозащитных экранов, хотя стандартизованных и справочных методик по расчету их акустической эффективности практически нет. В связи с этим актуальными являются исследования экранов ламельного типа, позволяющие решить задачу шумопонижения и воздухообмена. Частным случаем ламельного экрана является решетка с параллельными прорезями, расчету прохождения звука через такую конструкцию посвящена данная статья. Снижение шума экраном в виде тонких пластин, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, рассчитывается методом конечных элементов. В работе описана постановка численного эксперимента, введен параметр, характеризующий эффективность снижения шума экраном и представлены результаты расчета этого параметра в зависимости от геометрических размеров решетки и частоты звука. Показано, что эффективность экрана определяется соотношением между шириной пластин и зазором между ними: чем это отношение меньше, тем выше эффективность. Определены параметры решетки, при которых обеспечивается снижение шума не менее 10 дБ. Результаты работы могут непосредственно применяться для проектирования звукоизолирующих вентиляционных решеток и продуваемых шумозащитных экранов.

Ключевые слова: шумозащитный экран, звукоизоляция, метод конечных элементов, дифракция.

N.G. KANEV^{1,2}, A.R. DOLGER²¹Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

NOISE REDUCTION BY A BARRIER IN THE FORM OF A SOLID PLATE GRID

Abstract. Ventilated Soundproofing Structures are widely used today to protect buildings and adjacent areas from noise generated by industrial equipment that requires air supply for normal operation. Designers pay considerable attention to the development of ventilated noise barriers, even though standardized or reference methods for calculating their acoustic performance are virtually nonexistent. In this context, research on louver-type screens, which provide both noise reduction and airflow, is highly relevant. A specific case of a louvered screen is a grille with parallel slits—this article focuses on the calculation of sound transmission through such a structure. The noise reduction provided by a screen consisting of thin plates spaced at equal intervals is calculated using the finite element method. This paper describes the numerical experiment setup, introduces a parameter characterizing the noise reduction efficiency of the screen, and presents the calculated results of this parameter depending on the grille's geometric dimensions and sound frequency.

It is shown that the screen's efficiency is determined by the ratio between the plate width and the gap between them: the smaller this ratio, the higher the efficiency. The study identifies grille parameters that ensure noise reduction of at least 10 dB. The results can be directly applied to the design of soundproof ventilation grilles and ventilated noise barriers.

Keywords: noise shield, sound insulation, finite element method, diffraction.

1. Введение

Технологическое оборудование различного назначения является источником шума в зданиях и городской застройке. Стандартным средством борьбы с шумом источников, расположенных на открытых пространствах, например, на кровлях зданий или на поверхности, являются шумозащитные экраны – сплошные и достаточно массивные конструкции, устанавливаемые вблизи шумящего оборудования [1]. Снижение шума происходит за счет дифракции звуковых волн на экране, для расчета которой известны простые подходы [2]. Эффективность снижения шума экраном определяется, главным образом, его размерами. По требованиям конструкционной надежности высота экранов редко превышает 6 м, что ограничивает возможности снижения шума, поэтому для увеличения эффективности без изменения высоты в литературе рассматриваются разные способы: применение звукопоглощающих экранов [3], насадки на верхней кромке [4,5].

Другим аспектом использования экранов для снижения шума оборудования является сохранение приемлемых условий для его работы. Для установок систем вентиляции и кондиционирования воздуха, электрогенераторов требуется подача воздуха, а окружение установки экраном приводит к нарушению воздухообмена. Поэтому возникает два противоречивых требования к решению по шумозащите. Во-первых, акустическая эффективность должна быть высокой, для этого требуется герметичность конструкции, а, во-вторых, необходима продуваемость конструкции, что, напротив, может быть обеспечено только негерметичными конструкциями. Компромиссным решением являются экраны ламельного типа (рисунок 1) – конструкции из отдельных пластин, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Наличие значительного зазора между ламелями позволяет обеспечить переток воздуха сквозь экран.

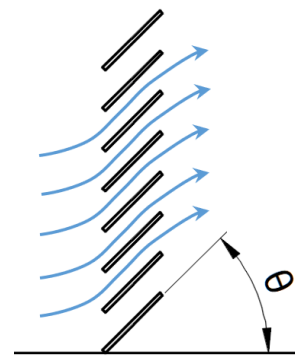


Рисунок 1 – Шумозащитный экран ламельного типа (стрелки указывают направление потока воздуха)

Снижение шума ламельным экраном зависит от нескольких параметров: длина ламелей, шаг между ними, угол наклона ламелей, обозначенный θ на рисунке 1. Кроме этого, важное значение имеют акустические свойства поверхности панелей. Расчет дифракции звуковых волн на такой структуре представляет собой сложную математическую задачу, решения которой для идеальных поверхностей представлены в классических монографиях [6-8]. В общем виде задача дифракции скалярных волн на бесконечной структуре бесконечно тонких абсолютно жестких экранов в постановке на рис. 1 содержится в работе [9]. Отметим, что теория дифракции на импедансных экранах ламельного типа сегодня в полной мере не описана, хотя некоторые частные задачи хорошо изучены [10]. Однако интерес с практической точки зрения к таким экранам достаточно большой, поэтому для их исследования используют лабораторные [11,12] и численные [13] эксперименты.

Предельные случаи экрана на рисунке 1 таковы. При $\theta = 0^\circ$ экран является пластинчатым глушителем, нашедшем широкое применение в практике борьбы с шумом [14]. При $\theta = 90^\circ$ экран становится дифракционной решеткой, преимуществом которой является минимальная толщина конструкции, что нередко является востребованным в стесненных

условиях строительства. В связи с этим представляет интерес оценить потенциальную эффективность снижения шума решетками и выяснить их геометрические параметры, при которых применение решетчатых экранов имеет практическое значение с акустической точки зрения.

В настоящей работе решается задача о прохождении звуковой волны сквозь решетчатую структуру методом конечно-элементного моделирования. Постановка задачи формулируется в простом виде, что позволяет выполнить наглядный численный эксперимент и получить простые оценки акустической эффективности решеток.

2. Модели и методы

В первую очередь опишем математическую постановку задачи. Рассматривается двумерное пространство, в котором справедливо уравнение Гельмгольца для гармонических колебаний:

$$\Delta p + k^2 p = 0, \quad (1)$$

где p – звуковое давления, Δ – оператор Лапласа, $k = \omega/c$ – волновое число, ω – круговая частота, c – скорость звука в среде.

Пластины, образующие решетку, имеют прямоугольное сечение с размерами l и h , расстояние между пластинами d . Далее полагаем, что $h \ll l$. Все поверхности пластин принимаются абсолютно жесткими, на них выполняется граничное условие:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности.

Решетка пластин расположена в плоскости $x = 0$. Вдоль оси x распространяется плоская звуковая волна, падающая нормально на решетку пластин. Постановка задачи приведена на рисунке 2.

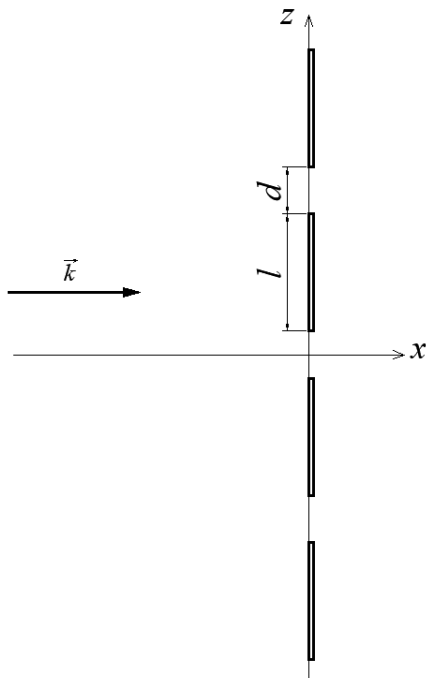


Рисунок 2 – Плоская решетка пластин

Задача состоит в нахождении поля за решеткой и определении снижения уровня звука, прошедшего сквозь решетку в зависимости от ширины пластин l и зазора между ними d . Для расчета звукового поля согласно (1) и (2) применяется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Comsol Multiphysics.

Приведем описание численного эксперимента, схема которого приведена на рисунке 3. Расчетная область, являющаяся воздушным пространством, имеет размер 20×30 м, ось x направлена по горизонтали, ось y – по вертикали. Для трех границ применено импедансное граничное условие для минимизации отражаемого ими звука, импеданс границ принят равным характеристическому импедансу среды ρc , где ρ – плотность воздуха, c – скорость звука в нем. Четвертая граница области является источником плоской звуковой волны, это плоскость, осциллирующая с частотой ω и амплитудой скорости v . Решетка расположена в плоскости $x = 9$ м. В качестве характеристики падающего на решетку поля принимается значение

уровня звукового давления L_A , усредненного по области А. Аналогичным образом характеризуется поле за решеткой – рассчитывается средний уровень звукового давления L_B по области Б.

Снижение звука решеткой определяется как разность между этими значениями, которая фактически является звукоизоляцией конструкции:

$$R = L_A - L_B \quad (3)$$

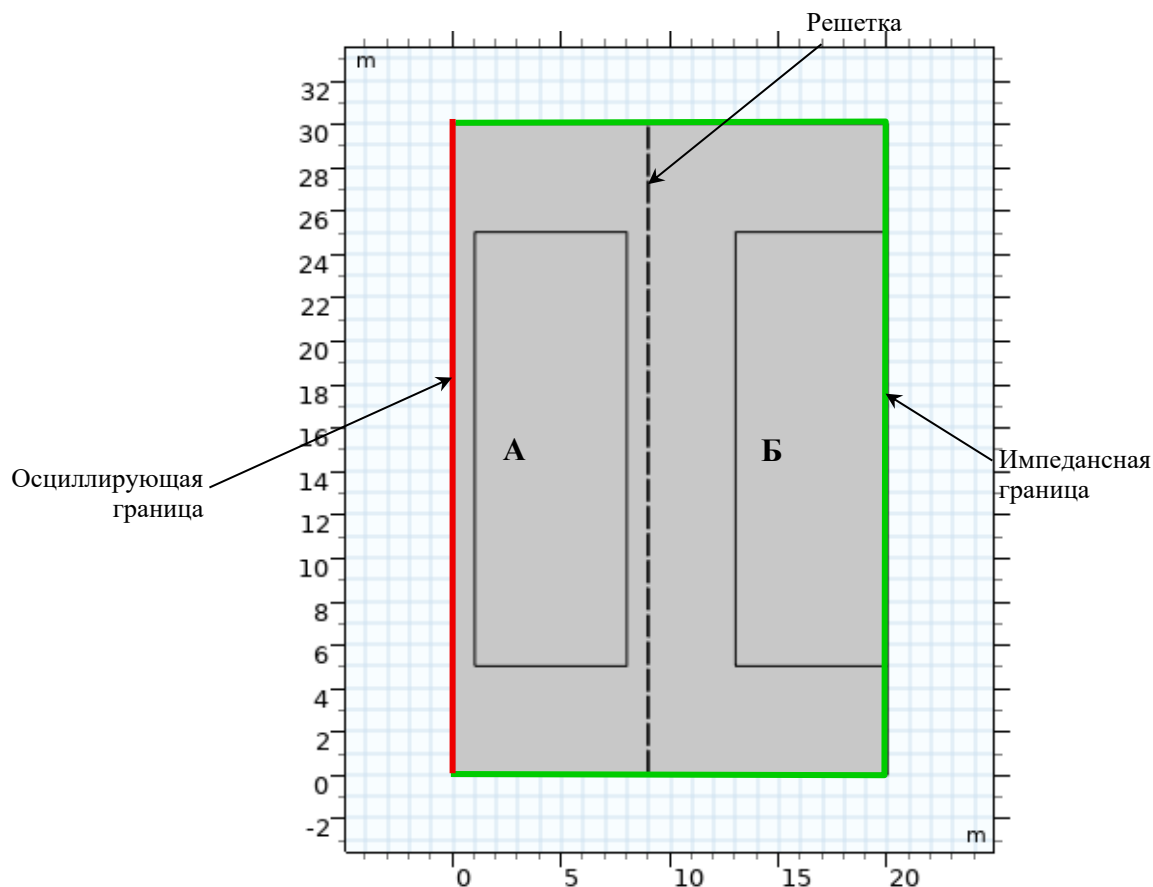


Рисунок 3 – Схема численного эксперимента

На рисунке 4 приведен пример расчета уровня звукового давления для частоты 125 Гц и амплитуды колебаний 1 мм/м осциллирующей границы при следующих параметрах решетки: $l = 1$ м, $h = 0.05$ м, $d = 0.1$ м. На расчетной области справа отсутствует решетка, здесь наблюдается распространение плоской волны вдоль оси x без значительного изменения вдоль направления распространения за исключением верхней и нижней границы, где волновой фронт несколько искажается. При этом область, в которой можно считать приближение плоской волны справедливым, ограничена плоскостями $y = 2$ м и $y = 28$ м. Таким образом, зоны А и Б, выбранные для расчета, соответствуют постановке задачи. На расчетной области слева представлено распределение уровня звукового давления при наличии решетчатого экрана. Экран заметно отражает звук: в области перед экраном, ограниченной плоскостями $x = 0$ и $x = 9$ м, падающая и отраженная волна в результате интерференции образуют стоячую волну, пучности которой проявляются в виде красных полос. За экраном уровень звукового давления ниже, при этом наблюдается сложная интерференционная картина. Сравнение расчета с экраном и без него показывает значительное снижение проходящего шума.

Необходимо отметить одно существенное обстоятельство: решетка пластин оказывает влияние на излучения звука осциллирующей границей. Дело в том, что отраженная волна акустически нагружает границу из-за суперпозиции, падающей и отраженной волн, что при зафиксированной скорости колебаний границы увеличивает излучаемую звуковую мощность, что приводит к увеличению уровня звука в области перед экраном. Таким образом, интенсивность падающего на решетку поля также возрастает, поэтому сравнение звукового давления в области Б при наличии экрана и без него не является корректным. По этой причине

для оценки снижения проходящего через экран звука выбрана разница уровней звукового давления перед экраном и за ним.

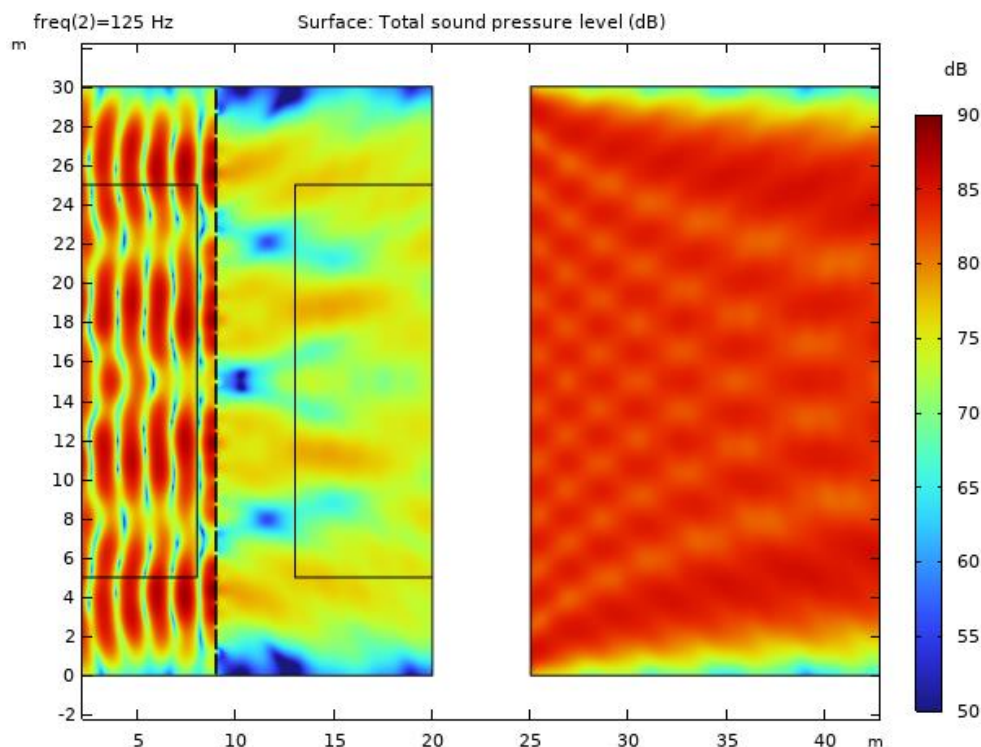


Рисунок 4 – Результат расчета звукового поля на частоте 125 Гц (слева – расчет с решетчатым экраном, справа – без него)

По результатам расчета, приведенного на рисунке 4, определены средние значений уровней звукового давления для областей А и Б, которые составили 78.3 дБ и 73.3 дБ соответственно. Согласно (3) снижение шума решеткой составляет $R = 5.0$ дБ. Аналогичные расчеты проведены для решеток с разной длиной пластин и разным зазором между ними, а также на различных частотах.

3. Результаты исследования и их анализ

Моделирование распространения звука через решетчатый экран проведена для 11 значений зазора d и 5 значений длины пластин l . Для каждого из 55 расчетов построено распределение уровня звукового давления по аналогии с рисунком 4, определены средние значения по областям А и Б и рассчитана эффективность R согласно (3).

Согласно постановке задачи эффективность экрана R зависит от трех параметров: длины пластин l , зазора между ними d и частоты ω . Пластины можно считать достаточно тонкими, поэтому влияние их толщины h на результаты моделирования невелико. Удобно ввести безразмерные параметры kl и kd в качестве аргументов функции R . На рисунке 5 представлены сводные результаты выполненных расчетов в виде зависимости снижения шума решетчатым экраном R в зависимости от ширины зазора kd для различных значений длины kl .

Проанализируем результаты расчетов. Эффективность экрана R уменьшается с увеличением расстояния между пластинами, при этом значение R стремится к нулю, т.е. при больших зазорах между пластинами рассмотренная конструкция становится звукопрозрачной, что физически очевидно. Увеличение ширины пластин приводит к росту эффективности по неизменном расстоянии между ними. Наибольшее снижение проходящего шума составляет 18.7 дБ для наибольшей ширины панелей и наименьшего зазора. В этом смысле геометрия

экрана не может быть оптимальной: наибольшая эффективность снижения звука достигается при наименьшем возможном зазоре и наибольшей ширине панелей, при стремлении отношения d/l к нулю, т.е. к сплошному экрану.

Для практических задач важно определить размеры решетчатого экрана, при которых обеспечивается хорошая эффективность снижения шума, например, не хуже 10 дБ. По кривым на рисунке 5 можно найти значения kd для каждой кривой, при которых R составляет 10 дБ. Полученная зависимость приведена на рисунке 6.

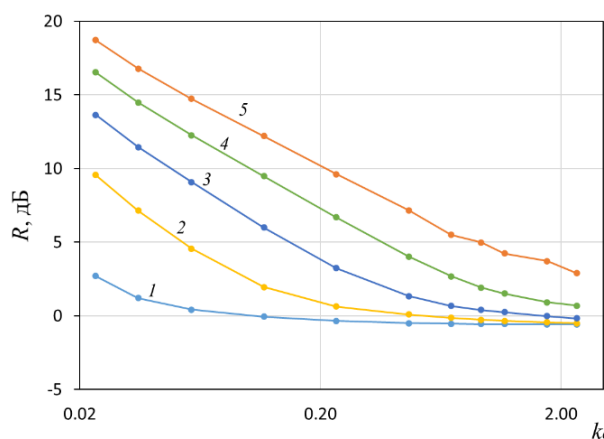


Рисунок 5 – Результат расчета снижения шума решетчатым экраном

1 – $kl = 0.6$, 2 – $kl = 1.2$; 3 – $kl = 1.8$; 4 – $kl = 2.4$;
5 – $kl = 3.0$

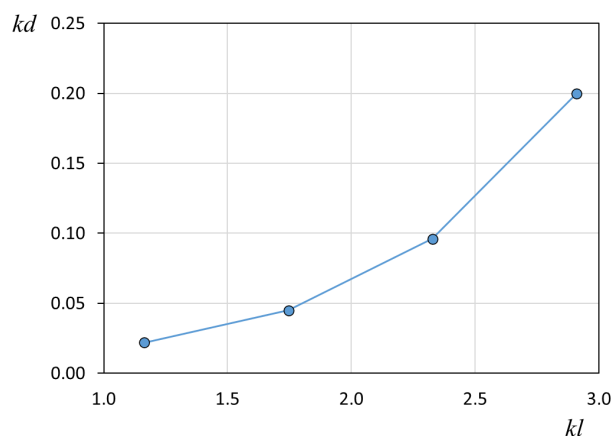


Рисунок 6 – Геометрические параметры решетки, при которых обеспечивается снижение проходящего шума на 10 дБ

График на рисунке 6 может использоваться для подбора параметров решетчатых экранов для обеспечения требуемой акустической эффективности. Например, если ширина панелей и расстоянием между ними таковы, что соответствующая точка лежит ниже кривой, то снижение шума составит не менее 10 дБ. Заметим, что на рисунках 5 и 6 непосредственно не фигурирует частота звука, поэтому выполнение требования должно быть проверено для каждой частоты из рабочего диапазона.

Полученные значения эффективности экранов решетчатого типа в общем случае невелики, только при малых зазорах по сравнению с шириной панели обеспечивается существенное снижение шума. Развитием данного подхода является применение двойных решеток экранов, которые, как показывают исследования в смежных областях [15], позволяют значительно снизить проходящее через экран звуковое поле.

При проектировании и строительстве вентилируемых экранов в виде плоских решеток особого внимания требуют вопросы продуваемости конструкции, что выходит за рамки настоящего исследования. Очевидно, что узкие зазоры не всегда обеспечат необходимо продувание, поэтому задача разработки экранирующего препятствия в общем случае сложнее: кроме акустических требований нужно учитывать и аэродинамические.

4. Заключение

В работе проведено численное моделирование снижения шума экраном решетчатого типа, по результатам которого:

1. Получена зависимость эффективности снижения шума экраном от его геометрических размеров;
2. Показано, что снижение шума экраном тем выше, чем больше ширина панелей и чем меньше зазор между ними;
3. Для практических расчетов найдены соотношения между геометрическими размерами решетчатого экрана, при которых снижение шума составит не менее 10 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубин И.Л., Цукерников И.Е., Николов Н., Писарски А. Основы проектирования транспортных шумозащитных экранов. Москва: Изд. дом «БАСТЕТ», 2015. 207 с.
2. Maekawa Z. Noise reduction by screens // Appl. Acoust. 1968. V. 1. P. 157–173.
3. Комкин А.И., Назаров Г.М. Особенности дифракции звука на звукопоглощающем экране // Акуст. журн. 2021. №3(67). С. 303–307.
4. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers // Build. Acoust. 2003. V.10. P. 289–323.
5. Урусовский И.А. Дифракция звука на экране с всеерной насадкой // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 86–95.
6. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. Москва: Сов. Радио, 1966. 431 с.
7. Неведов Е.И. Асимптотическая теория дифракции электромагнитных волн на конечных структурах. Москва: Наука, 1972. 204 с.
8. Миттра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. Москва: Мир, 1974. 327 с.
9. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens // Wave Motion. 1986. V. 8. P. 225–234.
10. Шанин А.В., Корольков А.И. Отражение волны от дифракционной решетки, составленной из поглощающих экранов. Описание в рамках метода Винера–Хопфа–Фока // Акуст. журн. 2014. № 6 (60). С. 587–595.
11. Viveiros E.B., Gibbs B.M., Gerges S.N.Y. Measurement of sound insulation of acoustic louvres by an impulse method // Appl. Acoust. 2002. V.63. P.1301–1313.
12. Strazdas E., Januševičius T. Development of louvered noise barrier with changeable sound insulation from waste tire rubber and investigation of acoustic properties // 2024. Sustainability. V.16. No.6. 2567.
13. Канев Н.Г., Маяк А.А. Оценка эффективности шума экраном ламельного типа // Конференция «Акустика среды обитания»: матер. конф. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 125–132.
14. Борьба с шумом на производстве: Справочник. Москва: Машиностроение, 1985. 400 с.
15. Naqvi S.B., Ayton L.J. Acoustic scattering by multi-layered gratings // J. Sound Vib. 2025. V.106. 119083.

REFERENCES

1. Shubin I.L., Cukernikov I.E., Nikolov N., Pisarski A. Osnovy proektirovaniya transportnyh shumozashchitnyh ekranov. Moscow: Izd. dom «BASTET», 2015. 207 p. (rus)
2. Maekawa Z. Noise reduction by screens. Applied Acoustics. 1968. Vol. 1. Pp. 157–173.
3. Komkin A.I., Nazarov G.M. Features of Sound Diffraction by a Noise Absorbing Screen. Acoustical Physics. 2021. Vol. 67. Pp. 298–301.
4. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers. Building Acoustics. 2003. Vol. 10. Pp. 289–323.
5. Urusovskii I.A. Sound diffraction by a barrier with a fan-shaped headpiece. Acoustical Physics. 2013. Vol. 59. Pp. 76–85.
6. Vajnshtejn L.A. Teoriya difrakcii i metod faktorizacii. Moscow: Sov. Radio, 1966. 431 p. (rus)
7. Nefedov E.I. Asimptoticheskaya teoriya difrakcii elektromagnitnyh voln na konechnykh strukturah. Moscow: Nauka, 1972. 204 p. (rus)
8. Mittra R., Li S. Analiticheskie metody teorii volnovodov. Moscow: Mir, 1974. 327 p. (rus)
9. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens. Wave Motion. 1986. Vol. 8. Pp. 225–234.
10. Shanin A.V., Korol'kov A.I. Wave reflection from a diffraction grating consisting of absorbing screens: Description in terms of the Wiener-Hopf-Fock method. Acoustical Physics. 2014. Vol. 60. Pp. 624–632.
11. Viveiros E.B., Gibbs B.M., Gerges S.N.Y. Measurement of sound insulation of acoustic louvres by an impulse method. Applied Acoustics. 2002. Vol. 63. Pp. 1301–1313.
12. Strazdas E., Januševičius T. Development of louvered noise barrier with changeable sound insulation from waste tire rubber and investigation of acoustic properties. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 6. 2567.
13. Kanev N.G., Mayak A.A. Ocenka effektivnosti shuma ekranom lamel'nogo tipa. Konferenciya «Akustika sredy obitaniya»: mater. konf. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman, 2023. Pp. 125–132. (rus)
14. Bor'ba s шумом на производстве: Spravochnik. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 400 p. (rus)
15. Naqvi S.B., Ayton L.J. Acoustic scattering by multi-layered gratings. Journal of Sound and Vibration. 2025. Vol. 106. 119083.

Информация об авторах

Канев Николай Георгиевич

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук г. Москва, Россия, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией №42 «Акустика залов»
E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Долгер Александр Романович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды
E-mail: a.dolger@yandex.ru

Information about authors

Kanev Nikolay G.

Research Institute of Building Physics, Moscow, Russia
doctor in phys.-math. sc., head of the dep. of hall acoustics
E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Dolger Alexandr R.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics
E-mail: a.dolger@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 14.08.2025

The article was submitted 19.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 14.08.2025

О.В. КАБАНЦЕВ¹, С.Б. КРЫЛОВ², С.В. ТРОФИМОВ^{1,2}¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия²Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ ТОЛСТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОДАВЛИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы методики выполнения экспериментальных исследований особенностей силового сопротивления железобетонных плит увеличенной толщины («толстых» плит) без устройства поперечного армирования с различными характеристиками армирования растянутой зоны бетона. Проведен критический анализ нормативных методов (СП 63.13330, Eurocode 2, ACI 318, Model Code 2020), выявивший их расхождение с экспериментальными результатами при отношении пролета среза к рабочей высоте сечения $\leq 2,0$. На основе результатов сопоставительного анализа практики отечественных и зарубежных исследований и выполненных численных расчетов представлено обоснование характеристик экспериментальных образцов для выполнения исследований прочности, трещинообразования и механизмов разрушения железобетонных плит при продавливании. Разработана методика нагружения экспериментальных образцов, обеспечивающая создание продавливающего эффекта в опорной зоне. Разработаны методы контроля напряженно-деформированного состояния образцов при поэтапном нагружении.

Ключевые слова: железобетонные плиты, продавливание, напряженно-деформированное состояние, методика экспериментальных исследований.

O.V. KABANTSEV¹, S.B. KRYLOV², S.V. TROFIMOV^{1,2}¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia²Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY FOR PUNCHING SHEAR STRENGTH OF THICK REINFORCED CONCRETE SLABS

Abstract. This article examines methodological approaches for experimental studies of load-bearing behavior in thick reinforced concrete slabs (without shear reinforcement) with varying tensile zone reinforcement characteristics. A critical analysis of regulatory standards (SP 63.13330, Eurocode 2, ACI 318, Model Code 2020) reveals their inconsistency with experimental data when the shear span-to-effective depth ratio is ≤ 2.0 . Through comparative analysis of domestic and international research practices and numerical simulations, the study establishes justification for test specimen parameters to investigate strength, crack formation, and failure mechanisms under punching shear. The developed loading methodology ensures punching effect generation in the support zone, complemented by comprehensive stress-strain monitoring techniques during incremental loading stages.

Keywords: reinforced concrete slabs, punching shear, stress-strain behavior, experimental methodology.

1. Введение

Исследование схемы сопротивления железобетонных плит средней и большой толщины действию продавливающих нагрузок представляет собой в высокой степени актуальную задачу, что определяется рядом важных аспектов.

Анализ научной литературы, посвященной экспериментальным исследованиям, служившим основой для действующих норм РФ по расчету несущей способности плитных конструкций при действии продавливающих нагрузок, показывает, что подавляющее число экспериментов выполнено с нагружением образцов плит малой толщины (от 100 до 250 мм), которые применяются для устройства перекрытий и (по устоявшейся в научной литературе терминологии) относятся к классу «тонких» плит. Однако развитие практики строительства потребовало широкого применения железобетонных плит существенно большей толщины для устройства перекрытий с высокими значениями эксплуатационных нагрузок, а также для устройства так называемых «трансферных плит» – конструкций, обеспечивающих совместную работу и передачу нагрузок от одной группы вертикальных конструкций к другой группе, при этом продольные оси двух групп конструкций не совпадают (рисунок 1).

Трансферные плиты, как правило, воспринимают значительные по своим значениям поперечные усилия, вследствие чего такие конструкции должны обладать повышенной несущей способностью по критерию прочности на продавливание. Трансферные плиты проектируются, как правило, с толщиной, равной или превышающей 600 мм, что позволяет классифицировать (в рамках устоявшейся терминологии) такие плиты как «толстые».

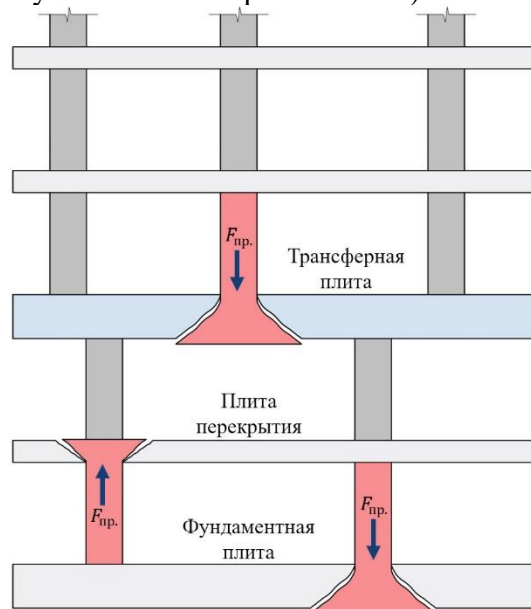


Рисунок 1 – Основные расчетные ситуации, используемые для определения прочности на продавливание плитных конструкций

Вполне очевидным является вопрос о корректности применения нормативных методов оценки несущей способности «толстых» плит при использовании расчетных методов, разработанных на основе результатов экспериментальных исследований образцов плит, относящихся к классу «тонких» плитных конструкций.

Важным аспектом, определяющим корректность прогноза несущей способности по критерию продавливания железобетонных плит увеличенной толщины, являются детальные исследования вклада сопротивления бетонной компоненты, включая фактор влияния растянутого армирования, на общую величину несущей способности плитных конструкций при действии продавливающих нагрузок. Необходимо подчеркнуть, что действующими нормами РФ прямые методы учета работы продольного армирования не предусматривается. Такой существующий подход является принципиально отличным от концепции расчета

несущей способности железобетонных плитных конструкций в нормах других стран, в которых предусмотрены методики учета работы продольного армирования плит.

Экспериментальные исследования сопротивления продавливанию железобетонных плит увеличенной толщины весьма немногочисленны. Так, согласно базе данных международной федерации по железобетону (*fib*) о ранее выполненных экспериментальных исследованиях по определению прочности плит без устройства поперечного армирования на продавливание (а также с учетом исследований плит, выполненных Коровиным Н.Н. [1] и Su-Min Kang [2]) из 482 испытанных плит только 9 образцов имели толщины $h = 400 \dots 500$ мм, и 4 образца превышали толщину 500 мм.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что подавляющее большинство экспериментальных [3-6] и теоретических [7-10] исследований несущей способности плит без поперечного армирования при продавливании было посвящено изучению влияния на их прочность следующих факторов:

- Продольного рабочего растянутого армирования [11-13]. В частности, Guandalini S. и Muttoni A. [14] в 2008 году установили, что при толщине образцов $h = 125$ мм увеличение коэффициента армирования μ_s с 0,22% (PG-9) до 1,5% (PG-6) приводит к повышению несущей способности на продавливание до 107,0%. Аналогичная тенденция была получена для плит толщиной $h = 250$ мм, где при изменении μ_s с 0,33 % (PG-10) до 1,5% (PG-1) прочности на продавливание также значительно увеличилась (до 89,4%).

- Отношения размеров и формы продавливающего штампа к приведенной высоте сечения плит [15-16]. Исследования Филатова В.Б. и Галяутдинова З.Ш. [15] показали, что с увеличением отношения сторон колонны c_{max}/c_{min} прочность на продавливание плит снижается.

В 1989 году Коровиным Н.Н. и Голубевым А.Ю. [1] были проведены испытания 6 образцов плит на продавливание. При этом толщина образцов принималась в пределах от 100 до 600 мм с градацией через 100 мм. По результатам исследований была установлена тенденция снижения значений отношения средних напряжений отрыва на боковых поверхностях тела продавливания σ_p (определяется по формуле 1) к прочности бетона на осевое растяжение R_{bt} при увеличении рабочей высоты сечения h_0 (рисунок 2).

$$\sigma_p = \frac{F_{исп.}}{u_m \cdot h_0}, \quad (1)$$

где $F_{исп.}$ – полученная в ходе испытаний разрушающая нагрузка для образцов плит при продавливании; u_m – среднеарифметическое значений периметров верхнего и нижнего оснований пирамиды продавливания.

В связи с этим авторами было предложено при проектировании железобетонных плит толщиной более 400 мм учитывать снижение средних напряжений отрыва при продавливании переменным коэффициентом K , который учитывается формуле (2).

$$F_{b,ult} = K \cdot R_{bt} \cdot h_0 \cdot u_m, \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий вклад размерного эффекта в несущую способность плит, определяемый по формуле (3).

$$K = 0,5 + \frac{1}{1+3 \cdot h_0} \quad (3)$$

Анализ имеющихся результатов экспериментальных исследований сопротивления продавливанию плит с толщиной 400 мм и более позволяет установить некоторые особенности работы «толстых» плит. При увеличении толщины плиты наблюдается увеличение несущей способности по критерию продавливания во всем диапазоне исследуемых толщин плит.

Однако при увеличении толщины плит тенденция роста несущей способности по критерию продавливания существенным образом меняется по отношению к аналогичной зависимости плит малой толщины. В диапазоне средних и больших толщин плит прирост несущей способности (в %) снижается по отношению к приросту (в %) толщины в сравнении с «тонкими» плитами [17, 18].

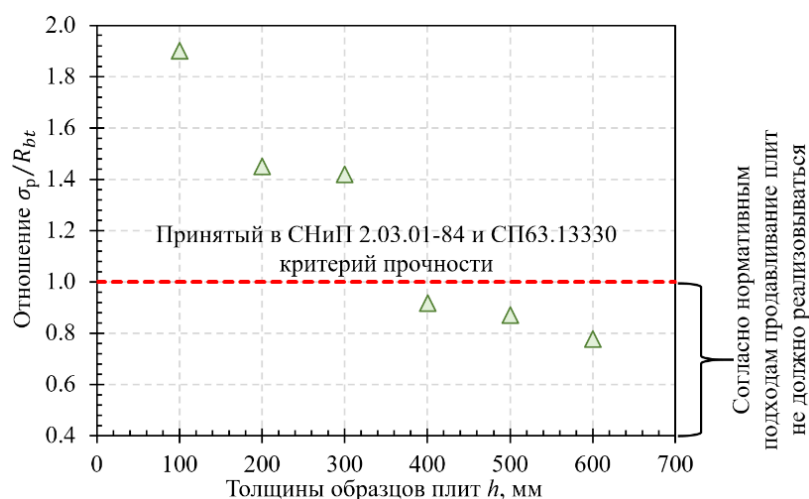


Рисунок 2 – Прочность плит различной толщины при продавливании по результатам выполненных испытаний [2]

Влияние толщины плит на прочность при продавливании может быть продемонстрировано на основе результатов сопоставительного анализа экспериментальных значений [1, 14, 19-22] разрушающих нагрузок $F_{исп.}$ в сопоставлении с расчётными значениями, определёнными по методикам нормативных документов [23-26] (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты сопоставительного анализа

Автор	Образец	r_s , мм	c , мм	h_0 , мм	$\frac{r_s - c}{h_0}$	f_c , МПа	R_{bt} , МПа	μ_s , %	$F_{исп.}$, кН	$F_{исп.} / F_{pred}$			
										СП63	ЕС2	MC2020 (LoA II)	ACI318
[1]	П-2	445	200	165	2,70	20,4	1,69	1,02	590	1,45	1,26	1,23	1,64
	П-3	625	200	250	2,50	20,4	1,69	1,02	1080	1,42	1,20	1,24	1,61
	П-4	790	200	360	2,19	29,6	2,26	1,01	1670	0,92	0,93	0,95	1,27
	П-5	970	200	460	2,11	27,9	2,14	0,87	2260	0,87	1,03	0,94	1,27
	П-6	1140	200	550	2,07	23,7	1,91	1,05	2450	0,78	1,08	0,76	1,17
[14]	PG-1	1500	260	210	7,14	27,6	2,0	1,50	1023	1,30	1,08	1,34	1,49
	PG-2b	1500	260	210	7,14	40,5	3,0	0,25	440	0,37	0,74	1,11	0,53
	PG-4	1500	260	210	7,14	32,3	2,0	0,25	408	0,52	0,74	1,29	0,55
	PG-5	1500	260	210	7,14	29,3	2,3	0,33	550	0,61	0,94	1,55	0,78
	PG-10	1500	260	210	7,14	28,5	2,2	0,33	540	0,62	0,94	1,30	0,78
	PG-11	1500	260	210	7,14	31,5	2,5	0,75	763	0,77	0,97	1,22	1,04
	PG-3	2850	520	456	6,25	32,4	2,1	0,33	2153	0,58	0,92	1,37	0,77
	PG-6	752	130	96	7,83	34,7	2,4	1,50	238	1,14	1,08	1,14	1,41
	PG-7	752	130	100	7,52	34,7	2,4	0,75	241	1,09	1,27	1,34	1,35
	PG-8	752	130	117	6,43	34,7	2,4	0,28	140	0,50	0,79	0,93	0,62
	PG-9	752	130	117	6,43	34,7	2,4	0,22	115	0,41	0,70	0,85	0,51
[19]	P100	463	200	100	4,63	39,4	2,99	0,76	330	0,92	1,43	1,27	1,33
	P150	595	200	150	3,97	39,4	2,99	0,79	583	0,93	1,28	1,25	1,34
	P200	725	200	200	3,63	39,4	2,99	0,73	904	0,94	1,24	1,31	1,36
	P300	988	200	300	3,29	39,4	2,99	0,80	1381	0,77	0,98	1,06	1,17

Автор	Образец	r_s , мм	c , мм	h_0 , мм	$\frac{r_s - \frac{c}{2}}{h_0}$	f_c , МПа	R_{bt} , МПа	μ_s , %	$F_{исп.}$, кН	$F_{исп.} / F_{pred}$			
										СП63	EC2	MC2020 (LoA II)	ACI318
[19]	P400	988	300	400	2,47	39,4	2,99	0,75	2224	0,66	0,94	0,96	1,09
	P500	988	300	500	1,98	39,4	2,99	0,75	2681	0,56	0,79	0,79	0,99
[20]	PL1	1380	130	193	7,15	36,2	2,78	1,63	682	0,98	0,91	1,13	1,38
	PV1	1380	260	210	6,57	34,0	2,63	1,50	974	0,94	0,96	1,14	1,28
	PL3	1380	520	197	7,01	36,5	2,80	1,59	1324	0,84	1,06	1,24	1,18
	PL4	1380	340	267	5,17	30,5	2,39	1,58	1625	1,05	1,06	1,21	1,40
	PL5	1380	440	353	3,91	31,9	2,49	1,50	2491	0,89	0,99	1,06	1,31
[21]	PE4	765	260	197	3,88	35,1	2,71	1,59	985	1,01	1,03	1,10	1,40
	PE3	1926	260	204	9,44	34,2	2,65	1,54	961	0,96	0,97	1,29	1,32
[22]	Спец. 1	1000	250	124	8,06	36,2	2,78	1,52	483	0,94	1,11	1,24	1,31
	Спец. 7	1500	300	190	7,89	35,0	2,70	1,35	825	0,82	0,93	1,11	1,13
	Спец. 10	1900	350	260	7,31	31,4	2,45	1,15	1046	0,67	0,77	0,94	0,90

Примечание к таблице 1: r_s – расстояние от центра приложения нагрузки до центра опирания на стальную колонну экспериментального образца плиты; c – размеры поперечного сечения квадратной колонны; h_0 – приведенная высота рабочего сечения плиты; f_c – цилиндрической прочности бетона на осевое сжатие.

По результатам выполненного сопоставительного анализа (таблица 1) установлено, что с увеличением или уменьшением отношения пролета среза ($r_s - 0,5 \cdot c$) к приведенной рабочей высоте образца h_0 расчетные значения прочности плит на продавливание, определяемые в соответствии с принятыми нормативными подходами [23-26], не имеют приемлемой корреляции со значениями разрушающих нагрузок, полученными в ходе выполнения экспериментальных исследований [1, 14, 19-22] (рисунок 3). Из этого следует, что при отношении пролета среза к приведенной рабочей высоте образца $h_0 \leq 2,0$ изменяется механизм разрушения плит при продавливании и проявляется так называемый «размерный эффект».

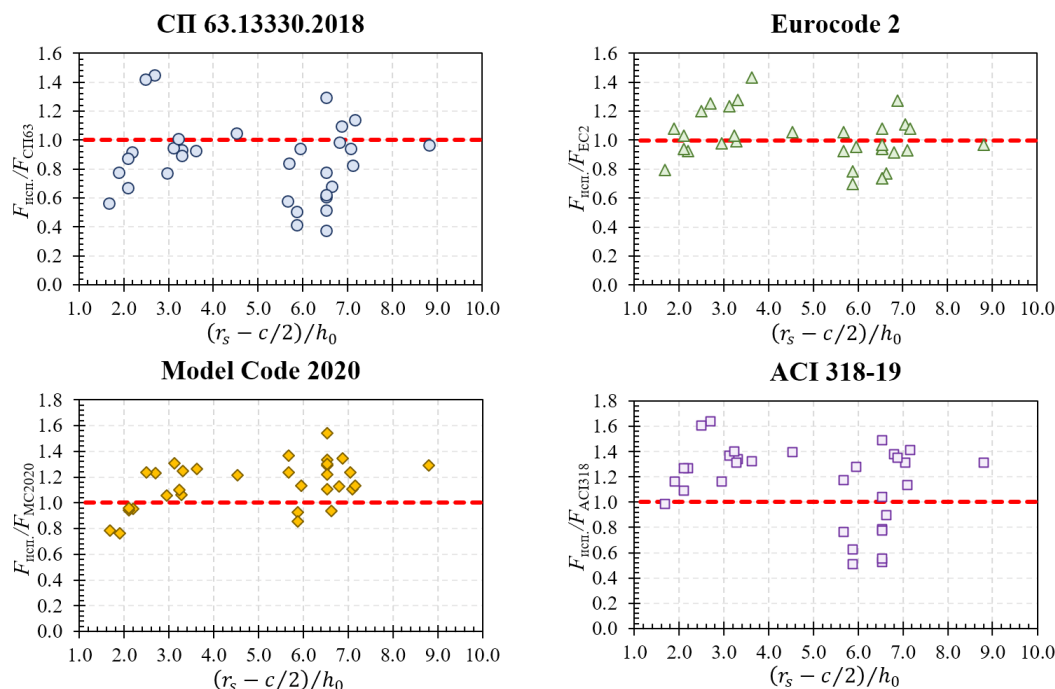


Рисунок 3 – Графики соответствия экспериментальных и расчетных данных по нормативным документам в зависимости от отношения пролета среза к приведенной рабочей высоте плит

На сегодняшний день учет размерного эффекта при расчете несущей способности плит при продавливании является одной из актуальных тем зарубежных исследований и научных дискуссий, о чем свидетельствует ряд научных статей Muttoni A. [17] и Bažant Z.P. [18], критикующих тот или иной подход к учету фактора влияния толщины плиты. При этом выполненный сопоставительный анализ показывает, что на получаемые результаты влияет, в основном, два фактора: 1 – толщина данных конструкций; 2 – принятый процент продольного растянутого армирования μ_s .

Представляется вполне обоснованным в целях решения актуальной задачи разработки метода расчета несущей способности железобетонных плит с увеличенной толщиной («толстых» плит) определить в рамках экспериментальных исследований особенности силового сопротивления, трещинообразования и механизмов разрушения таких типов железобетонных плит без устройства поперечного армирования, включая влияние продольного армирования плитных конструкций.

2. Модели и методы

При испытаниях плитных конструкций на продавливание, как правило, применяют два основных подхода. Первый подход является наиболее трудоемким и дорогостоящим. Этот подход заключается в испытаниях плит перекрытий в составе фрагментов каркасов, состоящих из нескольких пролётов (рисунок 4).



Рисунок 4 – Экспериментальные плиты перекрытий в составе фрагментов каркасов, состоящих из нескольких пролётов: а) [27]; б) [28]

Результаты исследований [27, 28] продемонстрировали, что фактическая прочность при продавливании узлов сопряжения плита-колонна в составе фрагмента каркаса выше, чем для изолированных экспериментальных образцов плит. Это связано с двумя основными факторами.

Первый фактор – это перераспределение изгибающих моментов между участками в пределах опорной зоны плиты и пролётной частью (рисунок 5). Такая схема перераспределения изгибающих моментов в плитных конструкциях влияет на положение линии нулевых моментов, вследствие чего может уменьшаться угол поворота плиты в приопорной зоне и повышается несущая способность плитных конструкций на продавливание согласно [21]. При этом в изолированных экспериментальных образцах плитных конструкций согласно Elnpaal J. [21] такого перераспределения изгибающих моментов при продавливании не возникает.

Второй фактор – повышение прочности плит на продавливание за счет влияния бокового обжатия бетона в приопорной зоне плит. Возникающие силы бокового обжатия бетона значительно увеличивают как прочность на изгиб, так и жесткость на изгиб плитных конструкций. Предполагается, что в неразрезных плоских плитных конструкциях расширение объема бетона в приопорных зонах ограничивается окружающим указанную зону бетоном, который не имеет трещин. Исследованиями Elnpaal J. [21] установлено, что при деформировании вокруг опорной зоны плитной конструкции возникают тангенциальные растягивающие напряжения (кольцо растяжения) и возникают радиальные сжимающие напряжения (осевые сжимающие усилия) в области действия опорного изгибающего момента, что увеличивает прочность плиты на продавливание.

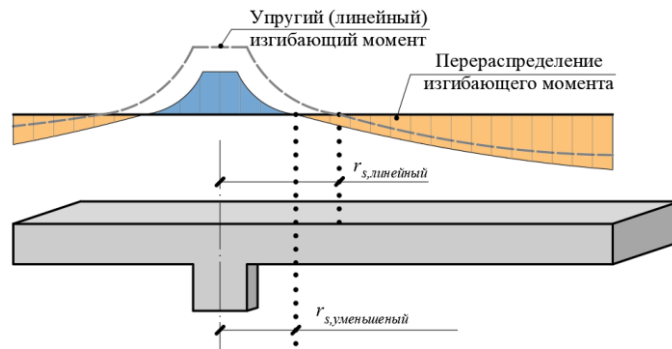


Рисунок 5 – Теоретическое перераспределение изгибающего момента в неразрезных плитах перекрытий между опорной и пролётной частью за счет образования трещин

Необходимо подчеркнуть, что при испытании многопролётных неразрезных плоских плит перекрытий на продавливание толщина плитных конструкций принималась, как правило, в диапазоне 50 – 100 мм (за исключением работы [27], где толщина плоской плиты перекрытия была равна 200 мм). При этом, согласно нормативным документам [24, 25], негативное влияние толщины плит на их несущую способность при продавливании не проявляется при таких малых значениях толщин плит.

Основной объем экспериментальных исследований по продавливанию железобетонных плитных конструкций выполняется на основе второго подхода с использованием изолированных образцов плит, размеры которых, как правило, назначаются, исходя из положения линии нулевых моментов r_s (рисунок 6), полученной без учета перераспределения изгибающих моментов.

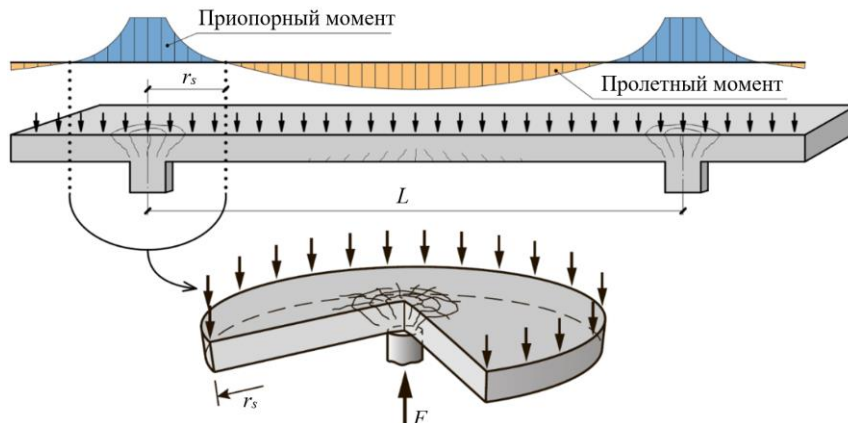


Рисунок 6 – Неразрезная плита перекрытия и соответствующий ей экспериментальный образец

Анализ научной литературы и нормативных документов в части, касающейся проведения экспериментальных исследований по теме продавливания монолитных железобетонных плитных конструкций, показывает, что для определения расположения линии нулевых моментов r_s существует ряд различных подходов, что влияет на размеры экспериментальных образцов.

Болгов А.Н. в работе [29] указывает, что длину консольного участка можно определить при помощи следующей зависимости, определяемой по формуле (5)

$$r_s = 0,5 \cdot L \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1}{3}} \right) \quad (5)$$

Согласно МС 2020 [26] расстояние от центра колонны до линии нулевых моментов в первом приближении можно определить, как: $r_s = 0,22 \cdot L$. Стоит отметить, что согласно МС 2010 [26] величину r_s рекомендуется определить по результатам численного расчета в линейной постановке.

Согласно EAD 160057-00-0301 [30] длина консольного участка экспериментального образца может быть такой же, как расстояние от центра колонны до линии нулевых моментов, либо $r_s \approx 3 \cdot h_0 \dots 5 \cdot h_0$, где h_0 – приведенная рабочая высота сечения плиты.

Для проверки указанных зависимостей и с целью определения размеров экспериментальных образцов в рамках выполнения исследования сопротивления «толстых» монолитных железобетонных плит при действии продавливающих нагрузок были выполнены численные расчеты конструкций в линейно-упругой постановке с использованием МКЭ в программных комплексах ЛИРА-САПР и ATENA. При этом в расчетных моделях толщина плиты была принята равной $h = 600$ мм, а пролет во всех направлениях составлял $L = 5100$ мм.

При выполнении численных расчетов применялся изотропный линейно-упругий материал для колонн и плиты. Основные параметры принятого материала для конструкций: Начальный модуль упругости бетона $E_b = 32500$ МПа; Коэффициент Пуассона – 0,2.

В ПК ЛИРА-САПР было подготовлено два варианта расчетных моделей:

– Первый вариант: монолитная железобетонная плита толщиной 600 мм моделировалась при помощи пластинчатых конечных элементов. Размер конечных элементов в данном случае был принят 100×100 мм (рисунок 7 (а)). Узлы сопряжения колонн и плиты моделировались при помощи абсолютно жестких тел.

– Второй вариант: все несущие элементы конструкции моделировались при помощи универсальных объемных восьмиузловых изопараметрических КЭ. Размер объемных конечных элементов принят $100 \times 100 \times 100$ мм (рисунок 7 (б)).

При выполнении численных расчетов в ПК ATENA плита перекрытия толщиной 600 мм, а также колонны (с поперечным размером сечения 400×400 мм) моделировались при помощи объемных конечных элементов размером $100 \times 100 \times 100$ мм (рисунок 7 (в)).

При выполнении численных расчетов во всех случаях учитывалась нагрузка от собственного веса железобетонной плиты, дополнительно к нагрузке от собственного веса прикладывалась равномерно распределенная по площади нагрузка $F = 12,4$ кН/м². Следует отметить, что указанное суммарное значение нагрузки не является разрушающим при продавливании плиты толщиной 600 мм в соответствии с [23], а используется только с целью определения расстояния от центра колонны до линии нулевых моментов.

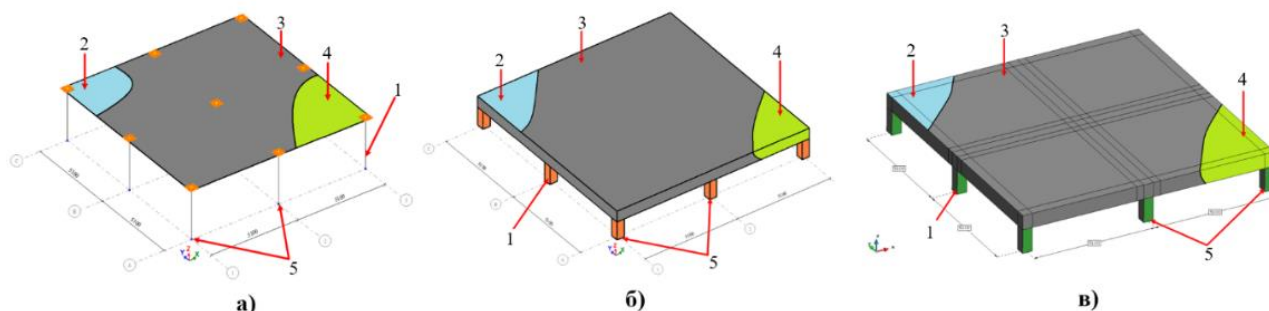


Рисунок 7 – Вариантам расчетных моделей: а) пластинчато-стержневая КЭ модель; б) КЭ модель, выполненная из объёмных элементов в ПК ЛИРА-САПР; КЭ модель, выполненная из объёмных элементов в ПК ATENA

1 – колонны с размерами поперечного сечения 400×400 мм; 2 – равномерно распределенная нагрузка по площади $F = 12,4$ кН/м²; 3 – плита толщиной 600 мм; 4 – нагрузка от собственного веса плиты: для пластинчато-стержневой модели $F_d = 0,6 \cdot 27,7$ кН/м³ = 16,5 кН/м²; для КЭ модели из объёмных элементов $F_d = 27,7$ кН/м³; 5 – жесткая заделка

3. Результаты исследования и их анализ

Определение геометрических размеров экспериментальных образцов плит

По результатам анализа выполненных расчетов (рисунок 8) конечно-элементных моделей неразрезных плоских плит было установлено, что положение линии нулевых моментов для данной конструкции практически не зависит от выбранного метода моделирования плитных конструкций. Разница между минимальным и максимальным значением r_s составляет всего 21 мм, $\Delta \approx 2,0\%$ (таблица 2).

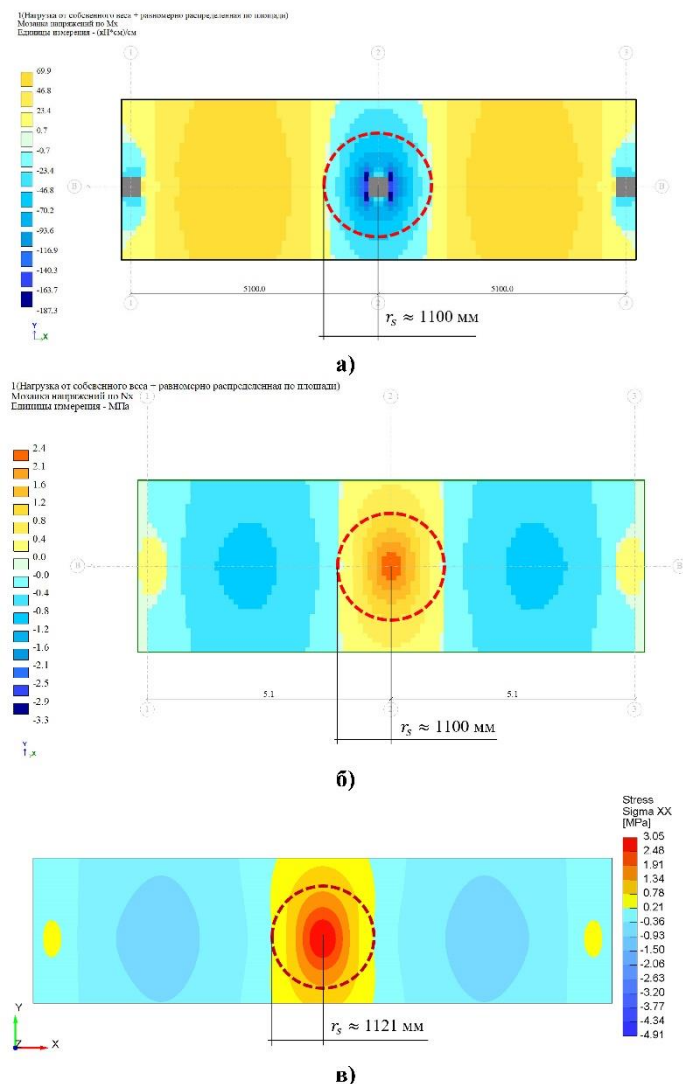


Рисунок 8 – Определение положения линии нулевых моментов r_s при моделировании плиты толщиной 600 мм: а) пластинчатыми КЭ; б) объемными КЭ в ПК ЛИРА-САПР; в) объемными КЭ в ПК АТЕНА

Таблица 2 – Значения r_s , полученные при выполнении численных расчетов

Вариант моделирования конструкций	Величина $r_s^{\text{чис}}$, мм	Усилие в центральной колонне, кН
ПК ЛИРА-САПР: Пластинчатые КЭ с размерами: 100 × 100 мм	1100,0	992,8
ПК ЛИРА-САПР: Объемные КЭ с размерами: 100 × 100 × 100 мм	1100,0	1010,1
ПК АТЕНА: Объемные КЭ с размерами: 100 × 100 × 100 мм	1121,0	1012,8
Среднее значение:	1107,0	1005,2

В таблице 3 представлен сопоставительный анализ полученных значений r_s по предлагаемым теоретическим подходам [26, 29, 30] со средним значением расстояния от центра колонны до линии нулевых моментов определённых по результатам выполненного конечно-элементного анализа (таблица 2).

Таблица 3 – Результаты сопоставительного анализа полученных значений r_s

Автор	Расчетное значение r_s по предлагаемым теоретическим подходам, мм	Среднее значение r_s по результатам численных расчетов, мм	Погрешность, %
Болгов А.Н. [29]	$r_s = 0,5 \cdot \left((1 - \sqrt{1/3}) \cdot 5100 \right) = 1078$	1107,0	2,69
МС 2020 [26]	$r_s = 0,22 \cdot 5100 = 1122$	1107,0	1,34
EAD 160057-00-0301 [30]	$r_s = 3 \cdot 600 = 1800$ $r_s = 5 \cdot 600 = 3000$	1107,0	38,50 63,10

Согласно данным из таблицы 3, аналитически рассчитанное по методике EAD 160057-00-0301 [30] значение r_s существенно отличается от результатов численного моделирования, полученных в программных комплексах ЛИРА-САПР 2021 и ATENA. При этом значения r_s , рассчитанные по методикам Болгова А.Н. [29] (1078 мм) и Model Code 2020 [26] (1120 мм), демонстрируют хорошее соответствие со средним значением $r_s = 1107$ мм полученным по результатам численных расчетов.

Для экспериментальных образцов плит толщиной $h = 600$ мм расстояние от центра приложения нагрузки до центра опирания на колонну было принято равным 1120 мм. Данное значение согласуется как с результатами численного моделирования, так и с положениями Model Code 2020 [26]. При этом отношение пролета среза к приведенной рабочей высоте образца составляет:

$$\frac{r_s^{\text{исп.}} - \frac{c}{2}}{h_0} = \frac{1120 - \frac{400}{2}}{552} = 1,67, \quad (6)$$

где c – размеры поперечного сечения квадратной колонны; h_0 – приведенная рабочая высота образцов плит.

В этой связи при данном значении отношения пролета среза к приведенной рабочей высоте образца h_0 , как показывает ранее выполненный сопоставительный анализ (рисунок 3), данные образцы плит можно идентифицировать, как «толстые».

Также следует отметить, что метод определения значения r_s с использованием линейно-упругих численных моделей является более точным относительно предлагаемых теоретических подходов и может также учитывать влияние таких эффектов, как неравномерность нагружения или пролеты разной длины.

Основные параметры экспериментальных образцов плит

На основе результатов выполненного анализа для изучения силового сопротивления, трещинообразования и механизмов разрушения железобетонных «толстых» плит без поперечного армирования с разным коэффициентом продольного рабочего растянутого армирования при действии статической продавливающей нагрузки выполнены экспериментальные исследования экспериментальных образцов в виде двух серий монолитных прямоугольных железобетонных плит с размерами в плане 2440×2440 мм толщиной 600 мм. Основные принятые параметры для экспериментальных образцов приведены в таблице 4 и на рисунке 9.

Экспериментальные исследования выполнены на базе Лаборатории натурных испытаний Научно-исследовательского института экспериментальной механики НИУ МГСУ.

Таблица 4 – Основные параметры для экспериментальных образцов плит

Серия №	Маркировка образцов	Толщина плиты h , мм	Величина защитного слоя бетона для нижней и верхней грани плиты, мм	Принятый диаметр/шаг продольных верхних арматурных	Принятый диаметр/шаг продольных нижних арматурных	μ_s , %	h_0 , мм	h'_0 , мм	c , мм	r_s , мм
1	ККТ_1_№1	600	20	28/100	12/100	1,12	552	568	400	1120
	ККТ_1_№2									
	ККТ_1_№3									
2	ККТ_2_№1	600	20	28/200	12/200	0,56	552	568	400	1120
	ККТ_2_№2									
	ККТ_2_№3									

Примечание к таблице 4: c – размеры поперечного сечения стальной квадратной колонны; h'_0 – приведенная высота рабочего сечения плиты для нижних продольных арматурных стержней.

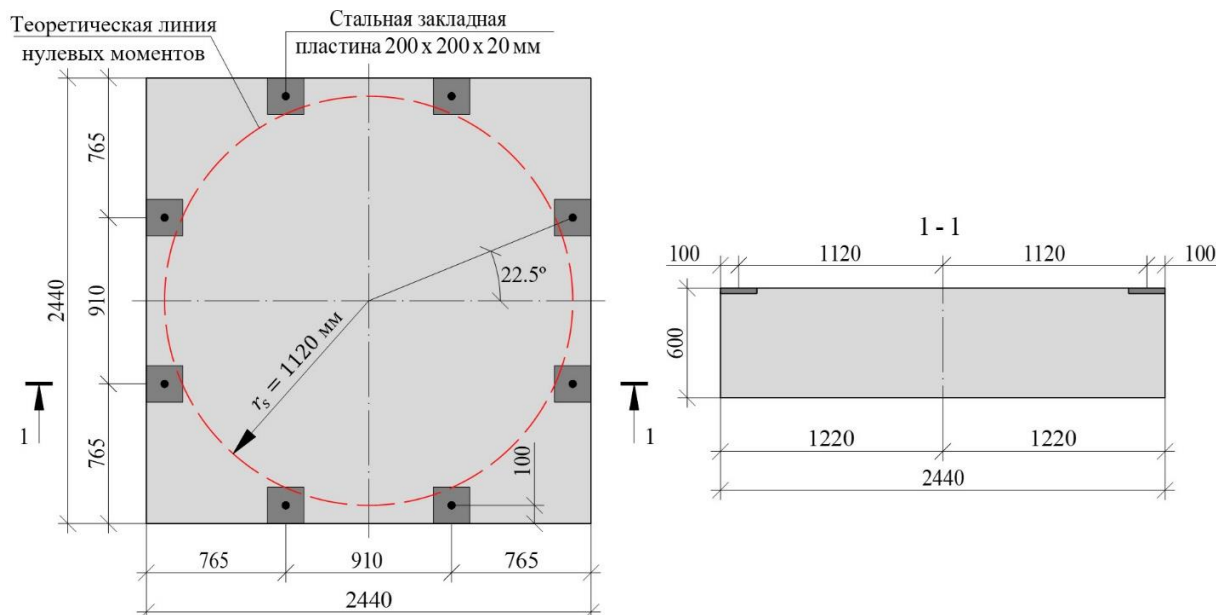


Рисунок 9 – Принятые геометрические размеры экспериментальных образцов марок ККТ_1 и ККТ_2

Рабочее армирование экспериментальных образцов плит (рисунок 10) принималось таким, чтобы была обеспечена прочность на изгиб экспериментальных образцов. В этой связи была выполнена серия линейно-упругих расчетов в ПК ЛИРА САПР и аналитических проверок в соответствии с требованиями [23]. На основании выполненных расчетов продольное верхнее рабочее армирование (растянутые арматурные стержни) плит экспериментальных образцов принималось из арматуры класса по прочности А500 диаметром $\varnothing 28$ ($A_s = 615,8 \text{ мм}^2$ согласно ГОСТ 34028-2016) с шагом $s = 100 \text{ мм}$ (для образцов марки ККТ_1 при $s = 100 \text{ мм}$ $\mu_s = 1,12\%$) и 200 мм (для образцов марки ККТ_2 при $s = 200 \text{ мм}$ $\mu_s = 0,56\%$). При этом продольное нижнее рабочее армирование (сжатые арматурные стержни) экспериментальных образцов железобетонных плит выполняется из арматуры класса А500 $\varnothing 12$ с шагом $s = 100 \text{ мм}$ (для образцов марки ККТ_1) и 200 мм (для образцов марки ККТ_2).

Плиты были изготовлены из тяжелого бетона на песке с модулем крупности 2.33 и гравийном щебне фракции от 5 до 20 мм и портландцементом марки ЦЕМ II 42.5 Н.

Бетонирование плит каждой серии, а также контрольных образцов кубов и призм осуществлялось бетоном из одного замеса. При укладке бетонной смеси использовались вибраторы, а верхняя грань плит разглаживалась вручную при помощи правила. Для защиты бетона от быстрого высыхания, которое могло бы вызвать усадочные трещины, в течении часа после бетонирования плиты укрывались полиэтиленовой пленкой не менее, чем на 28 суток (контрольные бетонные образцы также были помещены под эту пленку через трое суток после бетонирования).

Для каждой серии плит изготавливались контрольные бетонные образцы:

- Кубы $100 \times 100 \times 100$ мм – 24 шт.
- Кубы $150 \times 150 \times 150$ мм – 24 шт. (для образцов марки ККТ_2 – 12 шт.).
- Призмы $100 \times 100 \times 400$ мм – 12 шт.
- Призмы с галтелями $70 \times 70 \times 500$ мм (применялись для определения фактической прочности бетона на осевое растяжение) – 6 шт.

В таблице 5 представлены средние фактические значения прочностных и деформационных характеристик бетона, используемого при изготовлении плит двух серий.

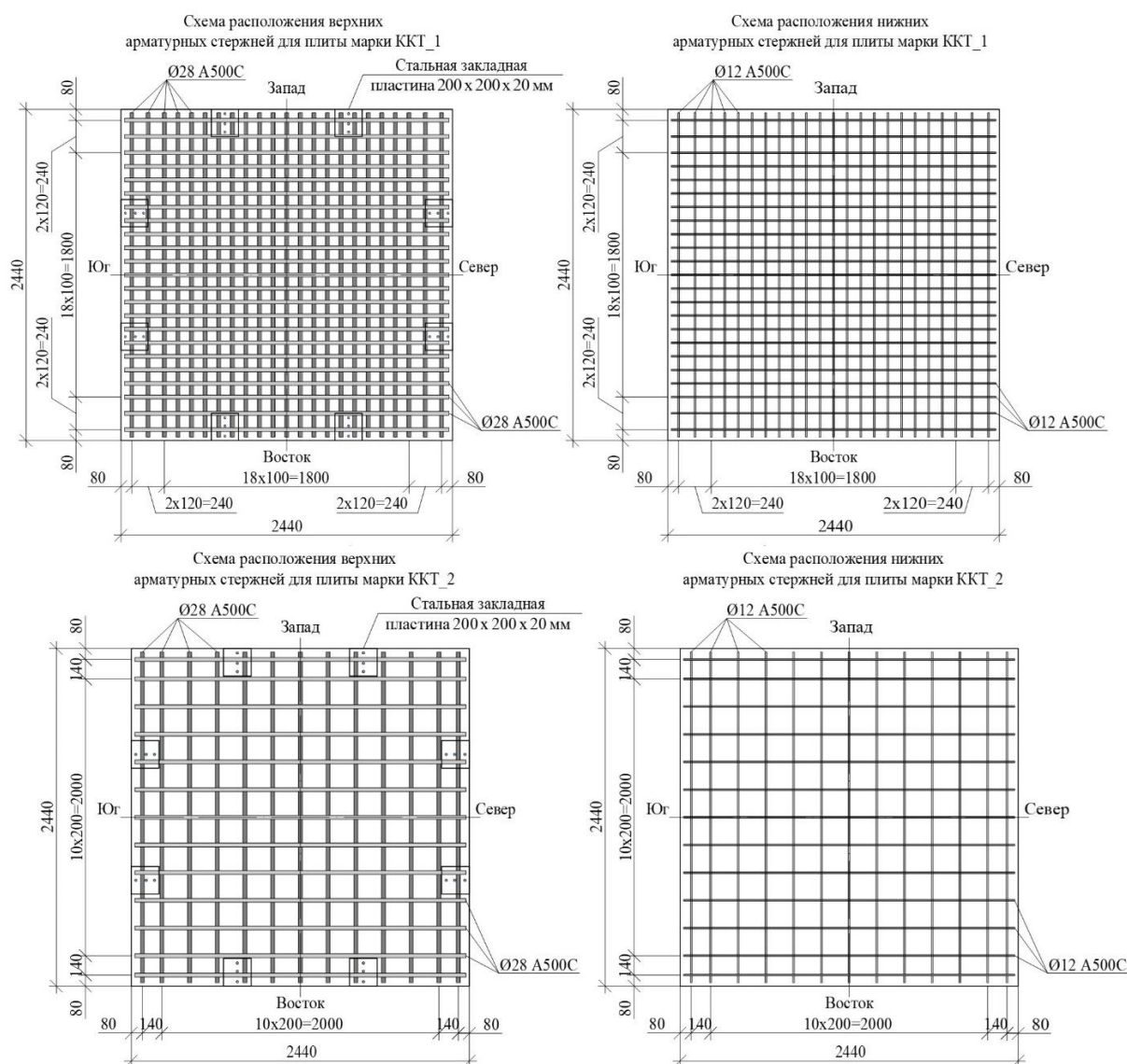


Рисунок 10 – Схема армирования экспериментальных образцов ККТ_1 и ККТ_2

Таблица 5 – Средние значения прочностных и деформационных характеристик бетона для образцов плит марок ККТ_1 и ККТ_2

Номер серии	Наименование образцов плит	Возраст бетона, сутки	R_m^{100} , МПа	R_m^{150} , МПа	R_{bm} , МПа	E_{bm} , МПа	$\nu_{b,pm}$	R_{btm} , МПа
1	ККТ_1_№1	31	49,9	48,9	43,2	31 732,0	0,17	-
	ККТ_1_№2 ККТ_1_№3	с 86 по 97	51,9	54,6	45,8	32 940,0	0,17	2,74
2	ККТ_2_№1	33	50,3	47,4	44,5	31 327,0	0,16	-
	ККТ_2_№2 ККТ_2_№3	с 74 по 82	52,7	54,2	47,9	31 253,0	0,17	2,94

При армировании плит для контроля механических характеристик используемой арматурной стали были подготовлены образцы стержни различной длины:

- для стержней $\varnothing 28$ мм: 6 образцов длиной 1000 мм и 4 образца по 500 мм;
- для стержней $\varnothing 12$ мм: 3 образца длиной 1000 мм.

По результатам испытаний контрольных образцов было установлено, что среднее значение предела текучести $\sigma_s(R_s)$ для арматурных стержней $\varnothing 28$ составляет $\sigma_s(R_s) = 554,2$ МПа, а для стержней $\varnothing 12$ – $\sigma_s(R_s) = 645,7$ МПа. На рисунке 11 представлены фактические диаграммы деформирования арматурной стали при растяжении, полученные по результатам испытаний контрольных образцов стержней.

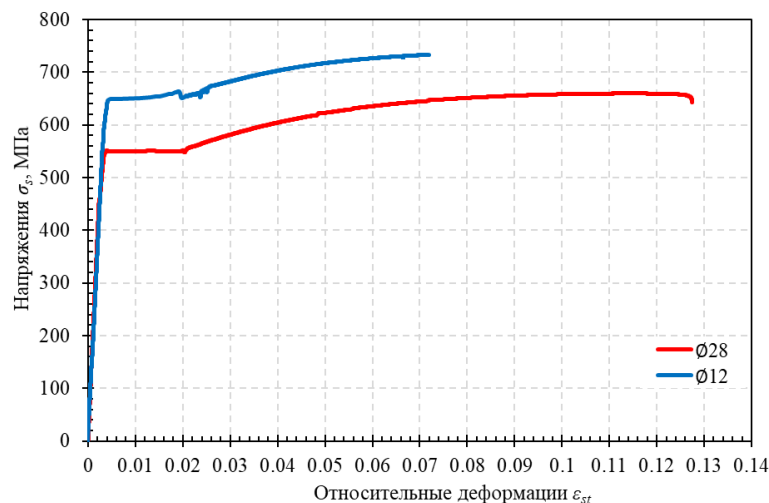


Рисунок 11 – Фактические диаграммы деформирования арматурной стали при растяжении, полученные по результатам испытаний контрольных образцов стержней

Приборы и оборудование

В процессе нагружения плит выполнялась непрерывная фиксация значений нагрузок (кН), передаваемых на образец, вертикальных перемещений нижней поверхности образцов (мм), относительных деформаций ($\epsilon \cdot 10^{-6}$).

Для определения значений радиальных и тангенциальных относительных деформаций сжатого батона ϵ_{bc} в окрестности опирания плит на стальную колонну в процессе нагружения образцов использовались тензорезисторы фирмы «Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.» двух типов: PL-90-11 с длиной чувствительного элемента 90 мм, сопротивление 120 Ом, предельные деформации, согласно технической документации, составляют 0,02 (2%); PL-60-11 с длиной чувствительного элемента 60 мм, сопротивление 120 Ом, предельные деформации, согласно технической документации, составляют 0,02 (2%).

Вертикальные перемещения образцов измерялись при помощи цифровых индикаторов перемещений. Данные индикаторы были установлены в контрольных точках под нижней поверхностью плит марок ККТ_1 и ККТ_2.

Для определения относительных деформаций, возникающих в продольных нижних и верхних стержнях плит в процессе нагружения, использовались тензорезисторы типа: FLAB-5-11 фирмы «Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.», сопротивление 120 Ом, с длиной чувствительного элемента 5,0 мм. Предельные деформации для данного типа тензометрических датчиков, согласно технической документации, составляют 0,05 (5%).

Схема закрепления и нагружения экспериментальных образцов

Испытания образцов плит выполнялись в универсальной рамной системе (рисунок 12), состоящей из восьми стальных П-образных рам, жестко закрепленных к силовому полу лаборатории.

Нагрузка на образцы плит создавалась при помощи одновременного действия восьми гидравлических домкратов (предварительно тарированных), равномерно расположенных по окружности на растянутой грани за теоретической линией нулевых моментов. Максимальная возможная создаваемая нагрузка одним гидравлическим домкратом составляла 980 кН (100 тс). Суммарное значение максимальной возможной создаваемой нагрузки при помощи восьми гидравлических домкратов на образец составляло

$F = 8 \cdot 980 = 7840$ кН (800 тс). При этом в местах установки домкратов на верхней грани образцов было предусмотрено устройство стальных закладных деталей в бетоне плит. Для того, чтобы обеспечить одинаковое значение давления для каждого домкрата, все домкраты были объединены в одну общую систему при помощи распределительного устройства, подключаемого к гидравлической станции.

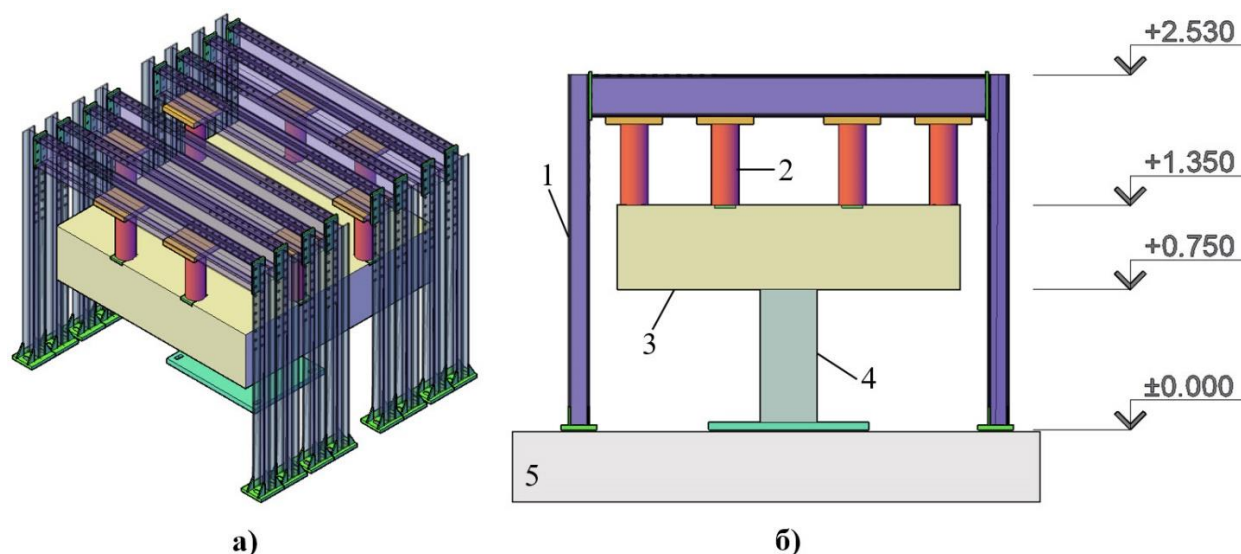


Рисунок 12 – Принципиальная схема нагружения экспериментальных образцов: а) 3D вид; б) вид сбоку
схемы испытаний:

1 – стальная П-образная рама; 2 – гидравлические домкраты; 3 – образец; 4 – стальная колонна

Нагружение образцов выполнялось поэтапно ступенями (рисунок 13), каждая из которых не превышала $0,1 \cdot F_{\text{раз.}}$, где $F_{\text{раз.}}$ – разрушающая нагрузка, полученная по результатам численных исследований. Для образцов серии ККТ-1 ожидаемая разрушающая нагрузка $F_{\text{раз.}} = 4800$ кН, для образцов серии ККТ-2 ожидаемая разрушающая нагрузка $F_{\text{раз.}} = 4000$ кН.

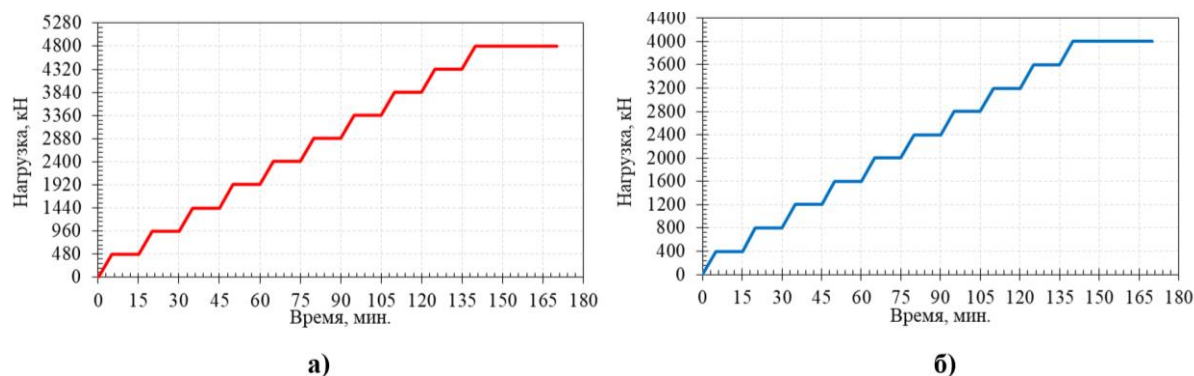


Рисунок 13 – Схема нагружения во времени экспериментальных образцов плит марки: а) ККТ_1; б) ККТ_2

Для контроля равномерности распределения статической нагрузки между восемью гидравлическими домкратами использовались два электронных динамометра, установленных в зоне контакта домкратов с П-образными рамами. Измерения, выполненные в ходе эксперимента, показали, что при испытаниях всех образцов плит расхождение нагрузок между любыми двумя домкратами не превышало $\Delta=1,5\%$, что соответствует допустимой погрешности. Фактические значения разрушающих нагрузок для обеих серий плит рассчитывались по формуле (7).

$$F_{\text{исп.}} = \left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \cdot 8, \quad (7)$$

где: F_1, F_2 – полученные в ходе испытаний образцов плит значения нагрузок, определяемые электронными динамометрами на сжатие.

Во всех случаях опирание образцов плит выполнялось по центру на стальную квадратную колонну с принятыми размерами поперечного сечения 400×400 мм (рисунок 14). По площади верхней пластины опорной конструкции предусмотрена установка листа многослойной фанеры, что позволяет избежать случайных точечных контактов образца и опоры.

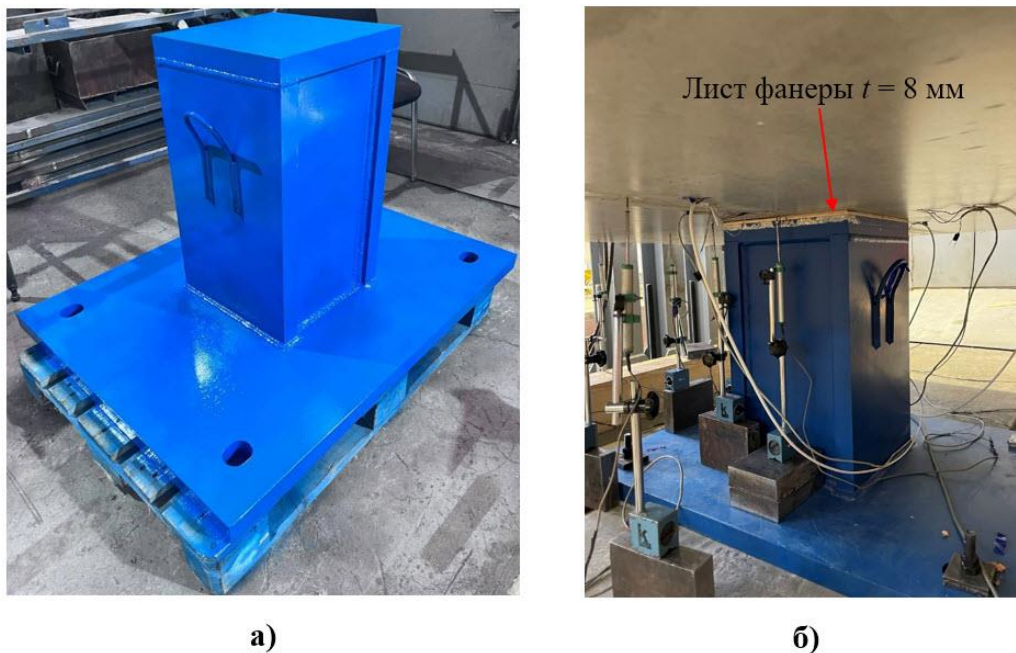


Рисунок 14 – а) Общий вид стальной колонны; б) непосредственное опирание образца плиты на данную колонну

4. Заключение

1. По результатам выполненного сопоставительного анализа было установлено, что с увеличением толщины железобетонных плитных конструкций получаемые предельные значения по прочности плит на продавливание, согласно принятым нормативным подходам, демонстрируют неудовлетворительную корреляцию со значениями разрушающих нагрузок, полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований. Из этого следует, что при увеличении толщины железобетонных плит изменяется механизм разрушения плит при продавливании, что соответствует проявлению размерного эффекта.

2. Для экспериментальных исследований принята конструкция образцов плит толщиной $h = 600$ мм с расстоянием от центра приложения нагрузки до центра опирания на колонну, равным 1120 мм. Принятое значение согласуется как с результатами численного моделирования, так и с положениями Model Code 2020. При этом отношение пролета среза к приведенной рабочей высоте образца составляет 1,67. В условиях принятого значения отношения пролета среза к приведенной рабочей высоте образца h_0 экспериментальные образцы плит можно классифицировать, как «толстые» плиты.

3. Экспериментальные образцы изготавливаются из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие B25. Предусматривается изготовление каждой группы образцов из бетона одной партии. Механические характеристики бетона экспериментальных образцов определялись методами прямых испытаний.

4. Продольное армирование экспериментальных образцов принято в виде сетки из отдельных арматурных стержней из арматуры класса A500. Растянутая арматура принята в двух вариантах: для образцов марки ККТ_1 из стержней диаметром $\varnothing 28$ с шагом 100 мм ($\mu_s = 1,12\%$); для образцов марки ККТ_2 из стержней диаметром $\varnothing 28$ с шагом 200 мм ($\mu_s = 0,56\%$). Сжатая арматура также принята в двух вариантах: для образцов марки ККТ_1 из стержней диаметром $\varnothing 12$ с шагом 100 мм; для образцов марки ККТ_2 из стержней диаметром $\varnothing 12$ с шагом 200 мм. Механические характеристики используемой арматурной стали определены методами прямых испытаний контрольных образцов стержней.

5. Нагружение экспериментальных образцов предусматривается поэтапно: ступенями, каждая из которых не превышала $0,1 \cdot F_{\text{раз.}}$, где $F_{\text{раз.}}$ – разрушающая нагрузка, полученная по результатам численных исследований.

6. В процессе нагружения плит предусматривается выполнение непрерывной фиксации значений нагрузок (кН), передаваемых на образец, вертикальных перемещений нижней поверхности образцов (мм), относительных деформаций ($\varepsilon \cdot 10^{-6}$) бетона приопорной зоны и растянутой арматуры с целью определения фактического напряженно-деформированного состояния образцов.

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».

The research was conducted as part of the development program for 2025-2036 of Moscow State University of Civil Engineering under the framework of strategic academic leadership program "Priority 2030".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровин Н.Н., Голубев А.Ю. Продавливание толстых железобетонных плит // Бетон и железобетон. 1989. №11. С. 20-23.
2. Kang S.M., Na S.J., Hwang H.J. Two-way shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections. Engineering Structures. 2021. Vol. 231. Pp. 1-11. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111693.
3. Трекин Н.Н., Крылов В.В., Трофимов С.В., Евстафьева Е.Б., Саркисов Д.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. №8. С. 1006-1014. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.16.08.1006-1014.

4. Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андриян К.Р. Несущая способность монолитных железобетонных плит на продавливание при статическом и динамическом нагружении // Строительство и реконструкция. 2022. №5. С. 67-79. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-103-5-67-79.
5. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Сопротивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. №9. С. 1454-1468.
6. Зенин А.С., Болгов А.Н., Сокуров А.З., Кудинов О.В. Прочность на продавливание плоских плит перекрытий в зонах опирания на торцы стен // Бетон и железобетон. 2022. №2 (610). С. 35-40.
7. Болгов А.Н., Иванов С.И., Сокуров А.З., Невский А.В. О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях // Бетон и железобетон. 2021. №4 (606). С. 39-44.
8. Кабанцев О.В., Песин К.О., Карлин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния плитных конструкций в приопорных зонах // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. №1. С. 55-62.
9. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий при локальном приложении нагрузки // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. №1. С. 156-161.
10. Манаенков И.К. Определение граничных значений толщины плоских железобетонных перекрытий из условия продавливания // Инженерный вестник Дона. 2025. №6. URL: ivdon.ru/tu/magazine/archive/n6y2025/10162.
11. Коровин Н.Н., Ступкин А.В. Продавливание железобетонных плит колонной // Бетон и железобетон. 1978. №7. С. 36-38.
12. Руф Л.В., Викман Э.А. Преднапряжение в железобетонных перекрытиях, сооружаемых методом подъема // Бетон и железобетон. 1977. №5. С. 18-19.
13. Rizk E., Marzouk H., Hussein A. Effect of reinforcement ratio on punching capacity of RC plates // Canadian Journal of Civil Engineering. 2011. Vol. 38. No. 7. Pp. 729-740. DOI: 10.1139/111-053.
14. Guandalini S., Burdet O.L., Muttoni A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios // ACI Structural Journal. 2009. Vol. 106. №. 1. Pp. 87-95.
15. Истомин А.Д. Экспериментальные исследования продавливания монолитных плит колоннами прямоугольного сечения // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: Сборник докладов Первой Национальной конференции. Москва, 2020. С. 69-74.
16. Филатов В.Б., Галяутдинов З.И. Экспериментальное исследование и методика расчета прочности железобетонных плит при продавливании // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. №4 (45). С. 53-65.
17. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Size effect on punching shear strength: Differences and analogies with shear in one-way slabs // fib Bulletin. Punching shear of structural concrete slabs. 2017. №81. Pp. 59-72. DOI: 10.35789/fib.BULL.0081.Ch04.
18. Bažant Z.P., Dönmez A. Size Effect on Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs with and without Shear Reinforcement // ACI Structural Journal. 2017. Vol. 114 №4. Pp. 875-886. DOI: 10.14359/51689719.
19. Li K.K.L. Influence of Size on Punching Shear Strength of Concrete Slabs: MEng dissertation. Montreal: McGill University, 2000. 92 pp.
20. Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs // ACI Structural Journal. 2012. Vol. 109 pp. 889-900.
21. Einpaul J. Punching strength of continuous flat slabs: PhD thesis. Lausanne: EPFL, 2016. 211 pp.
22. Birkle G. Punching of Fat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layouts: PhD dissertation. Calgary: UCalgary, 2004. 217 pp.
23. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Москва: Минстрой России, 2018. 143 с.
24. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
25. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, 2019. 624 pp.
26. fib Model Code for Concrete Structures 2020. fib Lausanne: Ernst&Sohn, 2020.
27. Muttoni A., Coronelli D., Martinelli L. Testing of a full-scale flat slab building for gravity and lateral loads. Engineering Structures. 2021. No. 243. Pp. 1–17. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112551.
28. Ladner M., Schaeidt W., Gut S. Experimentelle Untersuchungen an Stahlbeton-Flachdecken. EMPA Bericht. 1977. №. 205. 96 pp.
29. Болгов А.Н. Работа узлов сопряжения колонн из высокопрочного бетона с перекрытием в монолитных зданиях с рамно-связевой системой: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. Москва, 2005. 152 с.
30. EAD 160057-00-0301 L- or Z-shaped metal sheets for the increase of punching shear resistance of flat slabs or footings and ground slabs. EOTA. 2021.

REFERENCES

1. Korovin N.N., Golubev A.Yu. Punching of thick reinforced concrete slabs. *Beton i zhelezobeton*. 1989. No. 11. Pp. 20-23. (rus)
2. Kang S.M., Na S.J., Hwang H.J. Two-way shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. Pp. 1-11.
3. Trekin N.N., Krylov V.V., Trofimov S.V., Evstaf'eva E.B., Sarkisov D.Yu. Experimental-theoretical study of punching shear strength of slabs. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 8. Pp. 1006-1014. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.16.08.1006-1014. (rus)
4. Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Krylov V.V., Evstaf'eva E.B., Andryan K.R. Bearing capacity of monolithic reinforced concrete slabs under punching shear under static and dynamic loading. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2022. No. 5. Pp. 67-79. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-103-5-67-79. (rus)
5. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Resistance to progressive collapse of monolithic building frames under local damage of nodes from punching. *Vestnik MGSU*. 2024. Vol. 19. No. 9. Pp. 1454-1468. (rus)
6. Zenin A.S., Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Kudinov O.V. Punching shear strength of flat slabs in wall support zones. *Beton i zhelezobeton*. 2022. No. 2 (610). Pp. 35-40. (rus)
7. Bolgov A.N., Ivanov S.I., Sokurov A.Z., Nevskiy A.V. On calculation of strength of joints between reinforced concrete columns and slabs in monolithic-frame high-rise buildings. *Beton i zhelezobeton*. 2021. No. 4 (606). Pp. 39-44. (rus)
8. Kabantsev O.V., Pesin K.O., Karlin A.V. Analysis of stress-strain state of slab structures in support zones. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. No. 1. Pp. 55-62. (rus)
9. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. On calculation of flat reinforced concrete slabs under local load application. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya*. 2017. No. 1. Pp. 156-161. (rus)
10. Manaenkov I.K. Determination of limiting values of flat reinforced concrete slab thickness from punching condition. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2025. No. 6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2025/10162. (rus)
11. Korovin N.N., Stupkin A.V. Punching of reinforced concrete slabs by column. *Beton i zhelezobeton*. 1978. No. 7. Pp. 36-38. (rus)
12. Ruf L.V., Vikman E.A. Prestressing in reinforced concrete floors constructed by lift-slab method. *Beton i zhelezobeton*. 1977. No. 5. Pp. 18-19. (rus)
13. Rizk E., Marzouk H., Hussein A. Effect of reinforcement ratio on punching capacity of RC plates. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2011. Vol. 38. No. 7. Pp. 729-740. DOI: 10.1139/l11-053.
14. Guandalini S., Burdet O.L., Muttoni A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios. *ACI Structural Journal*. 2009. Vol. 106. No. 1. Pp. 87-95.
15. Istomin A.D. Experimental studies of punching of monolithic slabs by rectangular columns. Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya: Sbornik dokladov Pervoy Natsional'noy konferentsii. Moscow, 2020. Pp. 69-74. (rus)
16. Filatov V.B., Galyautdinov Z.Sh. Experimental study and calculation method of strength of reinforced concrete slabs under punching. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2021. Vol. 11. No. 4 (45). Pp. 53-65. (rus)
17. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Size effect on punching shear strength: Differences and analogies with shear in one-way slabs. *fib Bulletin. Punching shear of structural concrete slabs*. 2017. No. 81. Pp. 59-72. DOI: 10.35789/fib.BULL.0081.Ch04.
18. Bažant Z.P., Dönmez A. Size effect on punching strength of reinforced concrete slabs with and without shear reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2017. Vol. 114. No. 4. Pp. 875-886. DOI: 10.14359/51689719.
19. Li K.K.L. Influence of Size on Punching Shear Strength of Concrete Slabs: MEng dissertation. Montreal: McGill University, 2000. 92 p.
20. Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal*. 2012. Vol. 109. Pp. 889-900.
21. Einpaul J. Punching strength of continuous flat slabs: PhD thesis. Lausanne: EPFL, 2016. 211 p.
22. Birkle G. Punching of Fat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layouts: PhD dissertation. Calgary: UCalgary, 2004. 217 p.
23. SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions". Moscow: Minstroy Rossii, 2018. 143 p. (rus)
24. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
25. ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, 2019. 624 p.
26. fib Model Code for Concrete Structures 2020. fib Lausanne: Ernst & Sohn, 2020.
27. Muttoni A., Coronelli D., Martinelli L. Testing of a full-scale flat slab building for gravity and lateral loads. *Engineering Structures*. 2021. No. 243. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112551.
28. Ladner M., Schaeidt W., Gut S. Experimentelle Untersuchungen an Stahlbeton-Flachdecken. *EMPA Bericht*. 1977. No. 205. 96 p.

29. Bolgov A.N. Behavior of joints between high-strength concrete columns and slabs in monolithic buildings with frame-bracing system: PhD thesis. Moscow, 2005. 152 p. (rus)

30. EAD 160057-00-0301 L- or Z-shaped metal sheets for the increase of punching shear resistance of flat slabs or footings and ground slabs. EOTA. 2021.

Информация об авторах

Кабанцев Олег Васильевич

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

д-р техн. наук, директор научно-технических проектов, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций,

E-mail: ovk531@gmail.com

Крылов Сергей Борисович

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» г. Москва, Россия,

д-р техн. наук, академик РААСН, заведующий лабораторией механики железобетона,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Трофимов Сергей Владиславович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры Железобетонные и каменные конструкции

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» г. Москва, Россия,

научный сотрудник лаборатории механики железобетона,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Information about authors

Kabantsev Oleg V.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Civil Engineering», Moscow, Russia,

Dr. Sci. (Engineering), Director of Scientific and Technical Projects, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures,

E-mail: ovk531@gmail.com

Krylov Sergey B.

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

Dr. Sci. (Engineering), Academician of the RAACS, Head of the Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Trofimov Sergey V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia, Postgraduate Student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures,

A.A. Gvozdev Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete, JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia,

Researcher at the Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 26.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

С.Н. ОВСЯННИКОВ^{1,2}¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия²Научно-исследовательский институт строительной физики, Москва, Россия

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. Исследовалась нерезонансная и резонансная звукопередача через ограждающую конструкцию. Использовался метод статистического энергетического анализа, в систему уравнений энергетического баланса добавлены нерезонансные энергетические связи. Рассмотрен известный вариант представления нерезонансной звукопередачи непосредственно из помещения в помещение, минуя ограждающую конструкцию. Предложена схема энергетических связей между элементами, в которой показана нерезонансная звукопередача от помещения к панели, предложены формулы расчета коэффициентов нерезонансной энергетической связи от помещения к панели через вычисление импеданса поперечных колебаний панели с учетом импеданса массы, изгибной жесткости и потерь в панели. Представлены результаты расчета и измерения уровней звука в реверберационных камерах и виброускорения на стеклянной пластине между ними. Показана удовлетворительная сходимость между результатами расчета и измерения, что позволяет использовать приложенную методику расчета параметров звука и вибрации в более сложных виброакустических системах.

Ключевые слова: звукоизоляция, нерезонансная звукопередача, метод статистического энергетического анализа, импеданс.

S.N. OVSYANNIKOV^{1,2}¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia²Research Institute of building physics, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING SOUND INSULATION USING THE METHOD OF STATISTICAL ENERGY ANALYSIS

Abstract. Non-resonant and resonant sound transmission through the enclosing structure was investigated. The method of statistical energy analysis was used, non-resonant energy links were added to the system of energy balance equations. A well-known variant of representing non-resonant sound transmission directly from room to room, bypassing the enclosing structure, is considered. A scheme of energy connections between the elements is proposed, which shows non-resonant sound transmission from room to panel, formulas for calculating the coefficients of non-resonant energy connection from room to panel are proposed by calculating the impedance of transverse vibrations of the panel, taking into account the impedance of mass, bending stiffness and losses in the panel. The results of calculating and measuring sound levels in reverberation chambers and vibration acceleration on a glass plate between them are presented. A satisfactory convergence has been shown between the calculation and measurement results, which makes it possible to use the applied methodology for calculating sound and vibration parameters in more complex vibroacoustic systems.

Keywords: Sound insulation, non-resonant sound transmission, statistical energy analysis method, impedance.

1. Введение

Проблемы проектирования качественной звукоизоляции в зданиях в значительной мере вызваны отсутствием достаточно понятных проектировщику аналитических методов расчета звукоизоляции помещений для целого ряда современных конструктивных систем зданий. Легкие внутренние и наружные ограждающие конструкции получили широкое распространение, однако, проектировщик пока не вооружен инженерной методикой расчета звукоизоляции легких многослойных ограждающих конструкций кроме частного случая двойных остеклений и обшивных перегородок и без учета звукопередачи по каркасу. Акустической особенностью легких конструкций из листов небольшой толщины является преобладание инерционной звукопередачи в области частот до критической, т.е. практически во всем нормируемом диапазоне частот.

В России первые расчеты и измерения звукоизоляции двойных конструкций выполнены Г.Л. Осиповым, который в 1959 году опубликовал результаты обширных исследований звукоизоляции одинарных и двойных оконных и дверных конструкций, исследовал влияние толщины воздушного промежутка на дополнительную звукоизоляцию двойных остеклений, а также влияние на звукоизоляцию герметичности притворов [1]. Значительный вклад в развитие отечественной теории и методологии расчета и проектирования звукоизоляции внес В.И. Заборов [2], который развил теоретические представления зарубежных исследователей (Рэля, Р. Бергера, Л. Кремера, А. Лондона, М. Хекла) о прохождении звука через однослойные и двойные ограждения и предложил аналитические решения для определения коэффициента прохождения звука через одно- и двухслойные массивные ограждения. В исследованиях М.С. Седова [3, 4 и др.] впервые в России были показаны механизмы инерционной и резонансной звукопередачи через одинарные и двойные тонкие конструкции ограниченных размеров, что позволило получить выражения для вычисления коэффициентов инерционного и резонансного прохождения звука. Его учениками решен ряд задач расчета звукоизоляции однослойных, слоистых вибродемпфированных конструкций, конструкций с регулируемой изгибной жесткостью, экспериментально исследована звукоизоляция трехслойных светопрозрачных конструкций. Работы Р.Ю. Винокура и Э.М. Лалаева [5], посвященные разработке инженерной методики расчета звукоизоляции двойных и тройных легких глухих и светопрозрачных конструкций, легли в основу «Руководства по расчёту и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий» 1983 г., ставшего основой действующего СП 275.

За рубежом в основу метода расчета однослойных ограждений конечных размеров положены работы Sewell K.B., Josse, R., Lamure J., Maidanik G. На теории этих исследователей, учитывающей инерционное и резонансное прохождение звука, построена методология расчета звукоизоляции ограждающих конструкций конечных размеров в европейских нормах, которые в России приняты в ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012. Современные зарубежные исследования звукоизоляции одно-двух и трехслойных ограждений представлены в работах [7, 8, 9, 10], однако предложенная авторами методика расчета не учитывает нерезонансную звукопередачу в области ниже критической частоты, а в области высоких частот расчётная звукоизоляция значительно выше измеренной. В работах [11, 12, 13] предложены аналитические решения для инженерных расчетов звукоизоляции одно-...пятислойных остеклений, которые показали хорошую сходимость с результатами измерений. В работе [14] предложена методика расчета звукоизоляции многослойных остеклений с учетом прохождения звука через вентиляционные каналы. Для использования предложенных методик в инженерной практике необходимо исследовать влияние размеров конструкций, дистанционных рамок и других звукопроводных элементов, экспериментально уточнить значения коэффициентов общих потерь в расчетной системе.

Значительный интерес представляют и вопросы расчета звукоизоляции современных деревянных конструкций, в том числе с использованием клееных панелей CLT. Особенностью

таких конструкций является малая поверхностная масса (в 5 раз меньше, чем железобетона), но достаточно высокая изгибная жесткость, что в сочетании резко снижает характеристики звукоизоляции воздушного и ударного шума. Для конструкций из клееной древесины недостаточно изучены и динамические характеристики: динамический модуль упругости и коэффициент потерь. За рубежом более 30 лет существует мода на «Sustainable housing», поэтому технологии деревянного домостроения развиты гораздо шире, чем в России, несмотря на наличие в России практически неограниченной сырьевой базы. Конструкции из CLT применяются в сочетании с массивными железобетонными «плавающими» полами, обшиваются многослойными листовыми материалами на виброизолирующих подвесах, что обеспечивает нормативную звукоизоляцию и огнестойкость. Поэтому достаточно много современных работ, посвященных звукоизоляции конструкций из клееных деревянных панелей в сочетании с другими элементами, улучшающими их звукоизоляцию [16-19]. Основываясь на результатах зарубежных исследований и выполнив экспериментальные исследования изоляции воздушного и ударного шума конструкций из CLT в сочетании с дополнительными элементами в стенах и перекрытиях, можем получить достаточно простые инженерные методики расчета и проектирования звукоизоляции. Для расчетов звукоизоляции каркасных деревянных конструкций с многослойными обшивками могут быть использованы расчетные формулы [12] для многослойных остеклений с корректировкой на звукопередачу по элементам каркаса.

Постановка задач прохождения звука через сложные многослойные ограждающие конструкции со звукопроводными элементами, связывающими конструктивные слои возможна на основе энергетического подхода, путем записи уравнений баланса звуковой энергии и решения частных задач на основе волновой теории. Такой подход применяется и для решения наиболее сложных задач расчета уровней звукового давления в смежных и удаленных помещениях с учетом структурной звукопередачи. В отечественной практике снижение структурного шума достигается конструктивными рекомендациями в СП 51 и СП 275. Вместе с тем, современные здания имеют конструктивные особенности, которые являются причиной преобладающей структурной звукопередачи. Например, в зданиях с безригельным каркасом, массивной плитой перекрытия и легкими обшивными или легкобетонными перегородками звукопередача по массивной плите перекрытия преобладает по сравнению с энергией звука, проходящей через легкую перегородку, поэтому измеренная звукоизоляция перегородки в таком здании оказывается на 4...6 дБ ниже, чем при измерениях в лабораторных условиях реверберационных камер, где нет структурной звукопередачи.

Как видим, решение ряда задач расчета звукоизоляции требует моделирования прохождения звуковой энергии по нескольким путям звукопередачи и с учетом многовариантности конструктивных решений ограждающих конструкций, их положения в планировочной и конструктивной системе здания. В этом направлении, на наш взгляд, и должна развиваться методология расчета и проектирования звукоизоляции. За рубежом для этой цели широко применяется методология СЭА – статистического энергетического анализа. Однако, сама теория СЭА основана на статистических принципах распределения энергии в элементах расчетной виброакустической системы пропорционально плотности (числу) мод собственных колебаний в связанных конструктивных элементах и помещениях. Поэтому СЭА позволяет записать уравнения энергетического баланса только для потоков резонансной энергии, т.е. энергии мод собственных колебаний в рассматриваемой полосе частот. Учет потоков энергии вынужденных колебаний, т.е. нерезонансной энергии, является актуальной задачей, особенно для расчетов звукоизоляции легких конструкций, для которых нерезонансная звукопередача преобладает практически во всем диапазоне частот.

2. Модели и методы

Постановка задачи вычисления энергии структурного звука, а затем и уровней звука в помещениях выполнена В. Вестфалем [20], записавшим систему уравнений баланса

нерезонансной звуковой энергии в здании через коэффициенты энергетической связи. М. Крокер и А. Прайс предложили использовать методологию СЭА для формирования уравнений баланса звуковой энергии в расчетах звукопередачи [21]. С точки зрения вычислений, особенность СЭА, отличающая его от поточно-энергетического метода, заключается в соотношении коэффициентов энергетической связи и плотности мод колебаний двух связанных элементов виброакустической системы:

$$\eta_{1,2} \cdot n_1 = \eta_{2,1} \cdot n_2, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – плотности мод собственных колебаний связанных элементов системы (панели и помещения; панели и панели)

$\eta_{1,2}$ и $\eta_{2,1}$ – коэффициенты энергетической связи от первого элемента ко второму и наоборот.

Поскольку метод СЭА рассматривает только резонансную звукопередачу, М. Крокер и А. Прайс предложили дополнительную связь непосредственно между помещениями, вычисляемую через коэффициенты нерезонансного прохождения звука τ_f через ограждающую конструкцию. Впоследствии этим приемом пользовались многие исследователи, особенно подробно он описан в работах Р. Крэйка [22 и др.].

На примере наиболее простой виброакустической системы, состоящей из двух смежных помещений и разделяющей их панели перегородки (рис. 1) покажем энергетические связи передачи энергии звука по модели М. Крокера и А. Прайса. В первом помещении с индексом I имеется энергия звука E_I за счет притока от источника с мощностью W_I , часть этой энергии теряется на звукопоглощение W_{Id} , а другая часть в форме резонансной звукопередачи передается панели $W_{I,1}$, а в форме нерезонансной звукопередачи $W_{I,II}$ передается непосредственно в смежное помещение с индексом II . При этом панель 1 имеет приток и отток энергии только в форме резонансной звукопередачи, что, очевидно, не вполне корректно. Нумерация арабскими и римскими цифрами принята для того, чтобы различать конструкции и помещения в более сложных расчетных виброакустических системах.

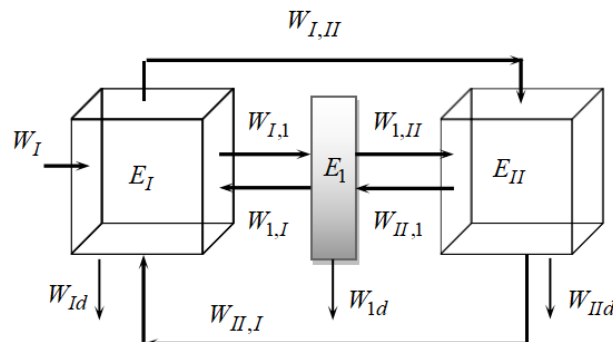


Рисунок 1 – Схема энергетического обмена между двумя помещениями и перегородкой

Уравнения энергетического баланса за цикл колебаний для каждого из трех элементов виброакустической системы при возбуждении только помещения I запишем, через коэффициенты энергетической связи:

$$W_I = \omega \cdot (\eta_{Id} + \eta_{I,1} + \eta_{I,II}) \cdot E_I - \omega \cdot \eta_{1,I} \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{II,I} \cdot E_{II}, \quad (2)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{II,d} + \eta_{II,I} + \eta_{II,1}) \cdot E_{II} - \omega \cdot \eta_{1,II} \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,II} \cdot E_I, \quad (3)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{1,d} + \eta_{1,I} + \eta_{1,II}) \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,1} \cdot E_I - \omega \cdot \eta_{II,1} \cdot E_{II}. \quad (4)$$

В этой системе уравнений особое значение имеет нерезонансная звукопередача в приемное помещение:

$$\eta_{I,II} = \frac{c_0 \cdot S \cdot \tau_f}{8\pi \cdot f \cdot V_I}, \quad (5)$$

Коэффициент нерезонансной звукопередачи для однослойной панели τ_f можем определить по известным формулам Sewell K.B., Josse, R., Lamure J. через коэффициент излучения вынужденных волн σ_f . В работе [23] показано решение задачи о резонансном и нерезонансном прохождении звука через однослойную стеклянную пластину размерами 1,0x1,0 м, толщиной 4 мм между двумя реверберационными камерами с объемами $V_I=30,04 \text{ м}^3$ и $V_{II}=34,29 \text{ м}^3$. Показано, что учет только резонансной звукопередачи (отсутствие последних членов в первом и втором уравнениях) приводит к занижению уровней звукового давления в изолируемом помещении до 7 дБ. Расчетный уровень звука в приемном помещении с учетом нерезонансной звукопередачи хорошо сходится с результатами измерений. Однако, о результатах расчета по формулам (2...4) и измерения виброускорения нельзя сказать, что они хорошо сходятся вследствие того, что вынужденная звукопередача описана, минуя панель.

Для решения этой проблемы запишем уравнения баланса элементов виброакустической системы иначе, через коэффициенты нерезонансной и резонансной энергетической связи. В этом случае расчетная схема будет выглядеть как на рис. 2.

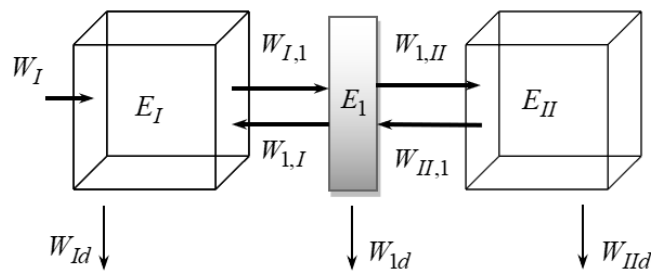


Рисунок 2 – Схема энергетического обмена между двумя помещениями и перегородкой. Резонансная и нерезонансная звукопередача происходит через перегородку

Полагаем, что все элементы виброакустической системы совершают как вынужденные (нерезонансные) так и собственные (резонансные) колебания, тогда и коэффициенты энергетической связи между элементами системы будем считать, как сумму нерезонансных и резонансных коэффициентов, например, $\eta_{1,II} = \eta_{1,II}^f + \eta_{1,II}^r$. Пренебрегая обратными потоками энергии, которые много меньше прямых потоков от помещения с источником звука, можем записать уравнения энергетического баланса для каждого из трех элементов виброакустической системы при возбуждении помещения I, через коэффициенты нерезонансной и резонансной энергетической связи за цикл колебаний:

$$W_I = \omega \cdot (\eta_{Id} + \eta_{I,1}^f + \eta_{I,1}^r) \cdot E_I, \quad (6)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{II,d} + \eta_{II,1}^f + \eta_{II,1}^r) \cdot E_{II} - \omega \cdot (\eta_{1,II}^f + \eta_{1,II}^r) \cdot E_1, \quad (7)$$

$$0 = \omega \cdot (\eta_{1d} + \eta_{1,I}^f + \eta_{1,I}^r + \eta_{1,II}^f + \eta_{1,II}^r) \cdot E_1 - \omega \cdot (\eta_{I,1}^f + \eta_{I,1}^r) \cdot E_I, \quad (8)$$

В уравнениях (5...7) суммы в скобках представляют собой коэффициенты полных потерь в помещениях:

$$\eta_I = \eta_{Id} + \eta_{I,1}^f + \eta_{I,1}^r,$$

$$\eta_{II} = \eta_{II,d} + \eta_{II,1}^f + \eta_{II,1}^r$$

и в панели:

$$\eta_1 = \eta_{1d} + \eta_{1,I}^f + \eta_{1,I}^r + \eta_{1,II}^f + \eta_{1,II}^r.$$

Эти коэффициенты общих потерь могут быть определены из измерения времени реверберации или расчетом.

Важным обстоятельством для упрощения вычисления является допущение о том, что нерезонансная звукопередача преобладает в диапазоне до критической частоты $f < f_c$, а

резонансная звукопередача – на частотах преимущественно выше $f > f_c$. Поэтому уравнения (6...8) для нерезонансной звукопередачи можем записать:

$$W_I = \omega \cdot \eta_I \cdot E_I, \quad (9)$$

$$0 = \omega \cdot \eta_{II} \cdot E_{II} - \omega \cdot \eta_{I,II}^f \cdot E_I, \quad (10)$$

$$0 = \omega \cdot \eta_1 \cdot E_1 - \omega \cdot \eta_{I,1}^f \cdot E_I. \quad (11)$$

Из последнего уравнения получим коэффициент энергетической связи от помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^f = \frac{E_1}{E_I} \cdot \eta_1. \quad (12)$$

Заметим, что в СЭА этот коэффициент определяется только обратным вычислением через соотношение плотностей мод колебаний по формуле (1).

Теперь воспользуемся известными формулами для выражения энергии в элементах системы через параметры их колебаний [24]. В помещении, возбуждаемом источником звука, возникает потенциальная энергия, пропорциональная среднеквадратичному значению звукового давления $\langle p_I^2 \rangle$:

$$E_I = \frac{\langle p_I^2 \rangle \cdot V_I}{\rho \cdot c^2}. \quad (13)$$

где V_I – объем помещения с источником звука;

ρ – плотность воздуха;

c – скорость звука в воздухе.

Кинетическую энергию изгибных колебаний пластины можем записать через среднеквадратичное значение виброскорости $\langle v_1^2 \rangle$:

$$E_1 = m_1 \cdot S_1 \cdot \langle v_1^2 \rangle, \quad (14)$$

где $m_1 = \rho_1 \cdot h_1$ – поверхностная масса панели;

S_1 – площадь панели.

При возбуждении панели из воздушного объема помещения колебательная скорость панели зависит от ее импеданса:

$$\langle v_1^2 \rangle = \frac{2 \cdot \langle p_I^2 \rangle}{|Z_w|^2}. \quad (15)$$

Тогда энергию изгибных колебаний в панели можем записать:

$$E_1 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot S_1 \cdot \langle p_I^2 \rangle}{|Z_w|^2}, \quad (16)$$

Подставив (13) и (16) в выражение (12), получим формулу для определения коэффициента нерезонансной энергетической связи от объема помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^f = \frac{2 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot m_1 \cdot S_1}{|Z_w|^2 \cdot V_I} \cdot \eta_1, \quad (17)$$

или выразив импеданс панели простейшей зависимостью $|Z_w|^2 = (\omega \cdot m_1)^2$, как импеданс массы получим:

$$\eta_{I,1}^f = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_1}{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_1 \cdot V_I} \cdot \eta_1, \quad (18)$$

Однако в расчетах следует принять импеданс панели с учетом изгибной жесткости и потерь [24]:

$$|Z_w|^2 = \left((1 + \eta_1) \cdot m_1 \cdot \omega + \frac{B_1}{\omega} \cdot \left(\frac{\omega}{c} \right)^4 \right)^2 \quad (19)$$

Данный подход может быть использован и для расчетов нерезонансной передачи звуковой энергии из одной пластины в другую в расчетах структурной звукопередачи, если подставлять импедансы конструкции [24, 25], соответствующие типу колебаний.

Коэффициент энергетической связи панели и помещения при вынужденных колебаниях выразим отношением энергии в пластине к излучаемой в помещение мощности:

$$\omega \cdot \eta_{1,II}^f \cdot E_1 = W_{изл}^f \quad (20)$$

Излучаемая пластиной мощность:

$$W_{изл}^f = \rho \cdot c \cdot S_1 \cdot \langle v_1^2 \rangle \cdot \sigma^f \quad (21)$$

Тогда, с учетом формулы (14) получим:

$$\eta_{1,II}^f = \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1} \cdot \sigma^f \quad (22)$$

Резонансные коэффициенты энергетической связи запишем известными формулами [23] от панели 1 к помещению II:

$$\eta_{1,II}^r = \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1} \cdot \sigma^r \quad (23)$$

Коэффициент резонансной энергетической связи от помещения I к панели 1 получим, используя соотношение (1) и значения плотности мод колебаний в панели и в объеме помещения в единичной полосе круговых частот:

$$n_1 = \frac{S_1 \cdot f_c}{2 \cdot c^2} \quad (24)$$

$$n_I = \frac{2 \cdot f^2 \cdot V_I}{c^3} \quad (25)$$

Тогда получим коэффициент резонансной связи от помещения к панели:

$$\eta_{I,1}^r = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_1 \cdot f_c}{8 \cdot \pi \cdot f^3 \cdot m_1 \cdot V_I} \cdot \sigma^r \quad (26)$$

3. Результаты исследования и их анализ

Для проверки сходимости результатов расчета с учетом нерезонансной и резонансной звукопередачи непосредственно через панель по предлагаемым формулам расчета коэффициентов энергетической связи, выполним измерения в третьоктавных полосах частот от 100 до 3150 Гц уровней звукового давления в помещениях реверберационных камер L_I и L_{II} и виброускорений a_1 по 9 точкам на стеклянной панели с размерами 1,0x1,0 м толщиной 0,004 м в проеме между камерами с объемами $V_I=30,04 \text{ м}^3$ и $V_{II}=34,29 \text{ м}^3$.

Определим из измерений уровней звукового давления в помещении I величины подаваемой звуковой мощности в третьоктавах:

$$W_I = \frac{A_I}{4 \cdot 10^{12}} \cdot 10^{0,1 \cdot L_I} \quad (27)$$

Измерениями времени реверберации определим коэффициенты общих потерь η_I и η_{II} в помещениях и эквивалентного звукопоглощения в помещениях камер A_I и A_{II} . Измерениями времени структурной реверберации определим коэффициент общих потерь в пластине η_1 .

Воспользуемся системой уравнений (6 – 8) и, обозначив суммарные коэффициенты энергетической связи $\eta_{1,II} = \eta_{1,II}^f + \eta_{1,II}^r$ и $\eta_{I,1} = \eta_{I,1}^f + \eta_{I,1}^r$, вычислим значения неизвестной энергии в каждом из трех элементов системы:

$$E_I = \frac{W_I}{\omega \cdot \eta_I} \quad (28)$$

$$E_1 = \frac{\eta_{I,1} \cdot E_I}{\eta_1} = \frac{W_I}{\omega} \cdot \frac{\eta_{I,1}}{\eta_1 \cdot \eta_I} \quad (29)$$

$$E_{II} = \frac{\eta_{1,II} \cdot E_1}{\eta_{II}} = \frac{W_I}{\omega} \cdot \frac{\eta_{I,1} \cdot \eta_{1,II}}{\eta_I \cdot \eta_1 \cdot \eta_{II}} \quad (30)$$

Определим и расчетные значения уровней звукового давления в помещениях:

$$L_I = 10 \lg \frac{E_I \cdot c}{10^{-12} \cdot V_I} \quad (31)$$

$$L_{II} = 10 \lg \frac{E_{II} \cdot c}{10^{-12} \cdot V_{II}} \quad (32)$$

и среднеквадратичное виброускорение на стеклянной панели:

$$\langle a_1^2 \rangle = \frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n} = \frac{\omega^2 \cdot E_1}{m_1 \cdot S_1} \quad (33)$$

Результаты расчетов и измерений уровней звукового давления показаны на рисунке 3, виброускорений на панели на рисунке 4.

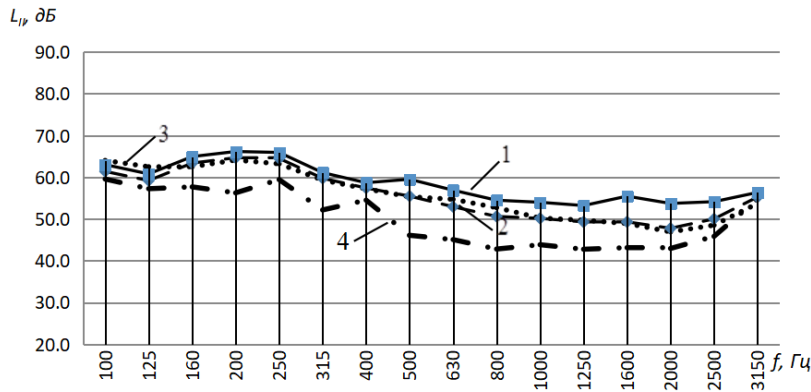


Рисунок 3 – Результаты расчета и измерения уровней шума в камере низкого уровня:

1 – расчет по предлагаемой методике, учитывающей нерезонансную звукопередачу через панель; 2 – расчет по методике М. Крокера и А. Прайса, учитывающей нерезонансную звукопередачу из помещения в помещение; 3 – измеренные уровни шума; 4 – расчет по методике СЭА без учета нерезонансной звукопередачи

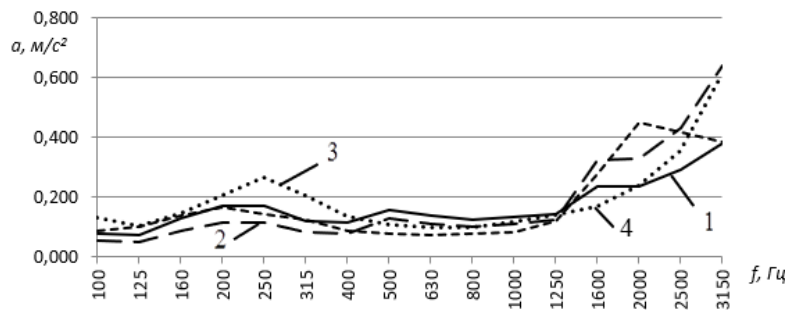


Рисунок 4 – Результаты расчета и измерения виброускорения на стеклянной панели, разделяющей камеру высокого и низкого уровня:

1 – расчет по предлагаемой методике, учитывающей нерезонансное возбуждение панели; 2 – расчет по методике М. Крокера и А. Прайса, учитывающей нерезонансную звукопередачу из помещения в помещение; 3 – измеренные виброускорения лазерным виброметром Polytec RSV-150; 4 – измеренные виброускорения многоканальным виброанализатором ZETLAB

Из рисунка 3 можем видеть, что расчет без учета нерезонансной звукопередачи (линия 4) дает заниженные до 7 дБ уровни шума в изолируемом помещении в различных третьоктавных полосах частот. Наиболее точный результат (линия 2), близкий к результатам измерения (линия 3) дает расчет по методике СЭА с представлением нерезонансной звукопередачи из помещения с источником в изолируемое помещение (методика М. Крокера и А. Прайса). Расчет по методике СЭА с представлением нерезонансной звукопередачи через панель (линия 4) дает хорошую сходимость на низких частотах и несколько завышенные (до 5 дБ) уровни на средних частотах. В данном случае требуются дополнительные исследования для более точного вычисления импеданса возбуждаемой звуком панели, что позволит уточнить предлагаемую методику.

Рисунок 4 демонстрирует достаточно хорошую сходимость результатов расчета по предлагаемой методике (линия 1) и результатов измерения многоканальным виброанализатором ZETLAB (линия 4) и лазерным виброметром Polytec RSV-150 (линия 2). Это позволяет видеть, что расчет энергии изгибных колебаний возбуждаемой звуком панели через импеданс панели дает адекватные результаты, что можно использовать в расчетах более сложных виброакустических систем.

4. Заключение

1. В практике защиты от шума в зданиях существует ряд задач, которые не решить существующими методиками расчета звукоизоляции. Современные конструктивные системы имеют легкие ограждающие конструкции и конструктивные связи, являющиеся звуковыми мостиками. Моделирование распространения звука и вибрации через такие сложные системы требует применения энергетических методов. Наиболее широко в мире применяется метод статистического энергетического анализа (СЭА), который учитывает только резонансную звукопередачу.

2. Передача звуковой энергии происходит в результате распространения вынужденных (нерезонансных) колебаний и излучения звука в результате собственных (резонансных) колебаний конструкций и отклика помещений. В современных конструктивных системах с легкими ограждающими конструкциями практически во всем диапазоне частот преобладает нерезонансная звукопередача. Предложено в уравнения баланса звуковой энергии по СЭА включить нерезонансную звукопередачу от помещения к панелям, что позволяет учесть нерезонансное возбуждение ограждающих конструкций, в отличие от известной методики учета нерезонансной звукопередачи непосредственно от помещения к помещению. Предложены формулы расчета коэффициентов нерезонансной энергетической связи от помещения к панели через вычисление импеданса поперечных колебаний панели с учетом импеданса массы, изгибной жесткости и потерь в панели.

3. Расчет на тестовом примере прохождения звука через однослойное стеклянное ограждение 1,0x1,0 м, толщиной 4 мм показал адекватные результаты, с достаточно хорошей сходимостью с результатами измерений в реверберационных камерах. При формировании сложных виброакустических моделей распространения звука в системах с большим количеством элементов (помещения, панели, конструктивные связи) применение предложенных формул для вычисления коэффициентов нерезонансной энергетической связи позволит учесть нерезонансную звукопередачу по конструкциям.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов Г.Л. Звукоизоляция ограждений с оконными и дверными проемами // В кн.: Вопросы звукоизоляции и архитектурной акустики. По ред. В.Н. Никольского. М. 1959. С.49–87.
- Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций // 2-е издание переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.
- Седов М.С. Звукоизоляция тонких однослойных пластин ограниченных размеров // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1964. № 5. С 130-134
- Седов М.С. Звукоизоляция. Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. СПб: Политехника, 1992. Глава 4. С. 68–106.
- Винокур Р.Ю., Лалаев Э.М. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляционных стеклопакетов // В книге: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП. 1982. с. 62-67.
- Vinokur R. Transmission loss of triple partitions at low frequencies // Appl. Acoust., 1990, 29 (1), pp. 15-24.
- Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation // Applied Acoustics. 2001. Vol.62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)0032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3).
- Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities // European Journal of Mechanics A/Solids. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/euromechsol.2011.14.013>
- Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // Applied Acoustics. 2012. Vol.73, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008>
- Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise // Journal of Building Engineering. 2021.102773. pp. 1-10.
- Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Окна в раздельных переплетах с высокой тепло-звукоизоляцией // Строительные материалы. 2012. № 6. С. 42–43.

12. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукоизоляция однослойных остеклений, одно и двухкамерных стеклопакетов // *Жилищное строительство*. – 2023. – № 12. – С. 12 – 17.
13. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Шубин И.Л. Звукоизоляция многослойных остеклений в раздельных переплетах // *Жилищное строительство* – М., 2024. – № 12. – с. 20-28.
14. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукопередача через ограждения с малыми техническими элементами, включая воздухообменные устройства // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 5. С. 31-43.
15. Caniato M., Bettarello F., Ferluga A., Marsicha L., Schmida C., Faustic P. Acoustic of lightweight timber buildings: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. С. 585–596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>
16. Caniato M., Bettarello F., Granzotto N., Marzi A., Gasparella A. A comprehensive vibroacoustic investigation of a cross laminated timber floor // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 322. 126303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126303>
17. Hongisto V., Alakoivu R., Vitranen J. et al. Sound insulation dataset of 30 wooden and 8 concrete floors tested in laboratory conditions // *Data in Brief*. 2023. Vol. 49. 109393. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109393>
18. Churchill C., Hopkins C. Prediction of airborne sound transmission across a timber–concrete composite floor using Statistical Energy Analysis // *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 110. С. 145–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.031>
19. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. С. 684–691. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142>
20. Westphal W. Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden // *Acustica*. 1957. Vol. 7. С. 335-348.
21. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission through double panels using SEA // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1970. Vol. 47. № 3. Pp. 688-693.
22. Craik R.J.M. Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis // *Applied Acoustics*. 2003. № 64. Pp. 325–341.
23. Овсянников С.Н. Расчет распространения звука методом СЭА с учетом нерезонансной звукопередачи // *Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: материалы XV Международной научно-практической конференции, 12–14 марта 2025 г. Часть 2 / под ред. Т.Ю. Овсянниковой*. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2025. – с. 48-56.
24. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group, LLC. – 2018. – 476 P. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351228206>
25. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. – Springer Verlag, 1973. – 528 p.

REFERENCES

1. Osipov G.L. Sound insulation of fences with window and door openings. In: Nikolsky V.N. (ed.) *Issues of sound insulation and architectural acoustics*. Moscow, 1959. Pp. 49-87. (rus)
2. Zaborov V.I. Theory of sound insulation of enclosing structures. 2nd ed. Moscow: Stroyizdat, 1969. 185 p. (rus)
3. Sedov M.S. Sound insulation of thin single-layer plates of limited dimensions. *Izvestiya VUZov. Stroitelstvo i Arkhitektura*. 1964. No. 5. Pp. 130-134. (rus)
4. Sedov M.S. Sound insulation. In: Ivanov N.I. (ed.) *Technical acoustics of transport vehicles*. St. Petersburg: Polytechnic, 1992. Ch. 4. Pp. 68-106. (rus)
5. Vinokur R.Yu., Lalaev E.M. Theoretical and experimental studies of soundproof double-glazed windows. In: *Combating noise and sound vibration*. Moscow: MDNTP, 1982. Pp. 62-67. (rus)
6. Vinokur R. Transmission loss of triple partitions at low frequencies. *Applied Acoustics*. 1990. Vol. 29. No. 1. Pp. 15-24. DOI: 10.1016/0003-682X(90)90003-4
7. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*. 2001. Vol. 62. Pp. 307-325. DOI: 10.1016/S0003-682X(00)00032-3
8. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30. Pp. 770-782. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2011.04.013
9. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. *Applied Acoustics*. 2012. Vol. 73. Pp. 575-589. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.11.008
10. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J.J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering*. 2021. 102773. Pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.job.2021.102773

11. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Windows in separate bindings with high thermal insulation. *Stroitelnye Materialy*. 2012. No. 6. Pp. 42-43. (rus)
12. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound insulation of single-layer glazing, single and double-glazed windows. *Zhilishchnoe Stroitelstvo*. 2023. No. 12. Pp. 12-17. (rus)
13. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S., Shubin I.L. Sound insulation of multilayer glazing in separate bindings. *Zhilishchnoe Stroitelstvo*. 2024. No. 12. Pp. 20-28. (rus)
14. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound transmission through fences with small technical elements, including air exchange devices. *Stroitelstvo i Rekonstruktsiya*. 2024. No. 5. Pp. 31-43. (rus)
15. Caniato M., Bettarello F., Ferluga A., Marsich L., Schmid C., Fausti P. Acoustic of lightweight timber buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. Pp. 585-596. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.110
16. Caniato M., Bettarello F., Granzotto N., Marzi A., Gasparella A. A comprehensive vibroacoustic investigation of a cross laminated timber floor. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 322. 126303. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126303
17. Hongisto V., Alakoivu R., Vitranen J. et al. Sound insulation dataset of 30 wooden and 8 concrete floors tested in laboratory conditions. *Data in Brief*. 2023. Vol. 49. 109393. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109393
18. Churchill C., Hopkins C. Prediction of airborne sound transmission across a timber-concrete composite floor using Statistical Energy Analysis. *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 110. Pp. 145-159. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.03.031
19. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 684-691. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142
20. Westphal W. Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden. *Acustica*. 1957. Vol. 7. Pp. 335-348.
21. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission through double panels using SEA. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1970. Vol. 47. No. 3. Pp. 688-693. DOI: 10.1121/1.1911939
22. Craik R.J.M. Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis. *Applied Acoustics*. 2003. Vol. 64. Pp. 325-341. DOI: 10.1016/S0003-682X(02)00110-0
23. Ovsyannikov S.N. Calculation of sound propagation by the SEA method, taking into account non-resonant sound transmission. In: Ovsyannikova T.Y. (ed.) Investments, urban planning, technologies as drivers of socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, March 12-14, 2025, Part 2*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University of Architecture and Building, 2025. Pp. 48-56. (rus)
24. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis, 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206
25. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. Springer, 1973. 528 p.

Информация об авторах

Овсянников Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
ФГБУ НИИСФ РААСН, главный научный сотрудник.
E-mail: ovssn@tsuab.ru,

Information about authors

Ovsyannikov Sergey N.

Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia,
Research Institute of Building Physics (NIISF RAASN), Moscow, Russia,
Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department "Architecture of Civil and Industrial Buildings",
Chief Research Scientist,
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 15.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

В.П. СЕЛЯЕВ¹, В.Н. УТКИНА¹, Д.Р. БАБУШКИНА¹, И.В. АРХИПОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»,
г. Саранск, Россия

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА

Аннотация. В представленной статье излагаются результаты экспериментальных исследований, которые служат веским подтверждением выдвинутой гипотезы о фрактальной природе структуры бетона. Авторами работы было установлено, что традиционные методы анализа не в полной мере отражают сложность строения этого композитного материала. Для адекватной и комплексной оценки его структурной неоднородности и присущей ему многомасштабности настоятельно рекомендуется применять математический аппарат фрактальной геометрии. В ходе экспериментов было наглядно продемонстрировано ключевое влияние выявленной структурной неоднородности на механизм разрушения бетонных образцов. Было установлено, что процесс деструкции не является локализованным и одноуровневым; напротив, он носит ярко выраженный многомасштабный характер, что означает его способность развиваться и протекать одновременно на различных структурных уровнях — от макроскопических трещин до микродефектов. В качестве теоретической основы для описания данного сложного процесса в статье предлагаются новые методологические принципы. Эти принципы синтезируют в себе фундаментальные положения механики разрушения и современные подходы фрактальной геометрии, что позволяет создать более полную и адекватную модель прогнозирования поведения бетона под нагрузкой.

Ключевые слова: бетон, фрактал, многомасштабность, инвариантность, разрушение, структура.

V.P. SELYAEV¹, V.N. UTKINA¹, D.R. BABUSHKINA¹, I.V. ARKHIPOV¹¹National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTING THE THEORY OF CONCRETE DESTRUCTION

Abstract. This paper presents the results of experimental studies that provide strong confirmation for the proposed hypothesis on the fractal nature of concrete's structure. The authors established that traditional analysis methods fail to fully capture the complexity of this composite material's architecture. For an adequate and comprehensive assessment of its structural heterogeneity and inherent multi-scale nature, the application of fractal geometry's mathematical framework is strongly recommended. The experiments clearly demonstrated the critical influence of the identified structural heterogeneity on the failure mechanism of concrete specimens. It was found that the fracture process is not localized or single-scale; on the contrary, it is distinctly multi-scale. This means it develops and propagates simultaneously across different structural levels—from macroscopic cracks to micro-defects. As a theoretical basis for describing this complex process, the article proposes new methodological principles. These principles synthesize the fundamental tenets of fracture mechanics with modern approaches of fractal geometry, enabling the development of a complete and more adequate model for predicting the behavior of concrete under load.

Keywords: concrete, fractal, multiscales, invariance, fracture, structure.

1. Введение

Современные теории разрушения бетона до сих пор строятся на гипотезах классической механики деформируемого твердого тела, согласно которым структура бетона представляется в виде сплошной, однородной среды, изменения которой под действием механических нагрузок и внешних воздействий можно описать системой уравнений: физических, геометрических, статических. Разрушение бетона рассматривается как мгновенный акт, который наступает, как только некоторый критерий разрушения достигнет предельного значения. На этих принципах формировались феноменологические механические теории прочности, теории локального предельного соединения. Предполагалось, что разрушение изделия из бетона наступит, как только нормальные или касательные напряжения, относительные деформации достигнут предельных значений.

Многочисленные опытные данные, полученные в результате экспериментальных исследований, наблюдений в процессе эксплуатации конструкций, изделий из бетона не соответствуют механическим теориям прочности.

С учетом новых экспериментальных исследований, накопленного опыта эксплуатации и развития теорий сопротивления материалов внешним воздействиям предлагаются новые методологические принципы построения теории разрушения бетона и металла [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Экспериментально и теоретически установлено: разрушение бетона следует рассматривать как процесс накопления повреждений в объеме изделий в процессе деформирования; разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, который развивается во времени и при этом на разных масштабных уровнях структуры могут действовать несколько механизмов разрушения: хрупкий, пластический, отрывной, сдвиговой. Поэтому при теоретическом обосновании механики разрушения бетона следует учитывать: особенности строения структуры бетона; дискретный характер разрушения, рассматривая разрушение как процесс разделения целого на части с образованием новых поверхностей.

2. Модели и методы

Бетон не является однородным, сплошным, упругим: физически он представляет собой капиллярно-пористый материал, в объеме которого присутствуют все три фазы – твердая, жидкая, газообразная; разрушение сжимаемого образца может произойти вследствие скола или разрыва образца в поперечном направлении; процесс деформирования сопровождается образованием и закрытием микротрещин; на процесс разрушения заметное влияние оказывают силы трения; разрушение структуры может одновременно происходить на разных масштабных уровнях путем реализации как отрывного так и сдвигового механизмов разрушения.

Исходя из изложенного предлагаем при построении модели разрушения бетона следовать принципам:

1. Структура материала неоднородна, многомасштабна, инвариантна формируется из отдельных блоков – фракталов, которые на каждом масштабном уровне отличаются геометрическими размерами, но подобны по строению структуры и физико-химическим свойствам [7, 8, 9, 10].

2. Разрушение – это процесс, развитие которого начинается с разрушения фракталов на микроуровне с последовательным переходом на более высокие смежные уровни, и завершается разделением изделия на отдельные части.

3. При разрушении фракталов необходимо учитывать возможность реализации как сдвигового, так и отрывного механизмов.

4. Для аналитического описания процесса разрушения фракталов на различных масштабных уровнях необходимо применять методы фрактальной геометрии.

5. Разрушение фрактала на определенном масштабном уровне следует описывать методами механики разрушения (модели Гриффитса, Ирвина, Орована, Леонова, Панасюка, Баренблатта и др.) [6, 7, 14].

6. При анализе процесса разрушения структурной системы необходимо рассматривать возможность реализации как отрывного, так и сдвигового механизма разделения изделия на отдельные части.

Многомасштабность и самоподобие (инвариантность) строения структуры бетона

Инвариантность структуры означает, что ее физическое и математическое описание остается неизменным при переходе с одного масштабного уровня на другой.

Экспериментально установлено, что разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, развитие которого происходит одновременно на разных масштабных уровнях структуры и при этом возможна реализация одновременно как отрывного, так и сдвигового механизмов разделения изделий на отдельные части.

Блочно-иерархическое строение структуры бетона рассматривалось в работах Н. И. Карпенко, С. М. Скоробогатова, В. П. Селяева, В. В. Михайлова, О. Я. Берга, В. И. Соломатова, Е. М. Чернышева [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12].

Для решения практических задач предлагается рассматривать три масштабных уровня структуры, которая построена по принципу «Структура в структуре» (В. И. Соломатов), «блок в блоке» (М. А. Садовский) [6, 7, 8].

Естественная фрагментарность строения структуры характерна для горных пород (М. А. Садовский, М. В. Курления, В. Н. Опарин); для бетонов (В. И. Соломатов, С. М. Скоробогатов, Е. М. Чернышов, В. П. Селяев); для металлов (Д. Броек) [3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12].

В результате анализа литературных данных можно утверждать, что современные модели разрушения композиционных материалов (типа металл, бетон, горная порода) предлагается строить, основываясь на предположении о блочно-иерархическом строении структуры; наличии дефектов структуры в виде пор, трещин, раковин, жестких (твердых) включений.

При этом выделяются структурные элементы на трех масштабных уровнях: микро-, мезо- и макроструктуры. Размеры характерного элемента структуры предложены соответственно: для бетона (Н. И. Карпенко) микро - $l_{01} = 0,5 \div 1,5$ мм; мезо - $l_{02} = 10 \div 25$ мм; макро - $l_{03} = 50 \div 200$ мм; для металла (Д. Броек): $l_{01} \leq 500A^0$; $l_{02} \leq 500 \div 5000A^0$; $l_{03} = 0,5 \div 50$ мкм.

Фрактальное строение структуры бетона

Для математического описания многомасштабных неоднородных структур Б. Мандельброт в 1975 г. обосновал принципы построения фрактальной геометрии, основанной на двух аксиомах – о многомасштабности и о самоподобии неупорядоченных, нецельноразмерных, дробных, фрагментарных пространств с размерностью несовпадающей с размерностью Евклидова пространства, в котором они существуют [10].

Под многомасштабностью понимается зависимость измеряемой характеристики N объекта от разрешающего масштаба α измерительного прибора. Число масштабов зависит от количества масштабных уровней измерения и описывается степенной функцией (закон Мандельброта-Ричардсона) вида:

$$N = c(\alpha)^{d-D}, \quad (1)$$

где d – размерность объекта в Евклидовом пространстве ($d = 1, 2, 3$); D – размерность в фрактальном пространстве; c – коэффициент; $1 < D < 2$ или $2 < D < 3$, α – масштабный уровень структуры.

Фрактальные объекты как в целом, так и любые их фрагменты имеют одну и ту же размерность (самоподобны).

В математическом виде это свойство можно выразить функцией вида:

$$\beta N = c(\beta\alpha)^{d-D}, \quad (2)$$

где β – масштабный множитель.

Фрактальное строение структуры бетона характеризуется фрактальной размерностью, численное значение которой не зависит от масштабного уровня структуры и имеет одинаковые размеры при 10-, 20- кратном увеличении масштаба. Численное значение фрактальной размерности зависит от изменения однородности структуры.

Экспериментальные исследования, проведенные Л. М. Ошкиной и Л. И. Куприяшкиной, подтвердили фрактальность строения структуры цементных композитов [12, 13].

На рисунках 1 и 2 показана неоднородность структуры цементного камня, содержащего в качестве наполнителя порошки диатомита. Установлено, что структуры, сформированные из частиц цемента и наполнителя, отвечают принципам фрактальности – многомасштабности и самоподобия. Фрактальные размерности, определенные методами: прямого сканирования; наименьшего размаха; островов подтверждают фрактальность строения структуры материала.

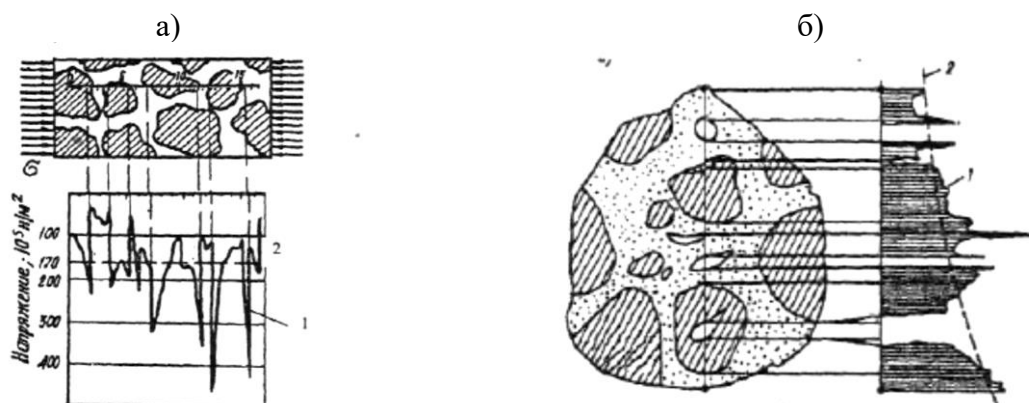


Рисунок 1 – Действительные (1) и осредненные эпюры (2) напряжений в бетоне:
а) по И.М. Грушко; б) по Н.И. Карпенко

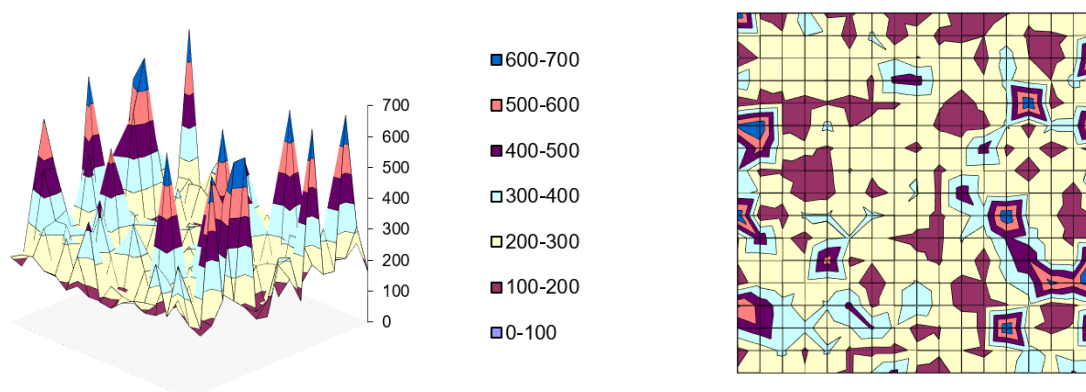


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по поверхности наполненных диатомитом цементных композитов (скорость перемешивания – 360 об/мин, время перемешивания – 40 с)

Фрактальная размерность, определенная по данным о распределении микротвердости в пределах поперечного сечения образцов, не зависит от масштабного уровня структуры (см. табл. 1).

Таблица 1 – Результаты определения фрактальной размерности D наполненных цементных композитов

№ состава	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К-во цеолита (x_1)	20%	10%	10%	13%	17%	10%	10%	17%	13%	13%
Песок/цемент (x_2)	1/1	4/1	1/1	3/1	2/1	2/1	3/1	1/1	1/1	2/1
В/Ц (x_3)	0,6	0,6	0,9	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7
D (увел $\times 10$)	2,03	2,55	2,16	2,20	2,42	2,22	2,20	2,07	2,03	2,13
D (увел $\times 25$)	2,03	2,47	2,24	2,19	2,40	2,20	2,20	2,05	2,02	2,11

Экспериментально установлено, что фрактальная размерность зависит от степени наполнения, скорости и длительности перемешивания композиции в процессе приготовления. Установлена корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности и прочности при сжатии (см. рис. 3).

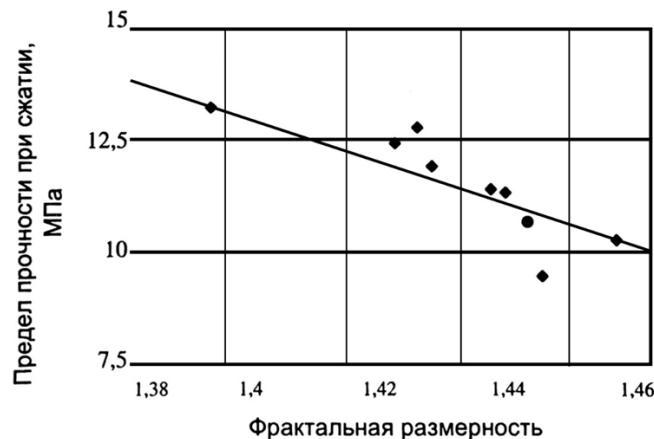


Рисунок 3 – Корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности и прочности при сжатии

3. Результаты исследования и их анализ

Диаграммы деформирования бетона при сжатии с учётом фрактального строения структуры

Фрактальное строение структуры бетона наиболее чётко отражается на диаграммах деформирования, полученных в процессе испытания на сжатие в динамическом (непрерывном) режиме нагружения образцов-призм из цементных композитов.

Испытания проводились на прессе модели 13-PD/401, снабженном программным комплексом WilleGeotechnik, который позволил производить нагружение с постоянной скоростью $v = 0,5$ мм/мин, и фиксировать показания датчиков «сила-перемещение» с частотой $n = 10$ измерений в секунду.

Наиболее характерные диаграммы деформирования приведены на рисунках 4, 5. Испытания в жёстком режиме нагружения позволили зафиксировать дискретность процесса разрушения материала с грубогетерогенной структурой. При нагружении образцов, возникающие напряжения неравномерно распределяются по объёму образца. В зоне контакта матрицы с жёсткими включениями, в области пор и иных дефектов структуры, которые являются концентраторами, возникают напряжения, величина которых превышает предел упругости материала матрицы, развиваются пластические деформации. На диаграмме

деформирования, в некоторых случаях, формируется область, в пределах которой рост деформаций происходит при незначительной величине (почти нулевой, не фиксируемой приборами) приложенных усилий. Подобное явление описано в литературе при анализе результатов испытания кристаллов [15].

Математически это явление можно описать, моделируя процесс разрушения структуры материала с применением методов механики разрушения (Гриффитса) и фрактальной геометрии. Прочность материала на базовом (масштабном) уровне опишем функцией, с учетом закона Мандельброта-Ричардсона:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_0}} \alpha^{d_e - d_m}, \quad (3)$$

где γ – плотность поверхностной энергии; E – модуль упругости материала; l_0 – размер дефекта; α – масштабный уровень структуры; d_e , d_m – размерность по Евклиду, Мандельброту.

Рассмотрим разрушение на микромасштабном уровне β . Тогда формула 3 примет вид:

$$\beta \sigma_\beta = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_0}} (\beta \alpha)^{d_e - d_m} \quad (4)$$

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_0}{\beta} \beta^{0,5(d_e - d_m)}; 1 < d_m < 2 \quad (5)$$

Примем $d_e - d_m = 0,5$, тогда $\sigma_\beta = \frac{\sigma_0}{\beta^{1,25}}$.

Предположим, что $\beta = 0,1$, то $\sigma_\beta \approx 18\sigma_0$.

Следовательно, напряжения на микроуровне структуры ($\beta = 0,1$) будут в 18 раз больше приложенных к образцу. Под действием этих напряжений на уровне микроструктуры развиваются пластические деформации и это отражается на первом участке диаграммы $\sigma - \varepsilon$.

По мере накопления микроповреждений и с ростом уровня напряжений разрушение структуры будет переходить на более высокие масштабные уровни.

На диаграмме деформирования процесс разрушения фракталов выражается в виде цепочки петель сброса и роста нагрузки (см. рис. 4,5). Каждую петлю можно представить в виде диаграммы деформирования фракталов при их разрушении.

Для описания диаграммы деформирования бетона при сжатии с применением фрактальной модели рассмотрим наиболее актуальные, часто применяемые функции Р. Гука, Ф.И. Герстнера, Т.Л. Лукаша, которые имеют вид: $\sigma_0 = E\varepsilon$; $\sigma_\Gamma = \alpha\varepsilon - \beta\varepsilon^2$; $\sigma_\Lambda = \alpha\varepsilon - \beta\varepsilon^3$, где σ – напряжение; E – модуль упругости; ε – относительные деформации; α , β – коэффициенты, определяемые из соответствующих нормируемых показателей.

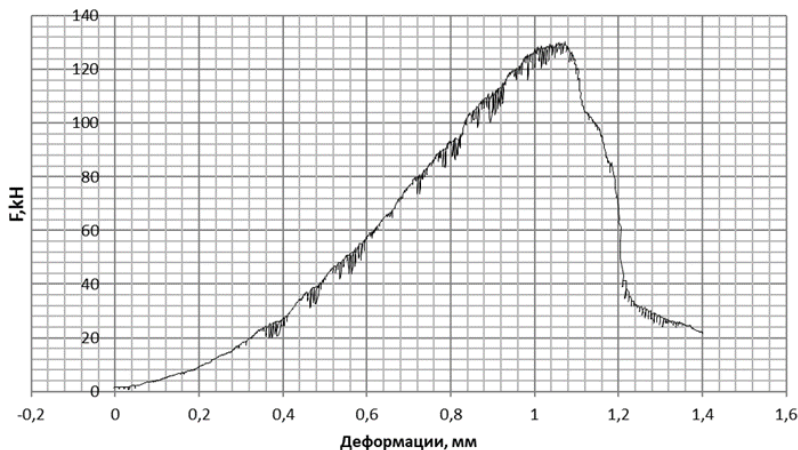


Рисунок 4 – Диаграмма деформирования образца из рядового бетона

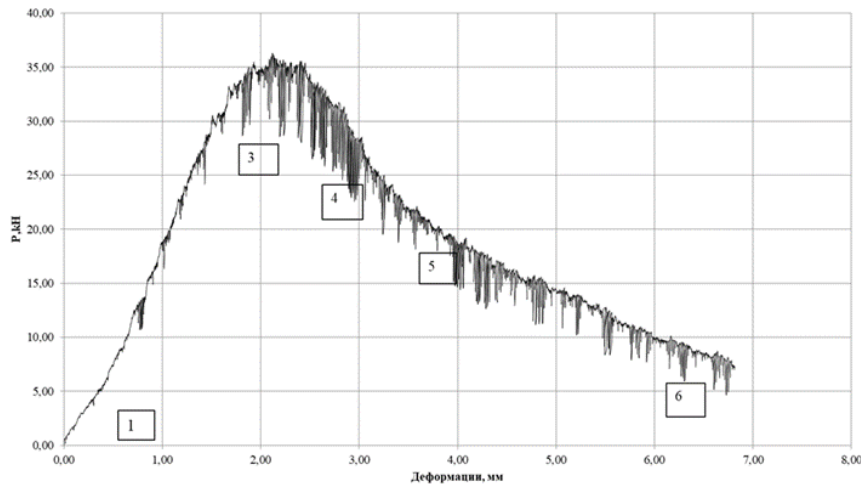


Рисунок 5 – График зависимости нагрузки от деформаций. Образец из туфобетона

Из уравнения $d\sigma/d\varepsilon$ находим α из условия $\varepsilon = 0$ и β из условия $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$, если $d\sigma/d\varepsilon = 0$.

После определения коэффициентов α и β можем записать соответствующие функции:

$$\text{Ф.И. Герстнера} \quad \sigma_r = E_0 \varepsilon (1 - 0,5 \varepsilon / \varepsilon_{bu}) \quad (6)$$

$$\text{П.А. Лукаша} \quad \sigma_l = E_0 \varepsilon \left(1 - \frac{1}{3} \varepsilon^2 / \varepsilon_{bu}^2 \right) \quad (7)$$

Для перехода от записи функции « $\sigma - \varepsilon$ » в общепринятом виде к фрактальной, используем правило перехода, предложенное В.К. Балхановым [16].

На первом этапе рассматриваем закон Гука в виде функции $d\sigma/d\varepsilon = E$. Согласно правилу фрактального преобразования можем записать:

$$d\sigma/d\varepsilon \rightarrow \int \sigma d_D \varepsilon = E. \quad (8)$$

Возьмем от функции (8) фрактальную производную:

$$\left(\frac{d}{d\varepsilon} \right)_D \int \sigma d_D \varepsilon = \left(\frac{d}{d\varepsilon} \right)_D E. \quad (9)$$

Согласно правилам фрактального дифференцирования, получаем:

$$\sigma_D = c^{-1} E \varepsilon^D, \quad (10)$$

где c – множитель, корректирующий масштабный уровень структуры; D – фрактальная размерность ($D < E_p$), которая меньше евклидовой (E_p).

Применяя аналогичные преобразования, получаем:

$$\sigma_{rD} = c_1^{-1} E_0 \varepsilon^D - 0,5 \frac{E_0}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon^{1+D} \cdot c_2^{-1} \quad (11)$$

$$\sigma_{lD} = c_1^{-1} E_0 \varepsilon^D - c_2^{-1} \frac{E_0}{\varepsilon_{bu}^2} \cdot \frac{1}{3} \varepsilon^{2+D} \quad (12)$$

Формулы (10), (11), (12) дают возможность описать диаграммы деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » бетона на разных масштабных уровнях с учетом структурной неоднородности.

4. Заключение

1. Предложены новые принципы построения теории разрушения бетона, основанные на экспериментальных данных о фрактальном строении структуры бетона, её многомасштабности, инвариантности.

2. Предложены аналитические формулы для описания диаграмм деформирования бетона с учётом многомасштабности и инвариантности структурной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Диалектика механики железобетона / В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2002. – №1. – С. 24-27.
2. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва: Стройиздат, 1996. – 412 с.
3. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – Москва: Стройиздат, 1961. – 96 с.
4. Чанышев, А.И. Блочно-иерархическая модель деформирования и разрушения горных пород. Экспериментальная проверка и теоретический анализ / А.И. Чанышев, О.Е. Белоусова // ФТПРПИ. – 2003. – №3. – С. 73-84.
5. Скоробогатов, С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории) / С.М. Скоробогатов. – Екатеринбург: Уральский ГУПС, 2009. – 511 с.
6. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2018. – 220 с.
7. Чернышев, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышев, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж: ГАСУ, 2012. – 224 с.
8. Соломатов, В.И. Теоретические основы создания композитов по принципу образования «Структуры в структуре». В книге Современные строительные композиты и их технология: Проблемы и перспективы развития / В.И. Соломатов, В.П. Селяев и др.; Под ред. В.П. Селяева. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 1994. – 175 с.
9. Садовский, М.А. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко // Физика земли. – 1982. – №12. – С. 3-18.
10. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Бенуа Б. Мандельброт; Пер. с англ. А.Р. Логунова. – Москва: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
11. Курленя, М.В. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядов атомно-ионных радиусов / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1996. – №12. – С. 3-14.
12. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина. – Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2001. – 150 с.
13. Куприяшкина, Л.И. Наполненные цементные композиты: монография / Л.И. Куприяшкина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2007. – 180 с.
14. Griffith, A.A. The theory of rupture // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft. 1924. – P. 55-63.
15. Фелтам, П. Деформация и прочность материалов / Пер. с англ. Н. З. Перцовского; Под ред. М. Г. Лозинского. – Москва: Металлургия, 1968. – 120 с.
16. Балханов, В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / В. К. Балханов; Ин-т физического материаловедения СО РАН. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2013. – 223 с.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M. Dialectics of reinforced concrete mechanics. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2002. No. 1. Pp. 24-27.
2. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 412 p.
3. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat, 1961. 96 p.
4. Chanyshev A.I., Belousova O.E. Block-hierarchical model of deformation and destruction of rocks. Experimental verification and theoretical analysis. *FTPRPI*. 2003. No. 3. Pp. 73-84.
5. Skorobogatov S.M. Disasters and survivability of reinforced concrete structures (classification and elements of theory). Yekaterinburg: Uralsky GUPS, 2009. 511 p.
6. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Physico-chemical foundations of the mechanics of destruction of cement composites. Saransk: Mordovian University Press, 2018. 220 p.
7. Chernyshev E.M., Dyachenko E.I., Makeev A.I. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites. Voronezh: GASU Publ., 2012. 224 p.
8. Solomатов V.I., Selyaev V.P. et al. Theoretical foundations of the creation of composites based on the principle of "Structure within structure" formation. In: *Modern building composites and their technology: Problems and prospects of development*. Ed. by V.P. Selyaev. Saransk: Mordovian University Press, 1994. 175 p.
9. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. On the discreteness property of rocks. *Physics of the earth*. 1982. No. 12. Pp. 3-18.
10. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. Moscow: Institute of Computer Research, 2002. 656 p.
11. Kurlenya M.V., Oparin V.N. On the large-scale factor of the phenomenon of zonal disintegration of rocks and canonical series of atomic-ion radii. *FTPRPI*. 1996. No. 12. Pp. 3-14.

12. Selyaev V.P., Solomatov V.I., Oshkina L.M. Chemical resistance of filled cement composites. Saransk: Ogarev Mordovian State University, 2001. 150 p.
13. Kupriyashkina L.I. Filled cement composites: a monograph. Saransk: Ogarev National Research Mordovian State University, 2007. 180 p.
14. Griffith A.A. The theory of rupture. *Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech.* Delft, 1924. Pp. 55-63.
15. Feltam P. Deformation and strength of materials. Moscow: Metallurgiya Publ., 1968. 120 p.
16. Balkhanov V.K. Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus. Ulan-Ude: Publishing House of BSU, 2013. 223 p.

Информация об авторах:

Селяев Владимир Павлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедры строительных конструкций. E-mail: ntorm80@mail.ru

Уткина Вера Николаевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: uvn27@mail.ru

Бабушкина Дельмира Рафиковна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, аспирант. E-mail: delmira2009@yandex.ru

Архипов Игорь Владимирович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, аспирант. E-mail: arhipov_igor2000@list.ru

Information about authors:

Selyaev Vladimir P.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Head of the Department "Building Structures". E-mail: ntorm80@mail.ru

Utkina Vera N.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Building Structures". E-mail: uvn27@mail.ru

Babushkina Delmira R.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student of the Department of "Building Structures". E-mail: delmira2009@yandex.ru

Arhipov Igor V.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student of the Department of "Building Structures". E-mail: arhipov_igor2000@list.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 19.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

М.Ю. ТРОШИН¹, А.В. КОРОБКО¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ПЕРЕКРЕСТНО КЛЕЕНОЙ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СЕЧЕНИЙ

Аннотация. В статье представлена методика оценки реальной несущей способности перекрытий из древесины перекрёстно клеёной (ДПК) с варьируемыми параметрами сечений. Метод основан на функциональной зависимости между частотой собственных колебаний и максимальным прогибом конструкции, связанной коэффициентом пропорциональности K . Для исследования были испытаны пять типов образцов ДПК плит с различными геометрическими параметрами слоёв: трёхслойные сплошные, с утолщёнными продольными и поперечными слоями, с зазорами в поперечных слоях, а также пятислойная плита. Многослойные плиты были приведены к эквивалентной однослойной ортотропной пластине с использованием эффективных цилиндрических жёсткостей. Расчёт максимального прогиба и нормальных напряжений выполнен по формулам теории пластин и проверен экспериментально. Отклонения расчётных значений прогиба от экспериментальных составили не более 10%, напряжений — не более 13%, что подтверждает высокую точность предложенного метода. Особенностью методики является возможность оценки несущей способности конструкции без знания фактической жёсткости, используя только одну динамическую характеристику — основную частоту собственных колебаний. Это делает метод быстрым, безопасным и экономически эффективным для натурных испытаний. Предложенный подход может быть применён при оценке конструкций по второй группе предельных состояний и в ряде типовых случаев — по первой группе, при условии пренебрежения касательными напряжениями и концентрациями напряжений. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение области применения методики на другие условия опирания и соотношения сторон плит.

Ключевые слова: деревянные конструкции, древесина перекрёстно клеёная, напряженно-деформированное состояние, несущая способность.

M.YU. TROSHIN¹, A.V. KOROBKO¹¹Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

METHOD FOR ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF CROSS-LAMINATED TIMBER FLOOR STRUCTURES WITH VARIABLE SECTION PARAMETERS

Abstract. This paper presents a method for assessing the actual load-bearing capacity and stress-strain state (SSS) of cross-laminated timber (CLT) floor structures with variable section parameters. The method is based on a functional relationship between the natural frequency of oscillations and the maximum deflection of plates, expressed through a proportionality coefficient K . This coefficient remains constant for a given type of support conditions and has been numerically validated for multi-layer orthotropic CLT plates with various geometric configurations. Five different CLT panel types were tested in the study, each with varying layer geometries: three-layer solid sections, thickened longitudinal layers, thickened transverse layers, panels with gaps in transverse layers, and five-layer solid panels. All samples were simply supported along two sides. Natural frequencies, maximum deflections at the center of the structure, and normal stresses along the span under uniformly distributed loads were recorded experimentally. The multi-layer CLT structures were converted into an equivalent single-layer orthotropic plate using effective cylindrical stiffness values.

Calculations of maximum deflection and bending moments were performed using classical plate theory and verified against experimental data. Deflection deviations did not exceed 10%, while normal stress deviations remained within 13% for most cases, confirming high accuracy of the proposed method. A key feature of the method is its ability to assess structural performance without requiring precise knowledge of actual stiffness, relying solely on one dynamic parameter — the fundamental frequency of natural oscillations. This makes the method fast, safe, and cost-effective for field testing. It is particularly suitable for evaluating structures under the second group of limit states and, under certain conditions (e.g., neglecting shear stresses and stress concentrations), can be applied to the first group as well. Further research is recommended to expand the applicability of the method to different support conditions and aspect ratios of CLT panels.

Keywords: timber structures, cross-laminated timber, stress-strain state, load-bearing capacity.

1. Введение

В последние годы в России наблюдается устойчивый рост применения перекрёстно клееной древесины (ДПК, или CLT – от англ. cross-laminated timber) [1] в строительстве, особенно при монтаже перекрытий и стеновых панелей многоэтажных зданий. Этот тренд обусловлен рядом преимуществ древесины как конструкционного материала: высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, экологичностью и возможностью быстрого монтажа [2]. В отличие от традиционных материалов, таких как железобетон и сталь, ДПК сочетает в себе высокую несущую способность и лёгкость, что снижает нагрузку на фундаменты и сокращает сроки строительства.

В России развитие строительства из древесины перекрёстно клееной поддерживается как экологическими инициативами, так и экономическими факторами: доступностью лесных ресурсов и стремлением к всецелому развитию лесного комплекса страны [3]. Кроме того, древесина обладает естественной способностью к аккумуляции избытков углерода из атмосферы, что делает ДПК перспективным материалом в условиях роста запроса на экологически чистое строительство.

Особый интерес представляют перекрытия из древесины перекрёстно клееной в силу их критической роли в строительных конструкциях. В отличие от стеновых панелей, они работают в условиях сложного напряженного состояния, одновременно воспринимая изгибающие, сдвиговые и динамические нагрузки. Это определяет необходимость тщательного расчета их несущей способности и жесткости. При этом, особое значение имеет анализ влияния параметров отдельных слоев на напряженно-деформированное состояние перекрытий из ДПК, так как, меняя геометрические параметры слоев конструкции, можно подобрать наиболее подходящее по несущей способности сечение без излишнего перерасхода материала [4-6].

Ввиду того, что конструкции из ДПК представляют собой многослойные ортотропные плиты (т.е. такие, у которых упругие характеристики вдоль осей различаются), их расчет аналитическим способом является сложной задачей, из-за чего распространенным является подход к расчету с помощью упрощенных схем, в частности, балочной схемы [7-9]. Для более точного учета слоистости материала и разности свойств слоев используется, например, метод конечных элементов. Однако несмотря на высокую точность различных методов расчета, ни один из них не дает точной информации о фактической несущей способности конструкции. Более того, выбор самой расчетной схемы может существенно повлиять на полученные значения интегральных физико-механических характеристик, в следствие чего фактические значения могут существенно отличаться от рассчитанных.

Целью настоящего исследования является разработка методики, дающей удовлетворительную точность в оценке фактического напряженно-деформированного состояния конструкции из ДПК.

2. Модели и методы

Предлагаемая далее методика основывается на функциональной зависимости частоты собственных колебаний и максимального прогиба пластин, связанной через коэффициент пропорциональности K [10]. Данный коэффициент является постоянным для заданного вида условий опирания пластины и применимость закономерности для многослойных ортотропных плит из древесины клееной с различными видами геометрических параметров

численно подтверждена в исследованиях авторов [11-12]. Сама закономерность записывается так [13]: произведение максимального прогиба W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки на квадрат основного тона частоты собственных колебаний ω в ненагруженном состоянии есть величина постоянная с точностью до размерного сомножителя q/t и равняется значению коэффициента пропорциональности K .

Для исследования авторами были испытаны 5 разных образцов плит из ДПК с варьируемыми геометрическими параметрами (таблица 1), шарнирно опертых по двум сторонам, для которых были получены значения основного тона частоты собственных колебаний, максимального прогиба в центре конструкции и нормального напряжения в центре конструкции, направленного вдоль пролета, от действия равномерно распределенной нагрузки. Размеры всех образцов в плане составляли: длина – 2000 мм, ширина всей плиты – 400 мм, ширина ламелей в слоях – 100 мм, толщина ламелей – 10 мм. Материал плиты – сосна. Величина пролета 1900 мм. (рисунок 1). Утолщение слоев достигалось приклеиванием дополнительных слоев ламелей в одном направлении

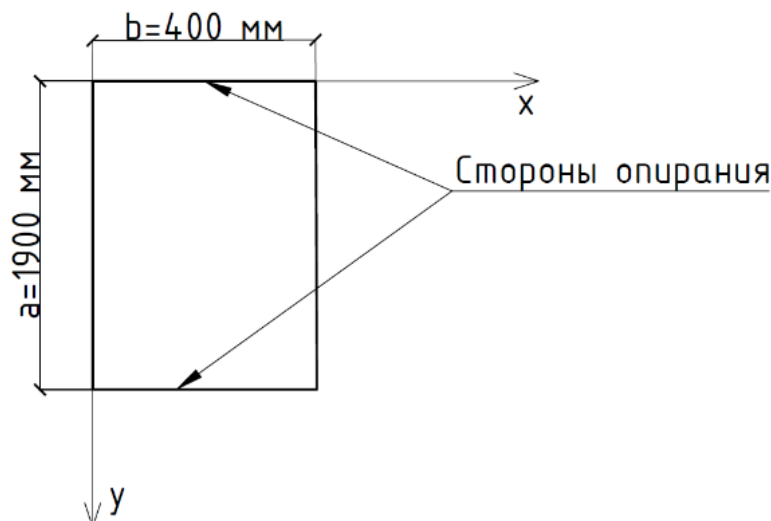
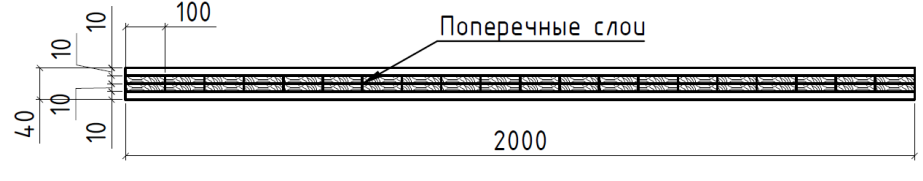
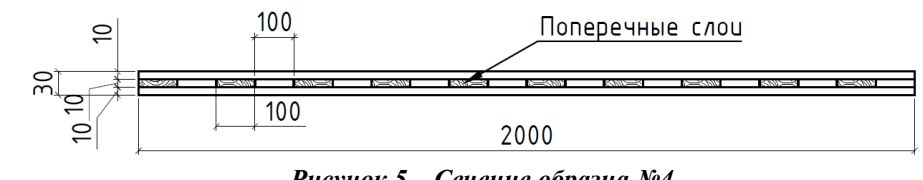
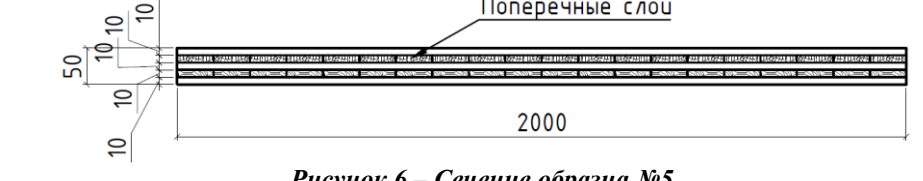


Рисунок 1 – Оси координат рассматриваемых образцов

Таблица 1 – Образцы для испытаний

№ образц а	Тип геометрии	Схема
1	Три слоя, сплошное сечение	Рисунок 2 – Сечение образца №1
2	Три слоя, утолщенные продольные слои	Рисунок 3 – Сечение образца №2

Продолжение Таблицы 1

3	Три слоя, утолщенные поперечные слои	 Рисунок 4 – Сечение образца №3
4	Три слоя, зазоры в поперечном слое	 Рисунок 5 – Сечение образца №4
5	Пять слоев, сплошное сечение	 Рисунок 6 – Сечение образца №5

Упругие характеристики слоям заданы в соответствии с нормативной документацией для выбранного сорта древесины (таблица 2).

Таблица 2 – Упругие характеристики ламелей в слоях

Направление волокон	E_y , кН/м ²	E_x , кН/м ²	G_{xy} , кН/м ²	ν_{xy}	ν_{yx}
Продольное	1×10^7	4×10^5	5×10^5	0,018	0,45
Поперечное	4×10^5	1×10^7	5×10^5	0,45	0,018

Описание методики по оценке реальной несущей способности перекрытий из древесины перекрестно клееной.

1. Необходимо определить частоту собственных колебаний перекрытия, при этом в расчетах используется значение основного тона. В данном исследовании показания снимались с прибора «ВИБРАН-3». По формуле (1) определяется значение круговой частоты:

$$\omega = 2 * \pi * f, \quad (1)$$

где f – техническая частота колебаний, полученная прибором.

2. По формуле (2), выведенной из закономерности, описанной ранее, определяется значение максимального прогиба W_{max} перекрытия:

$$W_{max} = \frac{Kq}{m\omega^2}, \quad (2)$$

где q – рассматриваемая равномерно распределенная нагрузка, кН/м; m – погонная масса конструкции, т/м; ω – частота собственных колебаний, рад/с; K – коэффициент пропорциональности (для рассматриваемого отношения длины пролета к ширине конструкции и заданного условия опирания – 1,26835).

3. Так как речь идет о многослойной плите с ортотропными свойствами как слоев по отдельности, так и всей конструкции в целом, необходимо привести её к однослойной постановке с эффективными значениями цилиндрических жесткостей. Для этого

воспользуемся формулами, предложенными в работе [14]. Положительная оценка применимости данного подхода проведена в работах [15, 16].

Эффективные цилиндрические жесткости однослойной ортотропной пластины $D_x^{eff}, D_y^{eff}, H^{eff}$ определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} D_x^{eff} &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_x^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_x^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_y^{eff} &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_y^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ H^{eff} &= D_1^{eff} + 2D_{xy}^{eff} \\ D_{xy}^{eff} &= \frac{2}{3} \left[G^{n+1} h_{n+1}^3 + \sum_{m=1}^n G^m (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_1^{eff} &= D_x^{eff} \nu_{yx}^{eff} = D_y^{eff} \nu_{xy}^{eff} \\ \nu_{xy}^{eff} &= \frac{2}{3D_y^{eff}} \left[\frac{E_y^{n+1} \nu_{xy}^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m \nu_{xy}^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ \nu_{yx}^{eff} &= \nu_{xy}^{eff} \frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $2n + 1$ — число слоёв (крайние слои имеют номера 1 и $2n + 1$, средний слой имеет номер $n + 1$ — m -й по счету); h — общая толщина пластины; h_1, h_2, h_{n+1} — расстояния от срединной плоскости до границ слоёв (рисунок 7); $E_x^m, E_y^m, \nu_{xy}^m, \nu_{yx}^m, G^m$ — модули Юнга, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига для m -го слоя с номером m .

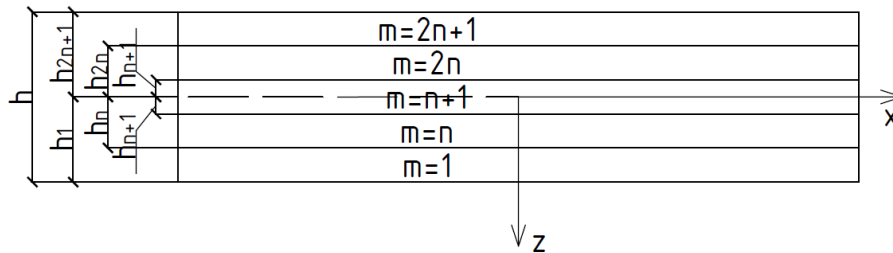


Рисунок 7 - Сечение многослойной пластины

4. В работах [17, 18] рекомендуется вычисление эффективного момента инерции I_{eff} сечения по следующей формуле:

$$I_{eff} = \sum \frac{E_i}{E_{ref}} \frac{b_i t_i^3}{12} + \sum \frac{E_i}{E_{ref}} b_i t_i a_i^2, \quad (4)$$

где E_i — модуль упругости i -го слоя, МПа; E_{ref} — нормировочный модуль упругости (принимается значение модуля упругости вдоль волокон E_0), МПа; b_i — ширина i -го слоя, мм; t_i — толщина слоя, мм; a_i — расстояние от центра тяжести i -го слоя до центра тяжести всего сечения, мм.

Для упрощения расчетов в соответствии с [19] можно не учитывать вклад поперечных слоёв.

5. После приведения многослойной конструкции к однослойной с эффективными цилиндрическими жесткостями $D_x^{eff}, D_y^{eff}, H^{eff}$, по формулам, предложенным для расчета свободно опертой пластины в работах [14, 20], можно вычислить значения максимального прогиба и изгибающих моментов:

$$\left. \begin{aligned} W_{max} &= \alpha \frac{q_0 a^4}{D_y} \\ M_x &= \left(\beta_1 + \beta_2 \nu_{yx}^{eff} \sqrt{\frac{D_x^{eff}}{D_y^{eff}}} \right) \frac{q_0 b^2}{\varepsilon} \\ M_y &= \left(\beta_2 + \beta_1 \nu_{xy}^{eff} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \right) q_0 a^2 \\ \varepsilon &= \frac{a^{1/4}}{b} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставляя формулы, получим:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \left(\beta_1 + \beta_2 \nu_{yx}^{eff} \sqrt{\frac{D_x^{eff}}{D_y^{eff}}} \right) \frac{W_{max} D_y^{eff} b^2}{\alpha a^4 \varepsilon} \\ M_y &= \left(\beta_2 + \beta_1 \nu_{xy}^{eff} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \right) \frac{W_{max} D_y^{eff}}{\alpha a^2} \\ \varepsilon &= \frac{a^{1/4}}{b} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В данном исследовании проверялось только наибольшее значение изгибающего момента M_y . Важно учесть, что в данном случае получается значение погонного изгибающего момента, действующего на 1 м ширины конструкции (Н*мм/мм).

Значения коэффициентов α , β_1 и β_2 определяются в соответствии с таблицей 3. Промежуточные значения находят с помощью интерполяции.

Таблица 3 – Коэффициенты α , β_1 и β_2

ε	α	β_1	β_2
1,0	0,00407	0,03680	0,03680
1,5	0,00772	0,02800	0,07280
2,0	0,01013	0,01740	0,09640
2,5	0,01150	0,00990	0,11000
3,0	0,01282	0,00550	0,11720
5,0	0,01297	0,00040	0,12450
>5	0,01302	0,00000	0,12500

Важно отметить, что в литературе данные формулы и значения коэффициентов приведены для свободно опертой с 4 сторон пластины. Применение данного подхода оправдано и в рассматриваемом случае для двусторонне опертой пластины, так как для значения $\varepsilon > 5$ формулы упростятся до балочной постановки, а при $\varepsilon < 5$ коэффициенты позволят учесть ортотропию конструкции.

6. По значениям изгибающих моментов вычисляются нормальные напряжения (ниже приведена формула для наибольших напряжений σ_y , для σ_x – по аналогии):

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I_x^{eff}} bZ, \quad (7)$$

где M_y – удельный изгибающий момент, Н*мм/мм; I_x^{eff} – эффективный момент инерции, мм⁴; b_i – ширина конструкции, мм; Z – расстояние от нейтральной оси до краевой поверхности плиты, мм.

Максимальный прогиб конструкции измерялся в центре пролета плиты с помощью двух индикаторов часового типа ИЧ-25. Нормальные напряжения в плите измерены с помощью тензометрического метода измерения напряжений, реализованного с использованием тензостанции ZET 017-Т.

3. Результаты исследования и их анализ

Эффективные жесткостные характеристики опытных образцов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Эффективные жесткостные характеристики образцов

№ образца	D_x^{eff} , Н*м	D_y^{eff} , Н*м	ν_{yx}^{eff}	ν_{xy}^{eff}	I_x^{eff} , мм ⁴
1	1714	21877	0,0088	0,0007	866667
2	5007	104211	0,003	0,0001	4133000
3	8603	47317	0,014	0,0026	1877000
4	1714	21877	0,009	0,0007	866667
5	25171	84047	0,075	0,0225	3300000

Экспериментальные данные для всех образцов, а также их сопоставление с результатами, полученными с помощью предложенной методики для разного значения нагрузки, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

№ образца	ω , рад/с	q , кН/м	$W_{max}^{эксп}$, мм	$W_{max}^{метод}$, мм	Отклонение W , %	$\sigma_y^{эксп}$, кН/м ²	$\sigma_y^{метод}$, кН/м ²	Отклонение σ , %
1	106,81	0,136	2,44	2,48	1,65	957,67	999,02	4,32
		0,246	4,83	4,49	-7,55	1966,67	1807,04	-8,83
		0,379	7,15	6,91	-3,45	2923,33	2784,02	-5,00
		0,489	9,45	8,92	-5,97	3850,00	3592,05	-7,18
2	177,81	0,246	1,03	0,94	-9,59	688,67	630,25	-9,27
		0,489	2,02	1,87	-8,12	1403,33	1252,81	-12,01
		0,734	3,02	2,80	-7,69	2126,67	1880,50	-13,09
		0,967	3,97	3,69	-7,45	2803,33	2477,45	-13,15
		1,207	4,80	4,61	-4,09	3480,00	3092,33	-12,54
3	135,09	0,246	2,05	1,98	-3,85	978,33	1009,24	3,16
		0,489	4,10	3,93	-4,32	1963,33	2006,18	2,18
		0,734	6,17	5,89	-4,70	2966,67	3011,32	1,51
		0,967	8,17	7,77	-5,20	3916,67	3967,23	1,29
4	110,58	0,136	2,76	2,77	0,45	1080,00	1114,74	3,22
		0,246	5,49	5,01	-9,60	2146,67	2016,38	-6,07
		0,379	8,22	7,71	-6,60	3206,67	3106,53	-3,12
		0,489	10,36	9,95	-4,08	4226,67	4008,16	-5,17
5	156,45	0,246	1,31	1,26	-4,07	780,00	811,35	4,02
		0,489	2,59	2,50	-3,71	1563,33	1612,80	3,16
		0,734	3,88	3,75	-3,53	2356,67	2420,85	2,72
		0,967	5,11	4,94	-3,47	3113,33	3189,32	2,44
		1,207	6,35	6,16	-3,11	3890,00	3980,88	2,34

Отклонения по максимальным экспериментальным и полученным с помощью расчета прогибам для всех образцов с разными геометрическими параметрами слоев составляют не более 10 %, что свидетельствует о высокой сходимости результатов. Также высокая сходимость результатов получена для нормальных напряжений, так как значение отклонений не превышает 13 %, при этом для большинства образцов отклонения еще ниже (менее 10%).

Несмотря на высокую сходимость экспериментальных и расчетных данных по нормальным напряжениям, стоит учитывать, что оценка напряженного состояния конструкции является более сложной задачей и для реальной оценки иногда необходимо иметь представление о поле напряжений во всей конструкции, а не в одной точке. Кроме того, в ситуациях, когда перекрытие из древесины перекрестно клееной имеет короткий пролет или отношение величины пролета к толщине перекрытия менее 6, важную роль начинают играть тангенциальные напряжения. В связи с этим, оценка по настоящей методике по первой группе предельных состояний является приближенной с точностью $\pm 15\%$ для типовых ситуаций.

Так же важным является факт, что для оценки по второй группе предельных состояний использовано значение коэффициента пропорциональности $K=1,26835$. В случае других условий опирания, например, по 4 сторонам, значение коэффициента будет несколько выше (не более $(4/\pi)^2$) [10]. Получение этого значения является перспективным направлением исследований, позволяющим расширить применимость данной методики.

При уточнениях и проведении большой научно-исследовательской работы с большей выборкой образцов с разными вариантами геометрии слоев и различным отношением сторон, предложенный подход мог бы стать дополнением к ГОСТ Р 57790-2017 «Конструкции деревянные. Методы испытаний на прочность и деформативность».

4. Заключение

1. Результаты настоящего исследования показали высокую сходимость экспериментальных данных и значений, полученных по предложенной методике. Ключевой особенностью методики является высокая точность получаемых значений, в частности, максимально прогиба конструкции перекрытий из древесины перекрестно клееной с различными сечениями при простоте, дешевизне, скорости и безопасности натурных исследований, так как требует нахождения одного динамического параметра – основного тона частоты собственных колебаний конструкции.

2. Рассмотренная методика может быть использована для проверки соответствия перекрытий из древесины перекрестно клееной критериям второй группы предельных состояний, при этом она не требует определения значения фактической жесткости конструкции. Для оценки соответствия критериям первой группы предельных состояний данная методика применима для ряда типовых ситуаций, когда можно пренебречь касательными напряжениями и концентраторами напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56706-2022. Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия.
2. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development // European Journal of Wood and Wood Products. – 2016. – Vol. 74. – № 3. – P. 331–351.
3. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/> (дата обращения: 26.06.2025)
4. Трошин М.Ю., Турков А.В., Заев А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон. // Строительство и реконструкция. — 2024. — № 2. — С. 50-58. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58.
5. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. — 2023. — Т. 18. Вып. 3. — С. 391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400.

6. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Строительство и реконструкция. — 2023. — № 3. — С. 35-41. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41.
7. Karacabeyli E., Gagnon S. Canadian CLT Handbook. Quebec: FPInnovations, 2019. 812 p.
8. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. CLT structures — facts and planning. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 p.
9. Karacabeyli E., Douglas B. CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition. Quebec: FPInnovations, 2013. 572 p.
10. Коробко В. И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Известия вузов. Строительство и архитектура. — 1989. — № 11. — С. 32–36.
11. Трошин М.Ю., Турков А.В. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в 3-хслойной плите из ДПК при переменной величине зазоров в поперечном слое при различных граничных условиях // Строительство и реконструкция. — 2024. — № 4. — С. 56-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-56-63.
12. Трошин М.Ю., Коробко А.В. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из ДПК при изменении шага ламелей в поперечных слоях // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 4 (27). — С. 105-109.
13. Коробко В.И., Коробко А.В. Строительная механика пластинок: Техническая теория. — М. : Спектр, 2010. — 409 с.
14. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. — М., Л. : Гостехиздат, 1947. — 355 с.
15. Глухих В. Н., Кондратьева Л. Н., Корсун В. И., Коваль П. С., Тихомиров Д. В. Исследование экспериментальных данных по изгибу CLT-плит, опертых по четырем сторонам // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15, № 6.
16. Тихомиров Д. В. Расчёт перекрытия из ДПК, опирающегося по четырём сторонам, с применением теории изгиба пластин // Инновации в деревянном строительстве : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. — С. 68–80.
17. Чебыкин А. А., Фрицлер Ю. А., Кудрявцев С. В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2017. — № 2. — С. 83–85.
18. Мамедов Ш. М., Шабикова Е. Г., Нижегородцев Д. В., Казакевич Т. Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины // Вестник гражданских инженеров. — 2020. — № 5(82). — С. 66–71. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71.
19. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
20. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. — М. : Наука, 1966. — 636 с.

REFERENCES

1. Cross-laminated timber panels. General technical specifications. GOST R 56706-2022. (rus)
2. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. Vol. 74. No. 3. Pp. 331-351. DOI: 10.1007/s00107-016-1072-8
3. Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030. Approved by Government Decree No. 312-r dated February 11, 2021. Official internet portal of legal information. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/> (accessed: 26.06.2025). (rus)
4. Troshin M.Yu., Turkov A.V., Zaev A.V. Effect of board spacing in the transverse layer on deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel rigidly clamped on both sides. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 2. Pp. 50-58. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58. (rus)
5. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Influence of thickness of cross and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer cross-laminated timber boards. *Vestnik MGSU*. 2023. Vol. 18. Issue 3. Pp. 391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400. (rus)
6. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Effect of spacing of cross layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-laminated timber boards. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2023. No. 3. Pp. 35-41. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41. (rus)
7. Karacabeyli E., Gagnon S. Canadian CLT Handbook. Quebec: FPInnovations, 2019. 812 p.
8. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. CLT structures - facts and planning. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 p.
9. Karacabeyli E., Douglas B. CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition. Quebec: FPInnovations, 2013. 572 p.
10. Korobko V.I. On a "remarkable" regularity in the theory of elastic plates. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1989. No. 11. Pp. 32-36. (rus)

11. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Relationship between maximum deflection and natural frequency in a three-layer CLT plate with variable gaps in the transverse layer under different boundary conditions. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 4. Pp. 56-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-56-63. (rus)
12. Troshin M.Yu., Korobko A.V. Relationship between maximum deflection and natural frequency in a five-layer CLT plate with varying spacing of lamellas in transverse layers. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2024. No. 4 (27). Pp. 105-109. (rus)
13. Korobko V.I., Korobko A.V. Structural mechanics of plates: Technical theory. Moscow: Spektr, 2010. 409 p. (rus)
14. Lekhnitsky S.G. Anisotropic Plates. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1947. 355 p. (rus)
15. Glukhikh V.N., Kondratyeva L.N., Korsun V.I., Koval' P.S., Tikhomirov D.V. Study of experimental data on bending of CLT panels supported on four sides. *Vestnik evraziyskoy nauki*. 2023. Vol. 15. No. 6. (rus)
16. Tikhomirov D.V. Calculation of CLT floor slab supported on four sides using plate bending theory. *Innovatsii v derevianom stroitel'stve: Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Saint Petersburg: SPbGASU, 2023. Pp. 68-80. (rus)
17. Chebykin A.A., Fritsler Yu.A., Kudriavtsev S.V. Determination of design characteristics of cross-laminated timber panel sections made of crossed boards. *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2017. No. 2. Pp. 83-85. (rus)
18. Mamedov Sh.M., Shabikova E.G., Nizhegorodtsev D.V., Kazakevich T.N. Methodology for calculating cross-laminated timber panels. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020. No. 5(82). Pp. 66-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. (rus)
19. SP 64.13330.2017 Timber Structures. Updated version of SNiP II-25-80. SP 64.13330.2017. (rus)
20. Timoshenko S.P., Voinovsky-Kriger S. Plates and shells. Moscow: Nauka, 1966. 636 p. (rus)

Информация об авторах:

Трошин Михаил Юрьевич

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

E-mail: mtr997@mail.ru

Коробко Андрей Викторович

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

E-mail: ankor.66@mail.ru

Information about authors:

Troshin Mikhail Yu.

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

E-mail: mtr997@mail.ru

Korobko Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: ankor.66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 11.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

ФЁДОРОВ В.С.¹, ЛАЗУТКИН Ю.В.¹, КУПЧИКОВА Н.В.^{1,2}¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОСТИ СОЧЕТАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ НАЗЕМНОГО И ПОДЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. В статье представлено планирование и разработка программы по проведению натурных исследований влияния вибрации на здания и сооружения, возникающие от комплекса динамических воздействий наземного и подземного городского транспорта. Рассмотрена действующая нормативно-правовая база в области транспортной вибрации, проанализированы имеющиеся в практике результаты влияния вибрации от каждого источника воздействия по отдельности (трамвай, автобус, метро) и с комплексным воздействием вибрации (одновременно) от трех видов транспорта. Выявлена закономерность при анализе комплекса динамических воздействий для прогнозирования будущих событий в части раскрытия трещин зданий, находящихся в непосредственной близости к источникам техногенного воздействия. Источниками вибрационного воздействия являются вагоны метро, трамваи и автобусы, расположенные в непосредственной близости от зданий. Для замеров вибрации подобрано специализированное оборудование: анализатор шума и вибрации, регистратор и вибротест. Для выбора натурной площадки и проведения эксперимента проведен анализ загруженности транспортных магистралей наземного и подземного транспорта в Москве. Выбраны три наиболее загруженные территории для одновременного замера вибрации от метро, трамвая и автотранспорта по улицам Краснопрудная, Павелецкая и Бауманская.

Ключевые слова: транспортная вибрация, виды транспорта, метро, трамваи, автотранспорт, план проведения эксперимента, средства механизации, подбор оборудования, трещины в строительных конструкциях.

FEDOROV V.S.¹, LAZUTKIN Yu.V.¹, KUPCHIKOVA N.V.^{1,2}¹Russian University of Transport, Moscow, Russia²National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

PLANNING AN EVALUATION EXPERIMENT EFFECTS OF THE COMPLEXITY OF THE COMBINATION OF DYNAMIC IMPACTS FROM SURFACE AND UNDERGROUND TRANSPORT

Abstract. This article outlines the planning and development of a program for conducting field studies to investigate the impact of vibration on buildings and structures caused by the combined dynamic loads from surface and underground urban transport systems. The existing regulatory framework concerning transportation-induced vibration is reviewed. The paper analyzes available practical data on the vibrational impact from individual sources (tram, bus, metro) as well as the combined effect of simultaneous vibration from all three transport types. An identified correlation from the analysis of the complex dynamic loads allows for predicting future events related to crack propagation in buildings located in immediate proximity to the sources of man-made impact. The sources of vibrational impact are metro trains, trams, and buses operating in close vicinity to the structures. Specialized equipment was selected for vibration measurements: a noise and vibration analyzer, a data recorder, and a vibration test system. To select the field site and conduct the experiment, an analysis of traffic load on surface and underground transport arteries in Moscow was performed. Three areas with the highest traffic load were chosen for simultaneous vibration measurements from the metro, trams, and road transport along Krasnoprudnaya, Paveletskaya, and Baumanskaya streets.

Keywords: transport vibration, modes of transport, metro, trams, motor transport, experimental plan, means of mechanization, selection of equipment, cracks in building structures.

1. Введение

Исследование динамического влияния транспорта на окружающую среду, сооружения и людей является актуальной проблемой с постоянно возрастающей значимостью по нескольким ключевым причинам: рост населения городов приводит к увеличению численности жителей, повышению плотности застройки и, как следствие, возрастанию транспортной нагрузки. Развитие транспортной инфраструктуры, прежде всего строительство новых дорог, железнодорожных линий и метрополитенов, расширяет зону воздействия динамических нагрузок и увеличивает интенсивность движения всех видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, трамвайного, метро). Все эти факторы способствуют росту частоты и амплитуды динамического влияния.

Стоит отметить, что возросшие требования нормативно-правовых документов к комфорту проживания и работы в зданиях (уровень шума, вибрация) делают проблему динамического воздействия транспорта ещё более острой.

Техногенное воздействие транспорта может являться угрозой для исторических зданий и памятников архитектуры, часто расположенных вблизи транспортных магистралей [1]. Например, в Астрахани трамваи убрали из центральной части города в 2008 году, поскольку вибрация разрушала не только памятники архитектуры, но и жилые дома, жители которых жаловались на локальное раскрытие трещин. Разработка эффективных методов защиты исторических зданий от динамического воздействия транспорта является также важной задачей сохранения культурного наследия [2].

Интенсивный рост пиковой загруженности всех типов наземного и подземного транспорта в крупных мегаполисах и городах «миллионниках» на современном этапе ставит перед учёными и специалистами в области оценки воздействия динамических колебаний и исследований кинематики раскрытия трещин в зданиях и сооружениях, новые сложные задачи (рис. 1) [3,4].

Методы исследования комплекса динамических воздействий от городского транспорта на близлежащие здания включают в себя: экспериментальный метод с натурными измерениями вибрации в метро, на фундаменте, в здании и т.д.; теоретический метод с разработкой математической модели распространения вибрации в грунте и здании или развитием существующего аналитического метода; численное моделирование с использованием специального программного обеспечения для моделирования динамического поведения здания под воздействием вибрации от трех видов транспорта и статистический анализ с обработкой данных измерений для выявления закономерностей и зависимостей [5,6].

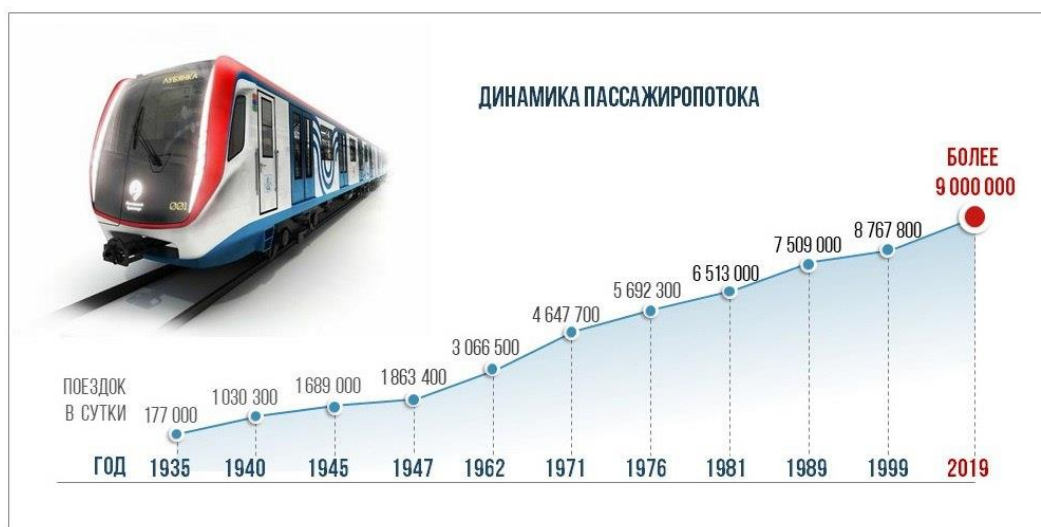


Рисунок 1 - Динамика пассажиропотока

Одним из сложных направлений исследований является оценка влияния комплексности динамических воздействий наземного и подземного городского транспорта в условиях густой застройки территории на раскрытие трещин в несущих строительных конструкциях зданий и сооружений [7,10, 11].

Анализ экспериментальных исследований. По данным [8,9] многочисленных обследований установлено, что вибрация верхнего строения пути, возникающая при движении составов метрополитена, а также наземного железнодорожного рельсового транспорта, передаётся через грунт на фундамент зданий и вызывает в их помещениях вибрацию и структурный шум. Вертикальные вибрации возбуждают, в основном, резонансные колебания перекрытий, а горизонтальные – резонансные колебания стен, что и вызывает структурный шум (гул) в помещениях.

Результаты, представленные в заключениях по инструментальному обследованию колебаний поверхности грунта и прогнозу уровней вибрации и структурного шума в проектируемых многофункциональных комплексах при движении поездов действующей и перспективной линий метрополитена, а также железнодорожных составов на объектах в центре г. Москвы показывают значительное увеличение виброскоростей продольных и поперечных виброволн [10,11].

Анализ напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции показывает, что основное разрушающее воздействие на автомобильную дорогу производят грузовые многоосные автопоезда, движение которых осуществляется с нагрузками, нередко превышающими нормативные.

Вибрации, распространяющиеся от трамвая, движутся по пути с увеличением интенсивности движения экипажей, плотности инфраструктуры сети, а также возрастанием площади городской территории, выделенной для организации транспортных магистралей и транспортно-пересадочных узлов, приводят к значительному увеличению акустического и вибрационного воздействия на объекты транспортной инфраструктуры и окружающей застройки [12,13,15].

Нормативно-правовое обеспечение в данном направлении исследований устанавливает предельно допустимые уровни общей вибрации, общее руководство по измерениям вибрации машин на вращающихся и невращающихся частях и последующей оценке их вибрационного состояния, а также устанавливает метод определения и оценки общей вибрации, которая воздействует на водителя и пассажиров. К таким нормативно-правовым документам относят: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 16.10.2020 №30 «Об утверждении санитарных правил СП 2.5.3650-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры»; ГОСТ Р 55855-2013 «Автомобильные транспортные средства. Методы измерения и оценки общей вибрации»; ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021 «Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство» и др.

Проведённый анализ научной литературы и изучение проблемы влияния транспортной вибрации на фундаменты и строительные конструкции зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния, позволили сформулировать **цель исследования:** *оценка комплексного динамического воздействия на здания и сооружения от наземного (трамвай и автомобили) и подземного (метро) городского транспорта.*

В рамках поставленной цели будут решены следующие **задачи исследования:**

- анализ результатов исследований по данной тематике, опубликованных в научной литературе и подбор виброизмерительного оборудования, предназначенного для измерения виброускорения, виброскорости, размаха виброперемещения для проведения экспериментальных исследований;
- подготовка обосновывающих материалов для определения состава лабораторных измерений в части виброизоляционного воздействия на объекты транспортного комплекса города Москвы;

- проведение измерений уровней вибрации трамвая, автобуса и метрополитена по отдельности и от одновременного прохождения участка тремя видами транспорта;
- оценка влияния вибрации на основания, фундаменты и перекрытия зданий, расположенных в зоне влияния при одновременном прохождении участка тремя видами транспорта с помощью численного моделирования.

Исследования транспортной вибрации авторы научных работ [16-18] рассматривают как действия, генерируемые отдельными видами транспортного движения: автомобильным, трамвайным и железнодорожным - поодиночке и в различных комбинациях; а также воздействие динамических полей в грунте на здания и сооружения, находящиеся в зоне влияния. Действия динамических полей от автомобильного, трамвайного, железнодорожного транспорта и тоннелей метрополитена на подземную часть зданий и сооружений, рассматриваются в основном, как воздействие квазидетерминированного процесса, а для выявления собственных частот колебаний отдельных конструктивных элементов сооружений как откликов на соответствующие воздействия используется спектральный анализ Фурье [18-20].

Основные показатели, характеризующие прохождение динамических волн: доминирующие частоты, виброскорости, виброускорения частиц грунта и зона влияния (рис. 2).

Комплексность динамических воздействий от наземного и подземного транспорта				
	Ж/Д	Трамвай	Авто	Метро
Доминирующие частоты, Гц	10-70	20-45	10-20	30-70
Виброскорость частиц грунта, м/с (Дб)	16-50 (110-120)	16-160 (90-130)	0.005-0.007 (40-65)	16-50 (110-120)
Виброускорение частиц грунта, м/с (Дб)	1-22 (70-97)	0.5-45 (56-130)	0.003-0.011	16-50 (110-120)
Зона влияния, м	150-300	150-300	40-100	40-80
Уровни динамического воздействия на грунты и сооружения				
Низкий Средний Высокий				

Рисунок 2 - Основные показатели, характеризующие прохождение динамических волн и уровни динамического воздействия на грунты и строительные конструкции

В целом, исследования в результате обработки измерений [11,13,14] показывают, что здания, находящиеся в непосредственной близости от напряженных транспортных магистралей, испытывают вибрации, эквивалентные толчкам в сейсмически опасных районах.

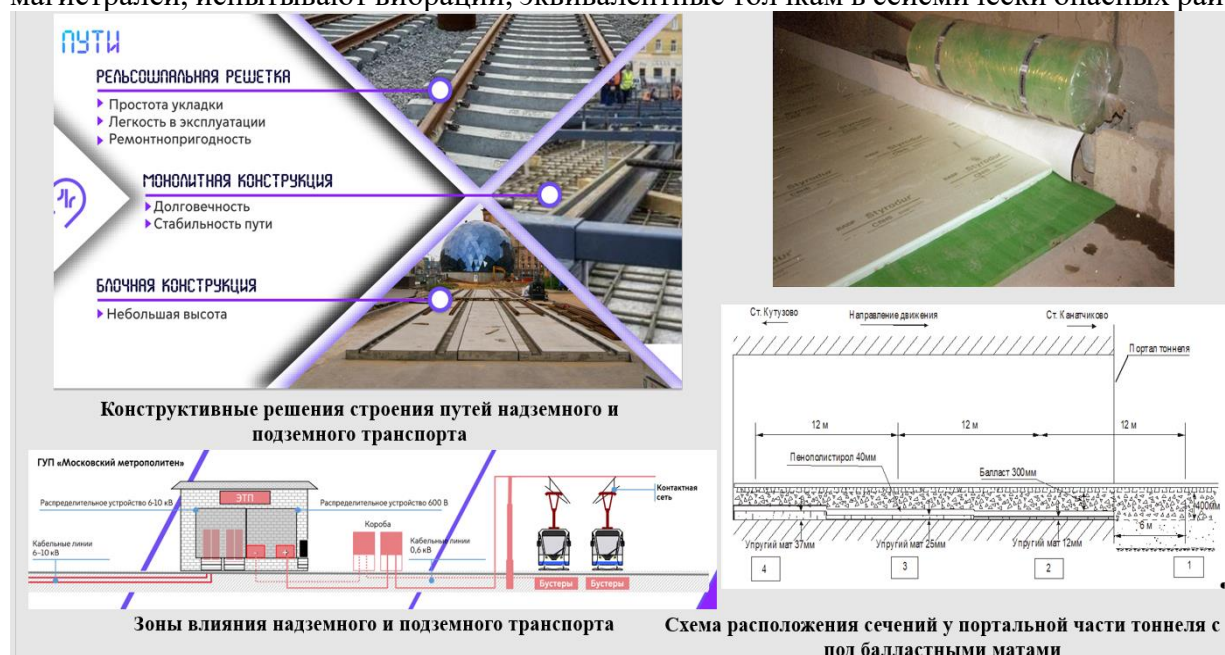


Рисунок 3 - Анализ конструктивно-технологических решений строения пути и оценка вибродемпфирующих материалов для надземного и подземного транспорта

Выполнен анализ конструктивно-технологических решений строений для надземного и подземного транспорта с оценкой применяемых материалов для демпфирования вибраций [10,14,15]. Распространение зон влияния продольных и поперечных волн составляет до 300 метров (рис.3).

Зная искомые величины динамического воздействия со стороны транспортных средств на несущие конструкции расположенных рядом с магистралями зданий и сооружений, нормальные перемещения и ускорения точек фундаментов, стен, перекрытий, цокольных элементов, можно подобрать параметры реальных материалов и конструкций, рекомендуемых для гашения акустической и вибрационной нагрузки.

2. Модели и методы

Для исследований вибрационных нагрузок от городского транспорта в эксперименте будут рассмотрены воздействия трёх видов транспорта - метрополитен, трамваи и автобусы с автомобилями - как наименее исследованное сочетание по комплексной транспортной вибрации в настоящее время.

В плане проведения натурных испытаний будут рассматриваться действия, генерируемые отдельными видами транспортного движения: автомобильным, трамвайным и от метро, как в отдельности, так и в сочетаниях, а также действия динамических полей в грунте на фундаменты и перекрытия, расположенных вблизи зданий и сооружений.

Выполнен подбор специализированного оборудования для проведения эксперимента – это анализатор шума и вибрации, регистратор и вибротест (Рисунок 4).



Рисунок 4 - Подбор специализированного оборудования для проведения эксперимента

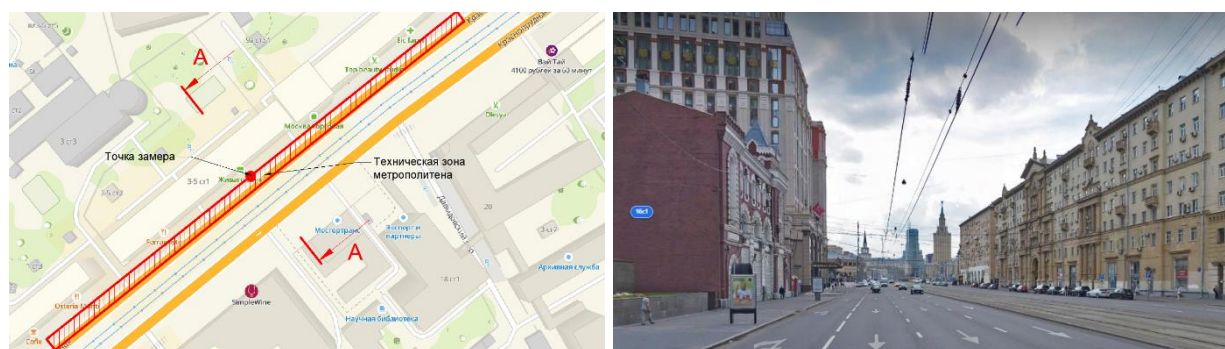


Рисунок 5 - Схема расположения точек замеров вибрации от наземного и подземного транспорта по ул. Краснопрудная

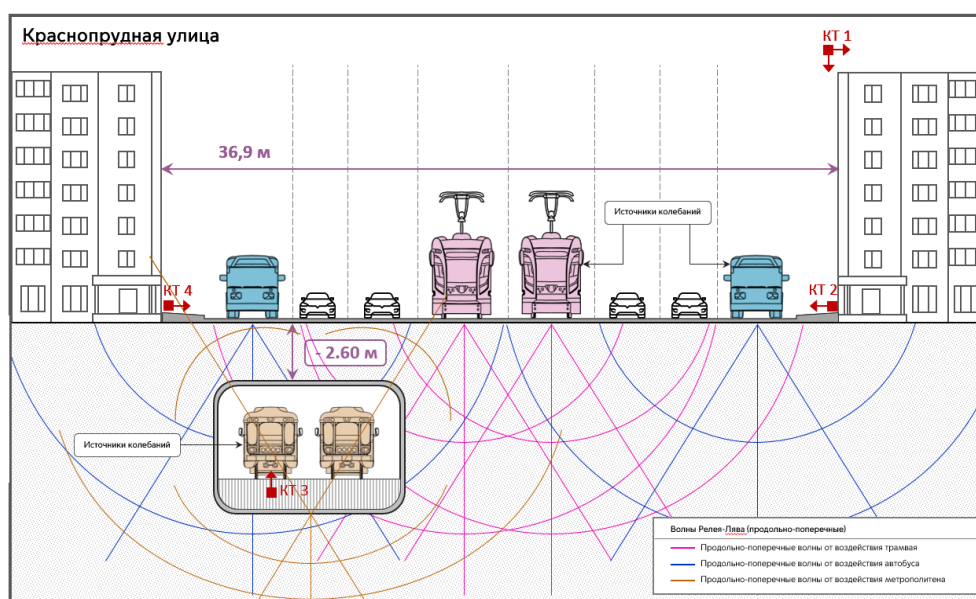


Рисунок 6 - Разрез А – А (для организации программы проведения комплексных натурных исследований по ул. Краснопрудная)

Для выбора натурной площадки и проведения эксперимента был проведён анализ загруженности транспортных магистралей наземного и подземного транспорта в Москве. Были выбраны три наиболее загруженные территории для одновременного замера вибрации от метро, трамвая и автотранспорта по улицам: Краснопрудная, Павелецкая и Бауманская.

Замеры в метро при интенсивности движения на перегоне с 8 до 10 часов утра позволят определить временные пики в тоннеле и визуальное на поверхности зафиксировать движение трамвая и автотранспорта, а затем определить пиковые пересечения для расчета суммарных транспортных вибраций. Проведённый анализ существующих методик прогнозирования транспортной вибрации, показывает, что исходные параметры колебаний, например, обделки тоннелей принимают в соответствии с рекомендациями «ВСН 211-91. Прогнозирование уровней вибрации грунта от движения метропоездов и расчет виброзащитных строительных устройств». Если значения инструментальных измерений вибрации обделок тоннелей метрополитена будут выражены в дБ, то корректируемый уровень определяется по формуле:

$$L_{\text{корр}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{16}}{10}} + 10^{\frac{L_{31,5}}{10}} + 10^{\frac{L_{63}}{10}} \right). \quad (1)$$

Здесь v_R - виброскорость, вызванная волной Рэлея, вычисляемая по формуле

$$v_R = v_{\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{R_0}{H_0}} \cdot \exp(-\beta k_l H_0) \cdot \exp(-\beta k_R x); \quad (2)$$

β - коэффициент затухания в грунте;

$$k_R = \frac{2\pi f}{0.92c_t} \text{ - волновое число волны Рэлея;}$$

Проекция виброскорости, вызванные продольной волной в грунте, вычисляемые по формуле:

$$v_l = \sqrt{\frac{R_0}{\sqrt{x^2 + H_0^2}}} v_{\text{max}} e^{-\beta k_l \sqrt{x^2 + H_0^2}} \quad (3)$$

H_0 - глубина, на которой находится лотковая часть обделки тоннеля;

x - удаление от продольной оси тоннеля;

R_0 - характерный размер, представляющий собой минимальное из $D/2$ и половины ширины тоннеля;

$$k_l = \frac{2\pi f}{c_l} \text{ - волновое число продольной волны в грунте;}$$

v_{max} - максимальная величина виброскорости на лотковой части обделки тоннеля.

При расчетах величин вибрации на поверхности грунта требуется определение следующих параметров грунтовых условий в заданном районе:

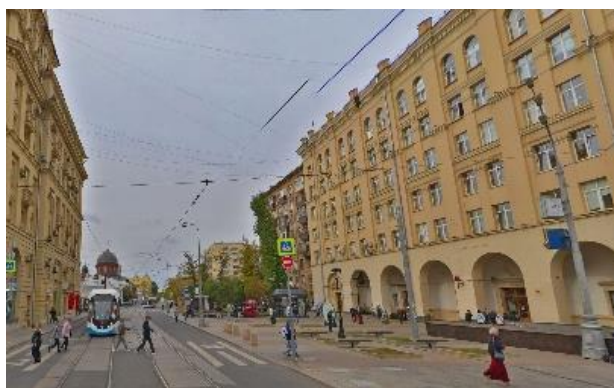
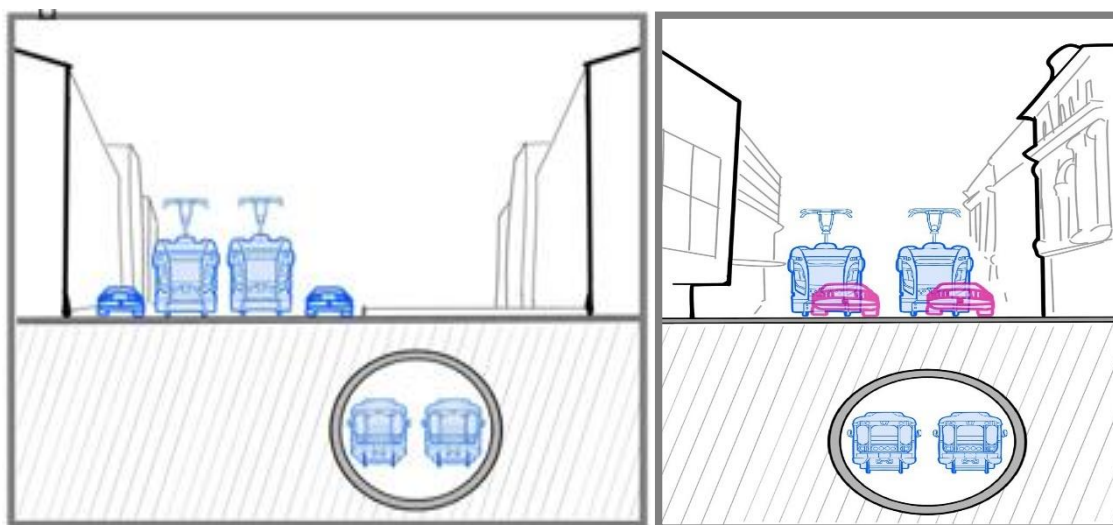
- плотности грунта в каждом слое ρ ;
- коэффициента затухания β в каждом слое.

Если динамические и диссипативные свойства двух соседних слоев отличаются соответственно менее чем в 1,5 и 2 раза, данные слои объединяются в один с общей суммарной толщиной $h=h_1+h_2$ и средними скоростями распространения упругих волн и коэффициента затухания.

3. Результаты исследования и их анализ

Разработана программа проведения комплексных натурных испытаний и определено 5 точек установки оборудования: в метро, на кровле многоэтажных зданий и на фундаменте в подвале.

На первом этапе эксперимент будет проведён по улице Краснопрudная (рис.7). По данному участку проходят восемь маршрутов общественного транспорта; инженерно-геологический разрез на данном участке представлен четырьмя основными слоями: первый - мощностью 4 метра является техногенный, с влажными и водонасыщенными суглинками и супесями; второй - мощностью 2 метра состоит из иловатых глин и суглинков мягко- и тугопластичных, далее следуют водонасыщенные пылеватые мелкие пески с гравием и галькой от 5 до 8.5 м.



а)

б)

Рисунок 7 - Фото и схемы расположения точек замеров вибрации от наземного и подземного транспорта: а – по ул. Павелецкая, б – по ул. Бауманской

На втором этапе проведения натурных испытаний, по результатам, полученным на первом экспериментальном участке транспортной сети, будет скорректирована программа проведения замеров для определения пиковых временных значений показателей при одновременном прохождении трёх видов транспорта на участках улиц Павелецкой и Бауманской.

Сформулирована гипотеза:

- Взаимодействие вибраций, генерируемых одновременно проходящим наземным и подземным транспортом вблизи зданий и сооружений, приводит к частичному увеличению

или уменьшения определенных частот вибрационного спектра, что потенциально необходимо учитывать при проектировании несущей способности фундаментов, так как возможно увеличение негативное воздействие на строительные конструкции.

4. Заключение

1. В рамках поставленной цели и задач исследования по оценке комплексного динамического воздействия на здания и сооружения от наземного (трамвай и автомобили) и подземного (метро) городского транспорта разработана методика проведения испытаний, основанная на действующих нормативных документах по измерению общей вибрации и оценке ее воздействия на человека и конструкцию.

2. Полученные уровни вибрации с корректировкой виброускорений в октавных полосах частот, учитывающих прохождение всех видов транспорта в совокупности и каждого вида в отдельности на трёх экспериментальных участках транспортной сети города Москвы, расположенных по улицам: Краснопрудная, Павелецкая и Бауманская позволят подтвердить предполагаемую научную гипотезу о взаимном гашении виброволн в момент временных пиковых показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золина Т. В. Исследование влияния вибрационных воздействий от автотранспорта на состояние конструкций фундамента жилого здания / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 3(29). – С. 24-29.
2. Территориально-пространственное развитие трамвайной транспортной инфраструктуры Москвы и ее влияние на существующую застройку / В. П. Титов, В. И. Гришин, Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 3(49). – С. 40-49.
3. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации: монография / Е. К. Борисов [и др.]; Камчатский гос. технический ун-т, Профессорский клуб ЮНЕСКО (г. Владивосток). – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2007.
4. Купчикова Н. В. Проектирование радиальных коммуникационных тоннелей при редевелопменте территорий / Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин, Е. Е. Купчиков // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: Материалы VII Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки, Астрахань, 09 февраля 2024 года. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 70-78.
5. Федоров В. С. Об организации опытно-экспериментальной работы в ходе исследования влияния комплексности вибровоздействий наземного и подземного транспорта на здания и сооружения / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 1(47). – С. 95-100.
6. Кузнецов А. Н. Снижение уровня транспортной вибрации в кабинах автотракторных средств за счёт применения инерционных компонентов в подвеске / А. Н. Кузнецов, О. И. Поливаев // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 30 ноября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 61-67.
7. Ванин В. С. Метод использования переходных функций при оценке транспортной вибрации / В. С. Ванин, Т. Е. Галаган // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 3. – С. 32-35.
8. Локтев А. А. Моделирование воздействия городского рельсового транспорта на окружающую застройку / А. А. Локтев, Д. А. Локтев, Л. А. Илларионова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 1. – С. 52-60.
9. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов: современные приборы и оборудование при проведении экспериментальных исследований и геотехнического мониторинга / Н. В. Купчикова, А. С. Таркин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 4(38). – С. 47-55.
10. Ашпиз, Е. С. Применение эластомерных подбалластных матов в тоннеле / Е. С. Ашпиз, Е. Ю. Титов, А. В. Гордеев // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 22-25.
11. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – 105 с.
12. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / N. V. Kupchikova // Building and Reconstruction. – 2019. – No. 6(86). – P. 3-9
13. Фильтрационная устойчивость грунтовых перемычек плотин как временных гидротехнических сооружений / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, С. С. Рекунов, И. В. Федосюк // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 5(115). – С. 44-60.
14. Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО "РЖД" и Российской академией наук / Н. А. Махутов, Б. М. Лапидус, М. М. Гаденин, Е. Ю. Титов // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 7. – С. 6-11.
15. Сычева А. В. Снижение динамического воздействия колеса на рельс применением новой технологии выравнивания рельсовых нитей / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев // Современные проблемы

совершенствования работы железнодорожного транспорта: Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта", 2024. – С. 376-382.

16. Ашпиз Е. С. Применение эластомерных подбалластных матов в тоннеле / Е. С. Ашпиз, Е. Ю. Титов, А. В. Гордеев // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 22-25.

17. Метод сейсмоизоляции и виброизоляции, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций / Е. Н. Курбацкий, Е. Ю. Титов, О. А. Голосова, С. С. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 102-110.

18. Курбацкий Е. Н. Оценка влияния поверхностных слоев грунта на параметры спектров максимальных реакций / Е. Н. Курбацкий, А. Ш. Хуссейн // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2024. – № 1(68). – С. 47-48.

19. Патент № 2696175 С2 Российская Федерация, МПК В60W 10/02, В60W 10/06, В60W 10/11. Способ и система для регулирования шума, вибрации и резкости работы силового агрегата транспортного средства: № 2017143451: заявл. 12.12.2017: опубл. 31.07.2019 / А. Д. Ричардс, А. Н. Бэнкер, А. Й. Карник, Д. Э. Роллингер; заявитель Форд Глобал Текнолоджиз, ЛЛК.

20. Авторское свидетельство № 653146 А1 СССР, МПК В60G 25/00. Устройство для защиты от вибрации пользователя транспортным средством: № 2485281: заявл. 12.05.1977: опубл. 25.03.1979 / Б. Д. Цвик, Е. Я. Улицкий, Т. Г. Цвик; заявитель Всесоюзный ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства.

REFERENCES

1. Zolina T.V., Kupchikova N.V. Research of the Influence of Vibration Effects from Motor Vehicles on the Condition of the Foundation Structures of a Residential Building. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2019. No. 3(29). Pp. 24-29.

2. Titov V.P., Grishin V.I., Kupchikova N.V., Lazutkin Yu.V. Territorial and spatial development of the tram transport infrastructure of Moscow and its influence on the existing development. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2024. No. 3(49). Pp. 40-49.

3. Borisov E.K. [et al.] Experimental dynamics of structures. Monitoring of transport vibration: monograph. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing House of KamchatSTU, 2007.

4. Kupchikova N.V., Lazutkin Yu.V., Kupchikov E.E. Design of Radial Communication Tunnels for Territorial Redevelopment. *Innovative Development of Regions: The Potential of Science and Modern Education: Proceedings of the 7th National Scientific and Practical Conference with International Participation, Dedicated to the Day of Russian Science, Astrakhan, February 9, 2024*. Astrakhan: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 2024. Pp. 70-78.

5. Fedorov V.S., Kupchikova N.V., Lazutkin Yu.V. On the organization of experimental work in the course of the study of the influence of the complexity of vibration effects of ground and underground transport on buildings and structures. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2024. No. 1(47). Pp. 95-100.

6. Kuznetsov A.N., Polivayev O.I. Reducing the level of transport vibration in the cabins of motor vehicles and tractors by using inertial components in the suspension. *Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems, and Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 30, 2023*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2023. Pp. 61-67.

7. Vanin B.S., Galagan T.E. The method of using transition functions in the assessment of transport vibration. *Construction and Road Machinery*. 2007. No. 3. Pp. 32-35.

8. Loktev A.A., Loktev D.A., Illarionova L.A. Modeling the impact of urban rail transport on the surrounding development. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2023. No. 1. Pp. 52-60.

9. Kupchikova N.V., Tarkin A.S. Expertise of Geological Base, Foundations, and Substrates: Modern Instruments and Equipment for Experimental Research and Geotechnical Monitoring. *Engineering Bulletin of the Caspian Region*. 2021. No. 4(38). Pp. 47-55.

10. Ashpiz E.S., Titov E.Yu., Gordeev A.V. Application of elastomeric sub-ballast mats in a tunnel. *Way and Track Maintenance*. 2023. No. 5. Pp. 22-25.

11. Kupchikova N.V. Technology of reconstruction, sanitation and major repairs of buildings, including expertise of geological basis, bases and foundations. Astrakhan: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 2019. 105 p.

12. Kupchikova N.V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group. *Building and Reconstruction*. 2019. No. 6(86). P. 3-9.

13. Fedorov V.S., Kupchikova N.V., Rekunov S.S., Fedosyuk I.V. Filtration stability of dam soil barriers as temporary hydraulic structures. *Construction and Reconstruction*. 2024. No. 5(115). Pp. 44-60.

14. Makhutov N.A., Lapidus B.M., Gadenin M.M., Titov E.Yu. Tasks and Prospects for the Development of Scientific Research within the Framework of Cooperation between Russian Railways and the Russian Academy of Sciences. *Railway Transport*. 2023. No. 7. Pp. 6-11.

15. Sycheva A.V., Loktev A.A., Sychev V.P. Reducing the Dynamic Impact of the Wheel on the Rail by Using a New Technology for Aligning Rail Threads. *Modern Problems of Improving Railway Transport: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Moscow: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport", 2024. Pp. 376-382.

16. Ashpiz E.S., Titov E.Yu., Gordeev A.V. Application of Elastomeric Sub-Ballast Mats in a Tunnel. *Way and Track Maintenance*. 2023. No. 5. Pp. 22-25.
17. Kurbatsky E.N., Titov E.Y., Golosova O.A., Kharitonov S.S. The method of seismic isolation and vibration isolation based on the properties of Fourier images of finite functions. *Academia. Architecture and Construction*. 2020. No. 1. Pp. 102-110.
18. Kurbatsky E.N., Khussein A.Sh. Assessment of the Influence of Surface Soil Layers on the Parameters of Maximum Reaction Spectra. *Natural and Technogenic Risks. Safety of structures*. 2024. No. 1(68). Pp. 47-48.
19. Patent No. 2696175 C2 Russian Federation, IPC B60W 10/02, B60W 10/06, B60W 10/11. Method and system for regulating noise, vibration, and harshness of operation of a vehicle power unit: No. 2017143451: filed on 12.12.2017: published on 31.07.2019 / Richards A.D., Bunker A.N., Karnik A.Y., Rollinger D.E.; applicant: Ford Global Technologies, LLC.
20. USSR Patent No. 653146 A1, IPC B60G 25/00. Device for protecting a vehicle user from vibration: No. 2485281: filed on May 12, 1977: published on March 25, 1979 / Tsvik B.D., Ulitsky E.Ya., Tsvik T.G.; applicant: All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization.

Информация об авторах

Фёдоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ), академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru.

Лазуткин Юрий Викторович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ), аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;

E-mail: lazutkinyv@mtp.mos.ru

Купчикова Наталья Викторовна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ), кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Мытищинский филиал, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство».

E-mail: kupchikova79@mail.ru

Information about authors

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia,
Academician of RAACS, Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Head of the Department "Building Structures, Buildings and Facilities"

E-mail: fvs_skzs@mail.ru.

Lazutkin Yuri V.

Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department "Building Structures, Buildings and Facilities"

E-mail: lazutkinyv@mtp.mos.ru

Kupchikova Natalia V.

Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia,
Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Department "Building Structures, Buildings and Facilities";
Mytishchi Branch of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Department "Industrial and Civil Engineering"

E-mail: kupchikova79@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 19.04.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, И.Ф. АНДРЕЕВ¹

¹Национальный исследовательский московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ ПРИ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ

Аннотация. В статье исследуется влияние коррозии арматурных канатов на усталостную выносливость железобетонных подкрановых балок типа БК 12-7 К7Т. Рассмотрены основные механизмы коррозии, включая хлоридную, карбонизацию бетона и гальваническую коррозию, которые наиболее актуальны для промышленных сооружений. Предложена методика оценки остаточного ресурса балок с учетом потери сечения арматурных канатов, дополненная вероятностной моделью плотности тока коррозии, что повышает точность прогнозирования. Проведены расчеты числа циклов до разрушения для различных степеней коррозии (5%, 10%, 20%), показавшие, что при 20% коррозии ресурс балки сокращается в 2,5 раза. Результаты исследования демонстрируют значительное снижение усталостной долговечности конструкции при увеличении степени коррозии, что подчеркивает необходимость учета коррозионных факторов при проектировании и эксплуатации подкрановых балок. Методика может быть полезна для инженеров и специалистов, занимающихся оценкой состояния и ремонтом промышленных сооружений.

Ключевые слова: подкрановая балка, коррозия, арматурный канат, выносливость, железобетонные конструкции.

T.A. MATSEEVICH¹, I.F. ANDREEV¹

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

ASSESSMENT OF THE ENDURANCE OF A CRANE BEAM IN CORROSION OF REINFORCEMENT ROPES

Abstract. The article examines the effect of corrosion in prestressing strands on the fatigue endurance of reinforced concrete crane beams of type BK 12-7 K7T. The main corrosion mechanisms are discussed, including chloride-induced corrosion, carbonation of concrete, and galvanic corrosion, which are most relevant for industrial structures. A methodology is proposed for assessing the residual service life of beams, taking into account the loss of cross-sectional area in the prestressing strands, supplemented by a probabilistic model of corrosion current density, which improves prediction accuracy. Calculations of the number of cycles to failure were performed for different degrees of corrosion (5%, 10%, 20%), showing that at 20% corrosion, the beam's service life decreases by 2.5 times. The study results demonstrate a significant reduction in fatigue durability with increasing corrosion levels, highlighting the need to account for corrosion factors in the design and operation of crane beams. The proposed methodology can be useful for engineers and specialists involved in condition assessment and repair of industrial structures.

Keywords: overhead crane beam, corrosion, reinforcing rope, endurance, reinforced concrete structures.

1. Введение

Железобетонные подкрановые балки являются критически важными элементами промышленных сооружений, подверженными многократным динамическим нагрузкам и агрессивным воздействиям окружающей среды. Коррозия арматурных канатов значительно снижает их несущую способность и усталостную долговечность [1, 2]. Актуальность данной проблемы подтверждается отказами таких конструкций, что требует разработки новых методов оценки их остаточного ресурса.

Надежность железобетонных подкрановых балок при коррозионном повреждении арматурных канатов требует комплексного учета пространственно-временных факторов деградации. Как показано в работе [3], вероятностные модели, учитывающие неоднородность распределения коррозии и время до первого ремонта, позволяют существенно повысить точность прогнозирования остаточного ресурса конструкций. Работа [4] развивает этот подход, предлагая систему критериев оценки надежности, включая анализ микро- и макроповреждений, что особенно актуально для преднапряженных элементов. В случае многопроволочных канатов типа K1400 [5], ключевым фактором становится корреляция коррозии между отдельными проволоками: локальные повреждения приводят к перераспределению напряжений и прогрессирующему снижению несущей способности даже при малых степенях коррозии (5-10%).

Современные подходы к оценке надежности железобетонных конструкций требуют учета синергетического эффекта от совместного действия механических нагрузок и коррозионных процессов. Как демонстрируют работа [8], численное моделирование работы конструкций в агрессивных средах позволяет выявить критические зоны ускоренной деградации, где коррозия потенцирует развитие трещин при циклических нагрузках. Особое значение это имеет для подкрановых балок, испытывающих динамические воздействия. Методика оценки остаточного срока службы, предложенная в работе [9], объединяет данные мониторинга коррозионных повреждений с прогнозными моделями, что особенно важно для перекрытий промышленных зданий, где локальные повреждения арматуры снижают общий ресурс конструкции на 30-40% даже при визуально незначительных дефектах. Фундаментальные принципы структурной надежности, изложенные в [10], систематизируют эти подходы, подчеркивая необходимость вероятностного анализа для учета неопределенностей в параметрах коррозии и нагрузок. Комбинация этих методов позволяет разрабатывать адаптивные стратегии эксплуатации, минимизирующие риски внезапных отказов.

Агрессивные среды оказывают комплексное негативное воздействие на железобетонные конструкции, значительно ускоряя процессы коррозии и снижая их долговечность. Как отмечено в работе [11], одновременное воздействие механических нагрузок и агрессивных факторов приводит к синергетическому эффекту, при котором прочность бетона и арматуры снижается на 20-30% быстрее, чем при изолированном влиянии этих факторов [12]. Особенно критично это проявляется в мостовых конструкциях [13], где вероятностное моделирование позволяет учесть вариабельность агрессивных воздействий и спрогнозировать зоны наибольшего риска коррозионных повреждений.

Случаи развития коррозии в подкрановой балке. Коррозия арматуры в железобетонных конструкциях развивается вследствие нескольких механизмов.

1. Хлоридная коррозия (доминирующий механизм в промышленных зданиях): проникновение ионов Cl^- из антигололедных реагентов или морской среды, локализация повреждений в зоне растяжения балок.

2. Карбонизация бетона: Реакция CO_2 с гидроксидом кальция (рН снижается до 8-9).

3. Гальваническая коррозия возникает при контакте разнородных металлов. Представляет особую опасность для контактных зон стальных канатов и нержавеющей анкеров.

Согласно работам [6, 7], распространение или рост коррозии обычно выражается в терминах скорости коррозии, r_c , или плотности тока коррозии, i_{corr} в соответствии с соотношением между r_c и i_{corr} . i_{corr} является измерением общего тока, протекающего в потенциостатически контролируемых арматурных стержнях, и, следовательно, измеряются только средние свойства. Поэтому i_{corr} является измерением равномерной или общей коррозии, которая представляет собой приблизительно равномерную потерю металла по всей открытой поверхности арматурной проволоки. Диаметр корродирующего арматурного стержня в момент времени t может быть оценен непосредственно по i_{corr} как

$$D(t) = D_0 - \int r_c dt = D_0 - 0.0232 \int i_{corr} dt. \quad (1)$$

где D_0 первоначальный диаметр арматуры (мм), коэффициент 0.0232 учитывает процесс распространения коррозии со всех сторон арматуры, а $\int r_c dt$ представляет собой рост коррозии в данный момент времени t .

Оценка выносливости нормальных сечений. Кривая усталости, известная также как кривая Веллера, представляет собой фундаментальную зависимость между величиной приложенных напряжений и количеством циклов нагружения, приводящих к разрушению материала. Эта зависимость устанавливается экспериментальным путем и служит основой для оценки усталостной долговечности конструкционных материалов.

Наиболее распространенным методом определения кривой усталости являются испытания на чистый изгиб при симметричном цикле нагружения. Выбор данного вида нагружения обусловлен двумя факторами:

1. Симметричный цикл является наиболее опасным для большинства конструкционных материалов.
2. Экспериментальная реализация такого нагружения технически проще по сравнению с другими видами циклов.

Испытания проводят по следующей методике:

1. К первому образцу прикладывают нагрузку, заведомо превышающей предел выносливости, но ниже предела прочности материала.
2. Для последующих образцов максимальное напряжение постепенно уменьшают.
3. Специальный счетчик фиксирует количество циклов до разрушения каждого образца.

По полученным данным строят график зависимости числа циклов N от максимального напряжения цикла.

Анализ кривой усталости позволяет выявить несколько важных закономерностей:

1. При уменьшении амплитуды напряжений количество циклов до разрушения возрастает по степенному закону
2. Образцы, выдержавшие 10^7 циклов, могут работать неограниченно долго при данном уровне напряжений
3. Для цветных металлов кривая не имеет четкого предела выносливости, поэтому вводится понятие условного предела (при $N=10^8$ циклов)

Пример кривой Веллера представлен на рисунке 1.

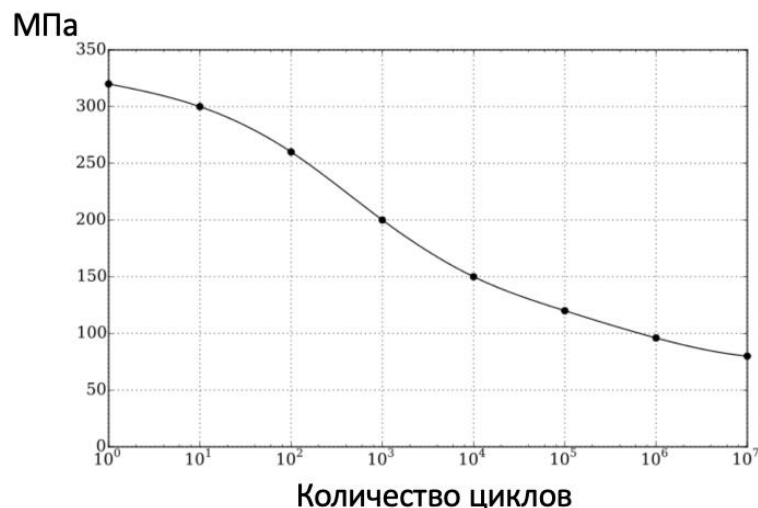


Рисунок 1 – Кривая Веллера для железобетонной конструкции

2. Модели и методы

Перейдем к модели распространения коррозии в арматурном канате в виде:

$$A(t) = A_0 - \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} (d_0 - 0.0232 \int_0^t i_{corr} dt)^2, \quad (2)$$

где A_0 – начальная площадь поперечного сечения арматурного каната, d_0 – диаметр проволоки арматурного каната, n – количество проволок в арматурном канате.

Чтобы разобраться с i_{corr} после начала коррозии, многие исследователи просто рассматривали его как постоянную величину на протяжении всего срока службы конструкции. Однако это предположение может быть неправдоподобным, поскольку как теоретические, так и экспериментальные результаты указывают на то, что i_{corr} увеличивается со временем. Следует подчеркнуть, что для установления реалистичной зависимости между i_{corr} и временем необходимо провести множество измерений в разные моменты времени. Математическое выражение этой изменяющейся во времени модели плотности тока коррозии имеет вид:

$$i_{corr} = a(\Delta t)^{\gamma} = a(t - t_i)^{\gamma}, \quad t \geq t_i, \quad (3)$$

где α и γ – параметры модели. Обратим внимание, что, когда значения i_{corr} измеряются в момент времени t_i , $i=1, \dots, n$, α и γ могут быть определены по этим значениям с помощью нелинейного регрессионного анализа. Эти измеренные данные также могут быть использованы для оценки неопределенности в α и γ :

$$A(t) = \begin{cases} A_0 - \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \left(\frac{0.0232\alpha}{\gamma + 1} (t - t_n)^{\gamma+1} \right)^2, & t \geq t_n \\ A_0, & t \leq t_n \end{cases} \quad (4)$$

Плотность тока коррозии, i_{corr} , представляет собой "мгновенное" значение, поскольку относится к конкретному моменту, в который регистрируется результат измерения. Ее значением до начала коррозии обычно пренебрегают.

Потеря преднапряжения связана с уменьшением площади сечения и релаксацией напряжений в поврежденных проволоках. Формула для оценки потери преднапряжения:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{A(t)}{A_0}\right) + \Delta P_{relax} \quad (5)$$

где P_0 — начальное преднапряжение в канате, $A(t)$ — текущая площадь сечения каната, ΔP_{relax} — дополнительная потеря из-за релаксации напряжений (обычно составляет 5–10% от P_0 при значительной коррозии).

Случаи развития коррозии в растянутой зоне балки представлены на рисунке 2.

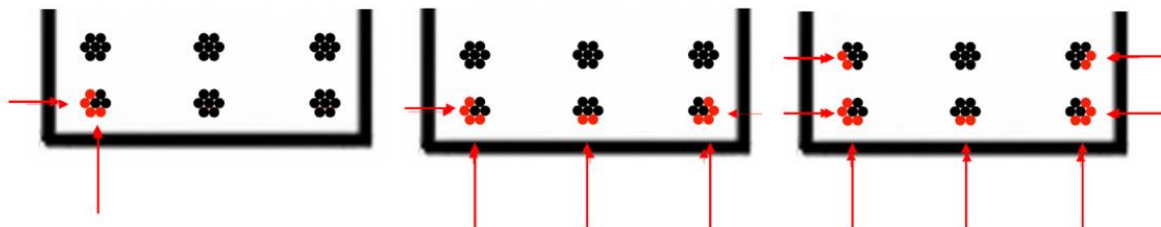
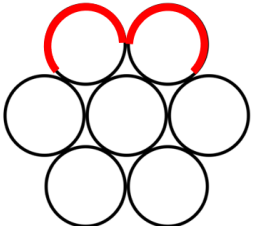
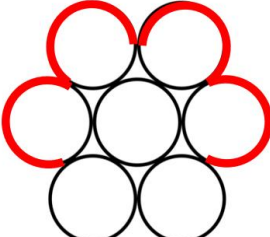


Рисунок 2 – Схемы развития коррозии в канатах в растянутой зоне подкрановой балки

Расчетные показатели потери сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1– Сценарии развития коррозии в арматурном канате.

Случай	Схема	Кол-во повр. проволок	Расчетная площадь сечения каната при заданном проценте коррозии проволоки, мм ²			Потеря преднапряжения, %
			5%	10%	20%	
1		2	147,32	144,9	139,28	0,017, 0,044, 0,071
2		44	144,64	139,28	128,56	0,035, 0,0885, 0,142

3. Результаты исследования и их анализ

Расчет на выносливость произведен для подкрановой балки типа БК 12-7 К7Т. Размеры и сечение представлены на рисунке 3.

На предварительном этапе была заложена площадь поперечного сечения в растянутой зоне $A_{sp} = 900 \text{ мм}^2$ ($6\varnothing 15,7 \text{ К } 1400$), в сжатой зоне $A'_{sp} = 300 \text{ мм}^2$ ($2\varnothing 15,7 \text{ К } 1400$).

Для расчета на выносливость оценим напряжения в бетоне и арматурных канатах от внешней нагрузки с учетом предварительного напряжения [14].

$$\sigma_b = \sigma_{bp} \pm \frac{M * y}{I_{red}}. \quad (6)$$

При отсутствии крановой нагрузки:

$$\sigma_b = 3,67 - \frac{179,7 \cdot 10^6 \cdot 768}{87198 \cdot 10^6} = 2,09 \text{ МПа.} \quad (7)$$

$$\sigma_b = -0,3 + \frac{179,7 \cdot 10^6 \cdot 632}{87198 \cdot 10^6} = 1,01 \text{ МПа.}$$

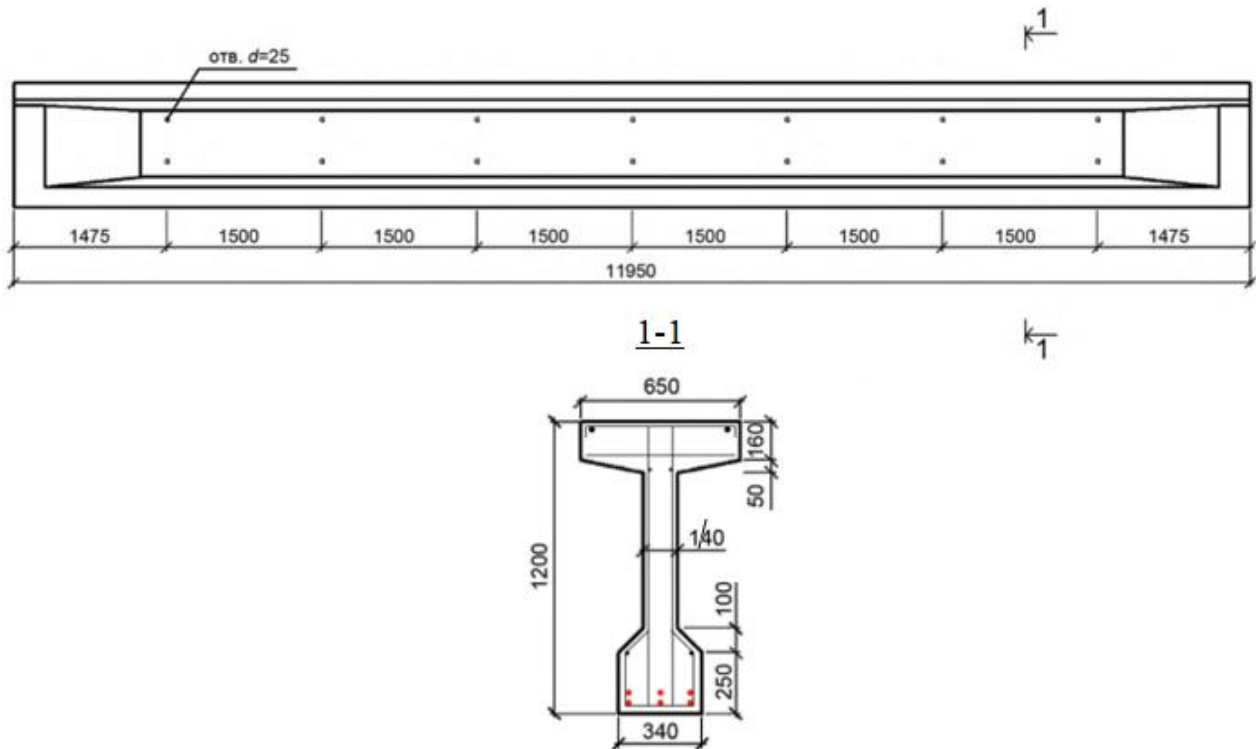


Рисунок 3 – Размеры и сечение подкрановой балки

При действии крановой нагрузки:

$$\sigma_b = 3,67 - \frac{555,4 \cdot 10^6 \cdot 768}{87198 \cdot 10^6} = -1,21 \text{ МПа} \quad (8)$$

$$\sigma_b = -0,3 + \frac{555,4 \cdot 10^6 \cdot 632}{87198 \cdot 10^6} = 3,73 \text{ МПа}$$

Для арматурных канатов:

$$\sigma_s = \sigma_{sp} \pm \alpha' \frac{M * y_{sp}}{I_{red}} \quad (9)$$

Тогда

$$\sigma_{sp,max} = 892 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{sp,min} = 641 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{sp} = \sigma_{sp,max} - \sigma_{sp,min} = 251 \text{ МПа}$$

Оценку числа циклов проведем по методике, предложенной в [15, 16].

$$\Delta\sigma_R = 175 \text{ МПа} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N} \right)^{1/5} \quad (10)$$

Тогда получаем, что $N = 2 \cdot 10^6 \cdot (175/251)^5 \approx 3.2 \cdot 10^5$ циклов.

С учетом развития коррозии в арматурных канатах при 10% и 20% для расчетного случая поражения 3-х канатов, получаем следующие значения:

10% коррозии: $A_{sp} = 80,6 \text{ мм}^2$, $\Delta\sigma_{sp} = 310 \text{ МПа} \rightarrow N \approx 1,2 \cdot 10^5$ циклов

20% коррозии: $A_{sp} = 71,6 \text{ мм}^2$, $\Delta\sigma_{sp} = 349 \text{ МПа} \rightarrow N \approx 6,5 \cdot 10^4$ циклов

Проведенные расчеты и анализ данных позволили выявить закономерности влияния коррозии на усталостную выносливость подкрановых балок типа БК 12-7 К7Т.

1. При потере сечения арматурных канатов на 5%, 10% и 20% наблюдалось прогрессирующее снижение их несущей способности. В частности, при 20% коррозии площадь поперечного сечения канатов уменьшилась с 147,32 мм² до 139,28 мм² (случай 1) и с 144,64 мм² до 128,56 мм² (случай 2), что привело к значительному перераспределению напряжений в конструкции.

2. Расчеты показали, что максимальные напряжения в арматурных канатах при коррозии 20% достигли 892 МПа. При этом размах напряжений ($\Delta\sigma$) составил 251 МПа, что существенно снижает усталостный ресурс конструкции.

3. Использование модифицированной кривой Веллера для поврежденных коррозией канатов позволило установить, что при 10% коррозии число циклов до разрушения сократилось с $3,2 \cdot 10^5$ до $1,8 \cdot 10^5$, а при 20% — до $1,2 \cdot 10^5$. Это свидетельствует о нелинейном характере снижения выносливости при увеличении степени коррозионного повреждения.

5. Полученные значения выносливости (циклов) для корродированных балок не учитываются в существующих нормативных документах. Это указывает на необходимость учета дополнительных коэффициентов запаса при проектировании подкрановых конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

4. Заключение

1. Установлено, что коррозия приводит не только к уменьшению сечения проволок, но и к перераспределению усилий между ними, что снижает несущую способность на 10–30% при потере сечения 5–15%. Коррозия канатов сокращает выносливость балки: при 10% потере сечения число циклов падает с $3,2 \cdot 10^5$ до $1,8 \cdot 10^5$, при 20% — до $1,2 \cdot 10^5$ циклов. Также существенное влияние оказывает характер распространения и скорость коррозии, которая зависит от плотности тока коррозии.

2. Предложена вероятностная модель, учитывающая скорость коррозии и ее влияние на преднапряжение. Показано, что коррозия увеличивает суммарные потери преднапряжения на 5–20% в зависимости от агрессивности среды. Наибольший вклад вносят уменьшение площади сечения арматуры, а также из-за релаксации напряжений в поврежденных проволоках.

3. Результаты работы позволяют прогнозировать выносливость подкрановых балок, чтобы оптимизировать методы их усиления с учетом степени коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Развитие математических моделей, описывающих процессы коррозии в бетонных и железобетонных конструкциях // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. №3. С. 85-93.
3. Stewart M. G., & Mullard J. A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures // *Engineering Structures*. 2007. 29(7), 1457-1464.
4. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5-18.
5. Андреев И.Ф., Мацеевич Т.А. Надежность арматурного каната К-7 при корреляции коррозии между проволоками. В сборнике: Инновации в строительстве. материалы международной научно-практической конференции. Брянск, 2024. С. 213-216.
6. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair (2nd ed.). Wiley-VCH. 2013.
7. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI). 1982.
8. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Бабушкина Д.Р., Грязнов С.Ю. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1(10). С. 19-24.
9. Смоляго Г.А., Демин В.О., Фролов Н.В., Дрокин С.В. Оценка остаточного срока службы железобетонных перекрытий с коррозионными повреждениями // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. №3. С. 17.
10. Melchers R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction (3rd ed.). Wiley. 2018.
11. Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Прочность корродирующего бетона при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий // Строительство и реконструкция. 2013. № 5 (49). С. 3-9.
12. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С.19-26.
13. Овчинников И.И., Чэнь Т., Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4. № 4. С. 3.
14. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
15. Травуш В.И., Волков Ю.С. Вопросы применения Еврокодов в строительном проектировании в РФ // Вестник НИЦ «Строительство». 2021;30(3):117-123.
16. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings, CEN.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs with Corroded Reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2022. 1(99), 89-98. (in Russian)
2. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. (2020). Development of Mathematical Models Describing Corrosion Processes in Concrete and Reinforced Concrete Structures. *Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies*. 2020. 3, 85-93. (in Russian)
3. Stewart, M. G., & Mullard, J. A. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. *Engineering Structures*. 2007. 29(7), 1457-1464.
4. Tamrazyan A.G. Methodology for Analysis and Reliability Assessment of Reinforced Concrete Structures' Condition and Service Life Prediction. *Reinforced Concrete Structures*. 2023. 1(1), 5-18. (in Russian)
5. Andreev I.F., Matseevich T.A. Reliability of K-7 Reinforcement Rope with Corrosion Correlation Between Wires. In: *Innovations in Construction: Proceedings of International Scientific-Practical Conference*. Bryansk, 2024. pp. 213-216. (in Russian)
6. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair (2nd ed.). Wiley-VCH. 2013.
7. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI). 1982.
8. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L., Babushkina D.R., Gryaznov S.Yu. Modeling of Reinforced Concrete Structures Performance Considering Combined Mechanical Loads and Aggressive Environments. *Expert: Theory and Practice*. 2021. 1(10), 19-24. (in Russian)

9. Smolyago G.A., Demin V.O., Frolov N.V., Drokin S.V. Residual Service Life Assessment of Reinforced Concrete Floors with Corrosion Damage. *Construction and Architecture*. 2023. 11(3), Pp. 17. (in Russian)
10. Melchers R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction (3rd ed.). Wiley. 2018.
11. Kolchunov V.I., Androsova N.B. Strength of Corroding Concrete Under Simultaneous Mechanical and Environmental Impacts. *Building and Reconstruction*. 2013. 5(49), Pp. 3-9. (in Russian)
12. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil engineering*. 2019. No. 2. P. 19-26.
13. Ovchinnikov I.I., Chen T., Ovchinnikov I.G. Probabilistic Modeling of Reinforced Bridge Structures Behavior in Aggressive Conditions. *Transport Structures*. 2017. 4(4), Pp. 3. (in Russian)
14. Russian Federation. (2018). SP 63.13330.2018 "SNIIP 52-01-2003 Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions". (in Russian)
15. Travush V.I., Volkov Yu.S. Issues of Eurocodes Application in Construction Design in Russian Federation. *Bulletin of Scientific Research Center "Construction"*. 2021. 30(3), Pp. 117-123. (in Russian)
16. European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings.

Информация об авторах

Мацевич Татьяна Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»: г. Москва, Россия, д-р ф.-м. наук, профессор.

E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Андреев Илья Федорович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»: г. Москва, Россия, аспирант.

E-mail: yfyfyt@gmail.com

Information about authors

Matseevich Tatiana A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Andreev Ilia F.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate Student.

E-mail: yfyfyt@gmail.com

Статья поступила в редакцию 21.06.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 21.06.2025
Approved after reviewing 01.07.2025
Accepted for publication 11.08.2025

С.Ю. САВИН¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ЖИВУЧЕСТЬ И ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСА ЗДАНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСОБОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация: Риски, связанные с особыми, в том числе аварийными, воздействиями на здания и сооружения, приводят к необходимости предусматривать при проектировании мероприятия по защите от прогрессирующего обрушения. При этом актуальной задачей является оценка достаточности и эффективности конструктивных мероприятий по защите как вновь проектируемых, так и реконструируемых зданий и сооружений для предотвращения их обрушения в аварийной ситуации. Решение этой задачи возможно с использованием критериев и мер живучести. Предложен вариант относительного индекса живучести, учитывающего степень повреждения элементов конструктивной системы здания в процессе длительной эксплуатации и уровень действующей нагрузки. Рассмотрена связь между относительной мерой живучести и техническим состоянием конструкций. Приведены результаты оценки живучести железобетонного многоэтажного каркаса здания с плоскими безбалочными плитами перекрытий, в которых в качестве конструктивного мероприятия по защите от прогрессирующего обрушения предусмотрены периметрические, продольные и поперечные внутренние связи, подобранные по методу связевых усилий. Продемонстрирована эффективность использования системы дополнительных связей для обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения. Показано, что при проектном уровне нагрузки наименьший относительный индекс живучести соответствует аварийной ситуации, вызванной потерей несущей способности угловой колонны здания, а наибольший – средней колонны. В результате снижения прочности бетона и арматуры на 30% (или эквивалентного снижения эффективных размеров сечений в результате действия агрессивной среды) отмечено снижение относительного индекса живучести до $RRI = 0,65$ при действии постоянных и длительных нормативных нагрузках и принятых нормативных характеристиках материалов конструкций.

Ключевые слова: особое воздействие, прогрессирующее обрушение, живучесть, относительный индекс живучести, техническое состояние, железобетонный каркас, дополнительные связи

S.Y. SAVIN¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ROBUSTNESS AND TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES AS A RESULT OF ACCIDENTAL ACTION

Abstract. Risks associated with accidental actions on buildings and structures lead to the demand for design measures aimed at protection against progressive collapse. In this case, the actual task is to assess the sufficiency and effectiveness of structural measures to protect both newly designed and reconstructed buildings and structures to prevent their collapse in an accidental situation. The solution of this problem is possible with the usage of criteria and measures of robustness. A variant of the relative robustness index, which takes into account the degree of damage to the elements of the structural system of the building during long-term operation and the level of the current load, has been proposed.

© Савин С.Ю., 2025

The relation between the relative measure of robustness and technical condition of structures is examined. The results of robustness check of reinforced concrete multistorey building frame with plane beamless floor slabs, in which perimetric, longitudinal and transverse internal ties, selected by the method of tie forces, are provided as a structural measure to protect against progressive collapse. The effectiveness of using a system of additional ties to provide protection against progressive collapse has been demonstrated. It is shown that at the design load level the lowest relative robustness index corresponds to the accidental situation caused by the loss of bearing capacity of the corner column of the building, and the highest - to the middle column. As a result of concrete and reinforcement strength reduction by 30% (or equivalent reduction of effective cross-sectional dimensions as a result of aggressive medium action), the relative robustness index decreased to $RRI = 0.65$ under the action of constant and long-term characteristic loads and accepted characteristic properties of construction materials.

Keywords: accidental actions, progressive collapse, robustness, relative robustness index, technical condition, reinforced concrete frame, tie force

1. Введение

В течение срока эксплуатации здания и сооружения могут подвергаться аварийным воздействиям различного характера. В связи с этим при оценке их технического состояния целесообразно определять не только ресурс сопротивления при действии основных сочетаниях нагрузок, но также живучесть конструктивной системы при особых, в том числе аварийных, воздействиях [1–3]. Термин живучесть (structural robustness) относительно недавно был введен в научную литературу и инженерную практику и пока ещё по-разному толкуется различными авторами и нормативными документами.

В [4] под живучестью понимается нечувствительность конструктивной системы к первоначальным повреждениям. Таким образом, конструктивная система обладает живучестью, если первоначальное повреждение не приводит к непропорциональному обрушению. Староссек и Хаберланд [5] определяют живучесть конструктивной системы как соотношение между прямыми рисками и общими рисками (суммарные риски равны сумме прямых и косвенных рисков) в течение определенного периода времени и с учетом всех возможных воздействий и повреждений элементов конструктивной системы. В [6] под живучестью понимается способность конструктивной системы перераспределять нагрузку между остальными несущими элементами в случае разрушения или повреждения одно из них.

Для оценки свойства живучести в научной литературе предложены различные количественные меры и параметры, основанные на учете риска, вероятности отказа, а также детерминированные, определяемые в рамках неявного оценивания вероятностей отказов и их последствий с использованием «глобального» формата безопасности или формата безопасности, основанного на применении системы частных коэффициентов безопасности (надежности). Подробный обзор мер живучести приведен в работах [2,7]. Общим для всех представленных мер живучести является сопоставление исходной и поврежденной несущей системы здания.

Известны различные методы проектирования, направленные на обеспечения свойства живучести конструктивных систем зданий и сооружений при аварийных воздействиях, среди которых проектирование ключевых элементов; создание системы дополнительных горизонтальных и вертикальных связей, в том числе внутренних; передача нагрузок по альтернативному пути; систематического учет и анализа риска (в том числе для окружения проверяемого строительного объекта). Одним из наиболее распространенных методов проектирования, предусмотренных в нормах различных стран, и находящий наиболее широкое применение, является метод передачи нагрузок по альтернативному пути [8]. В рамках этого метода рассматривается отклик поврежденной системы, максимально учитываются резервы несущей способности элементов системы с учетом изменения схемы их

работы и изменения напряженно-деформированного состояния [5–7]. Таким образом, при проверке альтернативных путей передачи нагрузок как правило рассматривают состояния несущей системы [9] в диапазоне от LS (Life Safety – безопасность жизнедеятельности) до CP (Collapse Prevention – предотвращение обрушения) на кривой отклика конструкции (рис. 1).

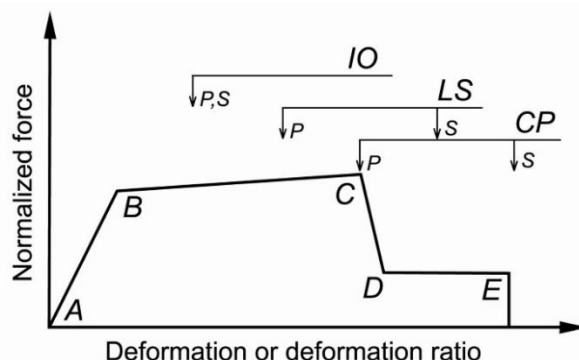


Рисунок 1 - Обобщенный вид связи между нагрузкой и деформацией конструктивного элемента и критерии приемлемых последствий по FEMA, 2000 [9]

С другой стороны, количественные меры живучести [2,10] могут быть использованы для оценки ресурса сопротивления конструктивных систем зданий не только при отказе несущего элемента, но и для режима нормальной эксплуатации в условиях снижения механических характеристик материалов в результате длительной эксплуатации и воздействий агрессивных сред, а также с учетом риска аварийных воздействий на поврежденных в результате длительной эксплуатации каркасы зданий. При этом необходимо выполнить дифференциацию допустимых уровней напряженно-деформированного состояния каркасов зданий с учетом требований эксплуатационной пригодности, ремонтпригодности и т.д. и установить количественные параметры такой оценки. Такая дифференция в научной литературе до настоящего времени не выполнялась.

Уместно также заметить, что представленные в нормах критерии для проверки несущей способности в рамках формата, основанного на использовании системы частных коэффициентов (коэффициентов надежности), ориентированы на оценку прочности и деформативности отдельных сечений и узлов и не дают прямого ответа на вопрос о том, как влияет образование шарниров пластичности в одном или нескольких сечениях элементов из композиционных материалов, таких как железобетон, на поведение конструктивной системы или отдельных её деформационных блоков с учетом возникновения специфических уровней напряженно-деформированных состояний поврежденных каркасов зданий [11–13]. В связи с этим в дополнение к критериям предельных относительных деформаций при проверке живучести целесообразно использование энергетических критериев устойчивости деформирования [14–16].

Целью данного исследования являлось установление связи между параметрами технического состояния зданий и соответствующими им количественными мерами живучести.

2. Модели и методы

2.1. Общие положения по оценке живучести поврежденных конструктивных систем зданий

Согласно требованиям норм проектирования¹ начальное локальное разрушение не должно приводить к прогрессирующему обрушению. При этом, учитывая, что в результате проектирования должна быть обеспечена несущая способность, деформативность и

¹ СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394640>

устойчивость формы деформации как здания и сооружения в целом, так и отдельных элементов и узлов сопряжений (с учетом специфических уровней напряженно-деформированного состояния), то проверку устойчивости к прогрессирующему обрушению всего сооружения может быть сведена к проверке живучести ограниченной области конструктивной системы здания – в пределах одного пролета в каждом направлении от удаляемого в рамках такой проверки элемента расчетной схемы. Такую область будем называть зоной возможного локального разрушения [17].

Рассмотрим относительную детерминированную меру живучести конструкций, предложенную Фэллоном и др. [18], предполагающую неявную оценку надежности:

$$RRI = \frac{\lambda_{damaged} - 1}{\lambda_{intact} - 1}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{damaged} = \frac{P_{damaged}}{P_{design}}, \quad \lambda_{intact} = \frac{P_{intact}}{P_{design}}.$$

Здесь P_{design} – проектная нагрузка, P_{intact} – несущая способность неповрежденной конструктивной системы по первичной расчетной схеме, $P_{damaged}$ – несущая способность поврежденной несущей системы по вторичной расчетной схеме.

Мера живучести (1) позволяет выполнить оценку снижения несущей способности поврежденной конструктивной системы по сравнению с её исходным неповрежденным состоянием. Однако она не учитывает текущий уровень нагруженности конструктивной системы, например, превышение проектной нагрузки в результате динамического воздействия, в том числе сопровождаемого изменением расчетной схемы сооружения.

В (1) параметры $\lambda_{damaged}$ и λ_{intact} являются множителями к проектной нагрузке, аналогичные параметру живучести λ , рассмотренному в работах [6,19,20]. Минимальное значение параметра живучести $\lambda_m, (m=1,2,3)$, при котором после начального локального разрушения достигается особое предельное состояние в наиболее нагруженном сечении элемента определяется из выражения:

$$\lambda_m = \min \left(\frac{F_{j,ult}^d \pm |F_{jq}|}{f_{jp}} \right), \quad (j=1,2,...,k). \quad (2)$$

Здесь $F_{j,ult}^d$ – прочность j -ого сечения элемента или связи при динамическом нагружении в особой расчетной ситуации; F_{jq} – усилие в j -ом сечении элемента или связи поврежденной конструктивной системы от эксплуатационной нагрузки; f_{jp} – усилие в j -ом сечении элемента или связи поврежденной конструктивной системы от нагрузки P в виде единичной сосредоточенной силы, приложенной в узле расчетной схемы по месту начального локального разрушения (моделирует динамические эффекты от внезапной структурной перестройки конструктивной системы в рамках подхода pull-down). Потере прочности j -ого сечения элемента или связи соответствует выполнение условия:

$$F_{jq} \pm f_{jp} \cdot \lambda_m < F_{j,ult}^d, \quad (j=1,2,...,k). \quad (3)$$

При этом система утрачивает свойство живучести при минимальном значении параметра λ , при котором система или её часть превращается в геометрически изменяемую, что может быть установлено путем приравняв нулю определителя, составленного из коэффициентов системы уравнений равновесия, записанной в матричной форме.

С учетом обозначений в выражении (1) критерий живучести по [6,19] может быть записан в виде:

$$1 - \frac{\lambda}{\lambda_{damaged}} \geq 0, \quad (4)$$

где

$$\lambda = \frac{P}{P_{damaged}}.$$

В формуле (4) в отличие от (1) присутствует параметр λ , связанный с уровнем действующей нагрузки P . При этом $\lambda_{damaged}$ определяется образованием такого числа пластических шарниров, при котором система становится геометрически изменяемой. Критерий (2) хорошо подходит для оценки живучести вновь проектируемых несущих систем зданий, однако он не учитывает в явном виде снижение несущей способности конструкций вследствие физического износа в процессе длительной эксплуатации или воздействий агрессивных сред.

Для учета уровня действующей нагрузки и снижения несущей способности конструкций в процессе эксплуатации относительный индекс живучести может быть представлен в виде:

$$RRI(\lambda) = \left(\frac{\lambda_{damaged} - \lambda}{\lambda_{intact} - 1} \right). \quad (5)$$

Относительный индекс живучести RRI в (5) изменяется от 0 до $RRI(0)$. Здесь 0 – соответствует условию достижения предельного равновесия конструкций в зоне возможно локального разрушения конструктивной системы или её части в проверяемой зоне возможного локального разрушения, а 1 – уровню живучести исходной конструктивной системы без повреждений при действии проектной нагрузки. Если уровень нагрузки снижается по сравнению с изначальной проектной ($\lambda < \lambda_{design}$), то относительный индекс живучести может принимать значения больше единицы для исходной конструктивной системы ($\lambda_{damaged} = \lambda_{intact}$) или приближаться к единице для усиливаемых конструкций эксплуатируемого здания.

При наличии полных диаграмм деформирования для монотонного квазистатического нагружения исходной и поврежденной конструктивной системы относительный индекс живучести может быть определен с использованием энергетического подхода [17] согласно схеме, представленной на рисунке 2.

На первом этапе с учетом полной диаграммы деформирования поврежденной конструктивной системы (рисунок 2, а) определяется уровень динамического догружения и соответствующее ему деформированное состояние конструкций из условия равенства работы и полной энергии деформации ($A_1 = A_2$) при достижении амплитудного значения относительного перемещения (δ_i/δ_{ult}) на первой полуволне колебаний системы, выведенной из состояния статического равновесия.

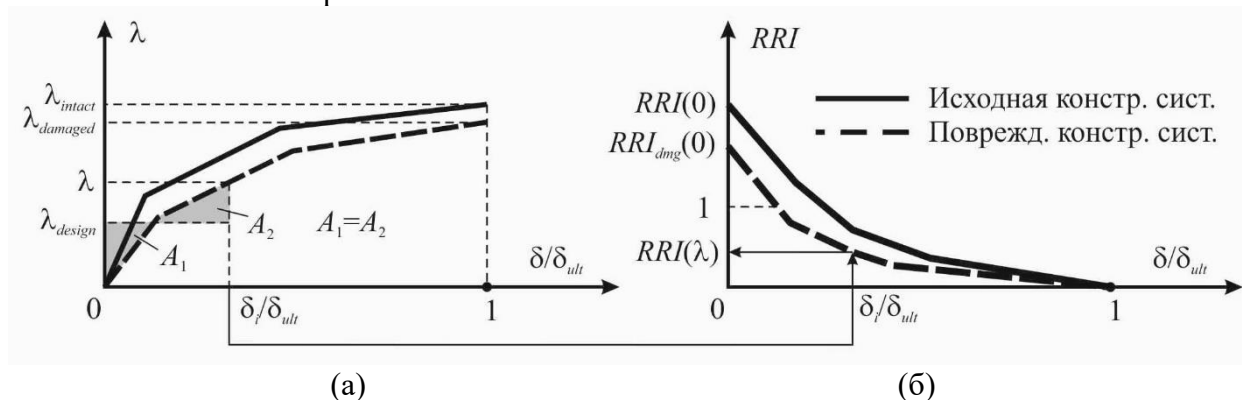


Рисунок 2 – К определению относительного индекса живучести конструктивной системы здания:
 а – зависимость параметра нагрузки λ от уровня деформированного состояния; б – зависимость относительного индекса живучести RRI от уровня деформированного состояния

По найденному значению амплитудного перемещения на графике « $RRI - \delta_i/\delta_{ult}$ » (рисунок 2, б) определяется относительный индекс живучести, с учетом которого соответствующее техническое состояние здания может быть установлено по таблице 1.

Таблица 1 – Связь относительного параметра живучести RRI с характеристиками технического состояния и уровнями последствий особого воздействия

Качественные характеристики технического состояния несущих систем зданий по ГОСТ 31937-2024 ¹	Уровни последствий по [9]	Значение относительного индекса живучести RRI
Нормативное	O (Operational)	$0,75 < RRI \leq 1$
Работоспособное	IO (Immediate Occupancy)	$0,5 < RRI \leq 0,75$
	LS (Life Safety)	$0,25 < RRI \leq 0,5$
Ограниченно работоспособное	CP (Collapse Prevention)	$0 < RRI \leq 0,25$
Аварийное	CO (Collapse)	$RRI \leq 0$

2.2. Конструктивные решения здания и рассматриваемые расчетные ситуации

Для иллюстрации предложенной меры живучести (3) рассмотрим железобетонный каркас многоэтажного здания (рисунок 3, а) с безбалочными перекрытиями, запроектированный в соответствии с требованиями СП 430.1325800² и СП 63.13330³.

Вертикальные несущие конструкции представлены монолитными железобетонными колоннами сечением 400×400 мм, стенами подвала толщиной 200 мм. Перекрытия выполнены в виде безбалочных монолитных железобетонных плит толщиной 250 мм. Для всех конструкций используется бетон класса прочности по сжатию В30. В качестве продольной и поперечной рабочей арматуры используется арматура А500. Для защиты от прогрессирующего обрушения в плитах перекрытия предусмотрена система периметрических, продольных и поперечных горизонтальных связей, в качестве которых используются арматурные стержни $\varnothing 12A500$, устанавливаемые с шагом $0,2L$ в сжатой зоне или вблизи нейтральной оси. Здесь L – пролет в поперечном по отношению к отдельной связи направлении.

Численное моделирование выполнено в ПК Лира – САПР. Для моделирования колонн использовались универсальные стержневые конечные элементы КЭ 210, позволяющие учитывать физическую нелинейность. Плиты перекрытия и стены моделировались с помощью универсальных треугольных и четырехугольных конечных элементов оболочки КЭ 242, 244 с учетом физической нелинейности. В качестве нелинейных законов деформирования использовались кусочно-линейные зависимости между напряжениями и относительными деформациями: для бетона – трехлинейная, для арматуры – билинейная с упрочнением. Прочность и деформативность материалов принята в соответствии с нормативными значениями по СП 63.13330. В узлах сопряжения колонн с плитами перекрытий и покрытия в пределах размеров поперечного сечения колонны вводились абсолютно жесткие тела, реализующие гипотезу о недеформируемых поперечных сечениях. Для моделирования связей используются универсальные стержневые конечные элементы КЭ 210.

¹ ГОСТ 31937-2024 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305691614>

² СП 430.1325800.2018 Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820823>

³ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082>

В результате длительной эксплуатации в железобетонном каркасе наблюдается снижение механических характеристик арматуры и бетона, выражаемой в эквивалентном снижении их прочности и деформативности.

В качестве критерия истощения несущей способности в сочетании с предельными относительными деформациями бетона и арматурной стали используется энергетический критерий устойчивости деформирования, который применительно к графику деформирования в безразмерных величинах (рисунок 2, а) может быть записан в виде:

$$\frac{d\lambda}{d(\delta/\delta_{ult})} = \alpha, \quad (4)$$

где α – является касательной жесткостью или, следуя терминологии, принятой в [15,16] – отпорностью, в безразмерных координатах $\lambda - (\delta/\delta_{ult})$. В качестве предельного значения в данном исследовании принято $\alpha = 0,15$, что соответствует снижению касательной жесткости (отпорности) на 85%.

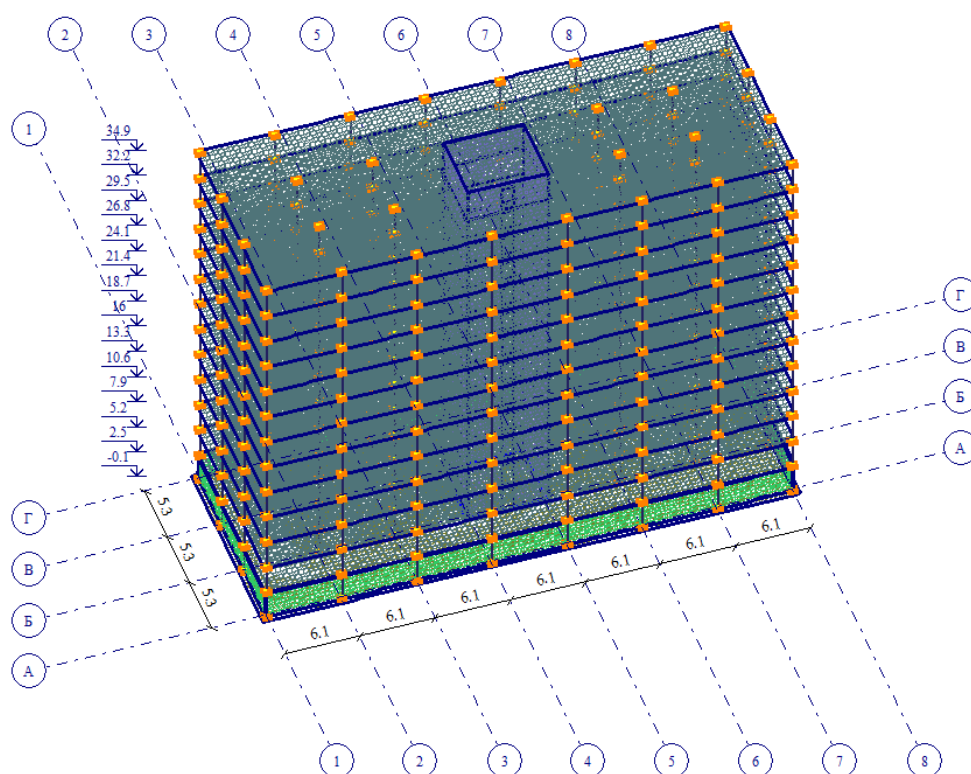


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель многоэтажного каркасного здания

В связи с многообразием разновидностей аварийных воздействий на конструкции зданий и сооружений, а также возможностью появления в течение срока эксплуатации новых, не поддающихся на этапе проектирования учету и прогнозированию аварийных воздействий, при оценке технического состояния и параметра живучести моделируется аварийная расчетная ситуация, связанная с внезапной потерей несущей способности одного из элементов каркаса здания. При этом дополнительно рассматривается снижение механических и деформативных характеристик бетона и арматуры в процессе эксплуатации до 30 %. Расчет исходной n (без повреждений) и поврежденной ($n - 1$) конструктивной системы выполнен на особое сочетание нагрузок:

$$C_s = P_d + P_l + P_s. \quad (5)$$

Здесь P_d – нормативные постоянные нагрузки, P_l – нормативные длительные нагрузки, P_s – нагрузка, представляющая собой статический эквивалент динамического эффекта от особого

воздействия, прикладываемая к конструкциям перекрытий в проверяемой зоне возможного локального разрушения. Для физически нелинейного расчета нагрузка P_s задается с некоторым запасом – для получения полной диаграммы деформирования конструктивного узла над удаляемой конструкцией. Фактическое значение P_s , соответствующее рассматриваемой аварийной расчетной ситуации, определяется с использованием энергетических соотношений по схеме рисунка 2, а.

3. Результаты исследования и их анализ

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 4, 5.

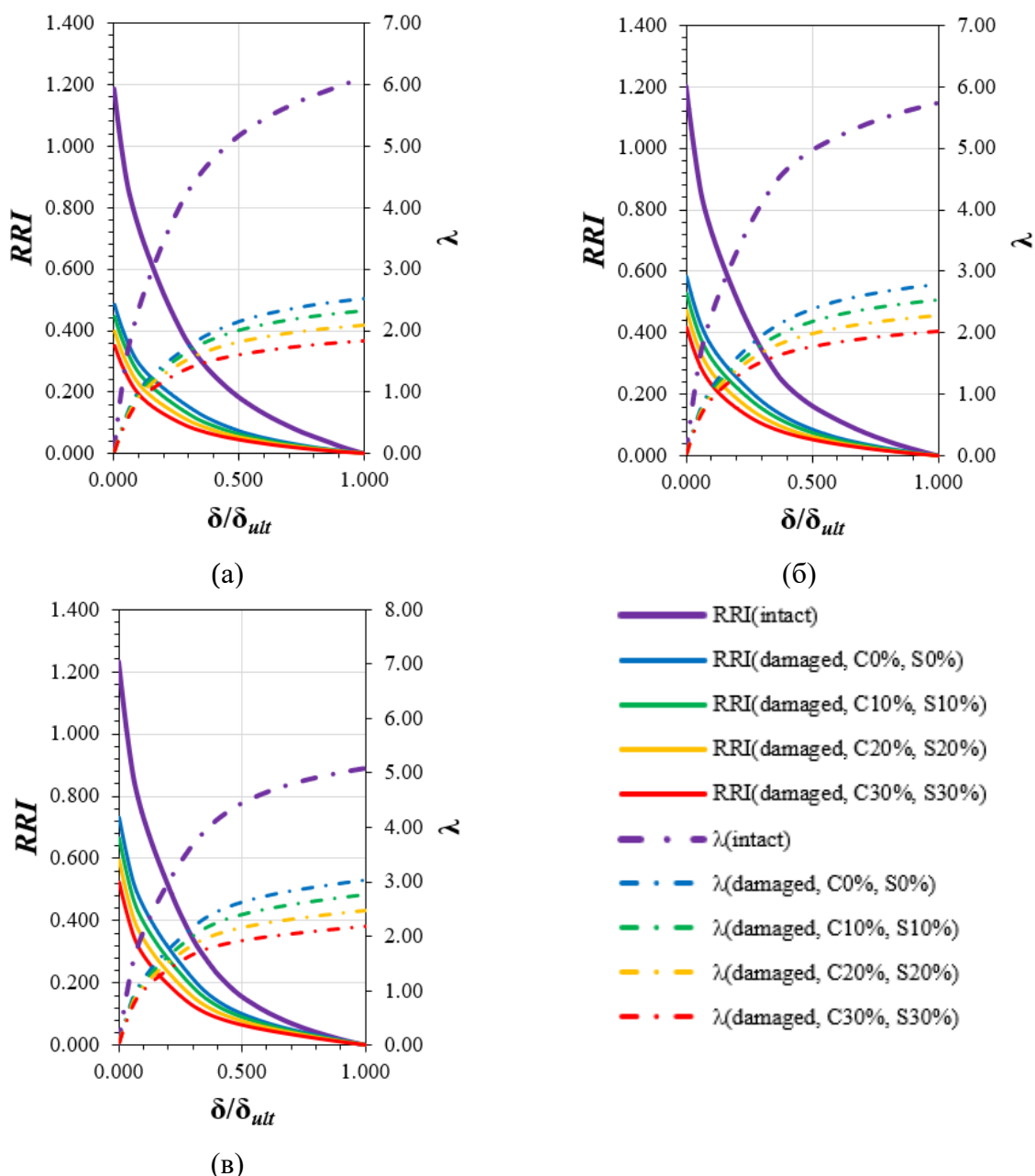


Рисунок 4 – Графики зависимости изменения параметрической нагрузки λ и относительного индекса живучести $RRI(\lambda)$ от уровня деформированного состояния (δ/δ_{ult}) в аварийной расчетной ситуации: при отказе угловой колонны (а); при отказе колонны крайнего ряда (б); при отказе колонны среднего ряда (в)

Анализ графиков на рисунке 4, а-в свидетельствует о значительном запасе несущей способности конструктивной системы как в исходном состоянии (по первичной расчетной схеме), так и после начального локального разрушения по всем трем сценариям: удаление средней, крайней или угловой колонны. Дополнительная система продольных и поперечных связей в дисках перекрытий способствовала реализации мембранного механизма сопротивления плит перекрытий и повышению несущей способности по критериям особого предельного состояния. При этом наибольшее снижение относительного индекса живучести отмечено для сценария удаления угловой колонны ($RRI = 0.30$), а наименьшее – для сценария удаления средней колонны (0.50). При удалении колонны крайнего ряда и отсутствии снижения прочностных и деформативных характеристик материалов $RRI = 0.38$.

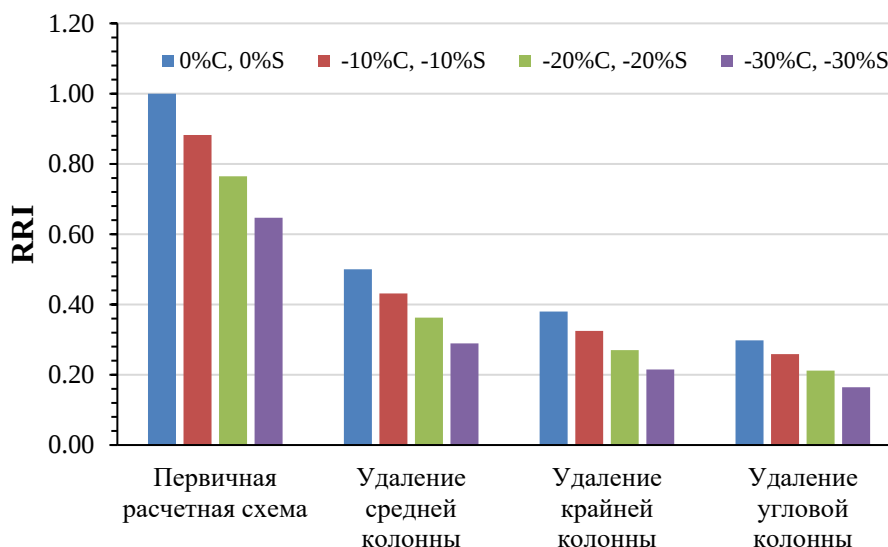


Рисунок 5 – Зависимость относительного индекса живучести RRI от вида начального локального разрушения и снижения механических характеристик бетона и арматуры

Из рисунка 5 видно, что для рассматриваемой конструктивной системы по первичной расчетной схеме при снижении нормативной прочности бетона и арматурной стали до 30 % значения относительного индекса живучести RRI для проектной нагрузки снижается до $RRI = 0,65$. Наибольшее снижение до $RRI = 0,16$ происходит при сценарии удаления угловой колонны и наличия коррозионных повреждений до 30%. Следует отметить, что в рассмотренном примере расчет выполнялся на особое сочетание нагрузок, включающее только нормативные постоянные и длительные нагрузки, характеристики материалов принимались нормативными. При расчете по первой группе предельных состояний за счет применения системы коэффициентов надежности (частных коэффициентов), а также более жестких критериев проверки запасы несущей способности для конструктивной системы по первичной расчетной схеме существенно снизятся и при высоком уровне коррозионных повреждений (от 20% до 30%) следует ожидать значения относительного индекса живучести меньше нуля $RRI < 0$.

На рисунке 6 представлен график зависимости относительного индекса живучести от снижения прочности бетона и стальной арматуры (или эквивалентного уменьшения эффективных размеров сечений вследствие воздействий агрессивных сред). Из графика видно, что снижение прочности (или эквивалентных размеров сечения) арматуры оказывает более существенное влияние на снижение живучести конструктивной системы при особом воздействии. Это обусловлено тем, что именно арматура определяет сопротивление конструкций перекрытий по мембранному механизму после образования пластических шарниров.

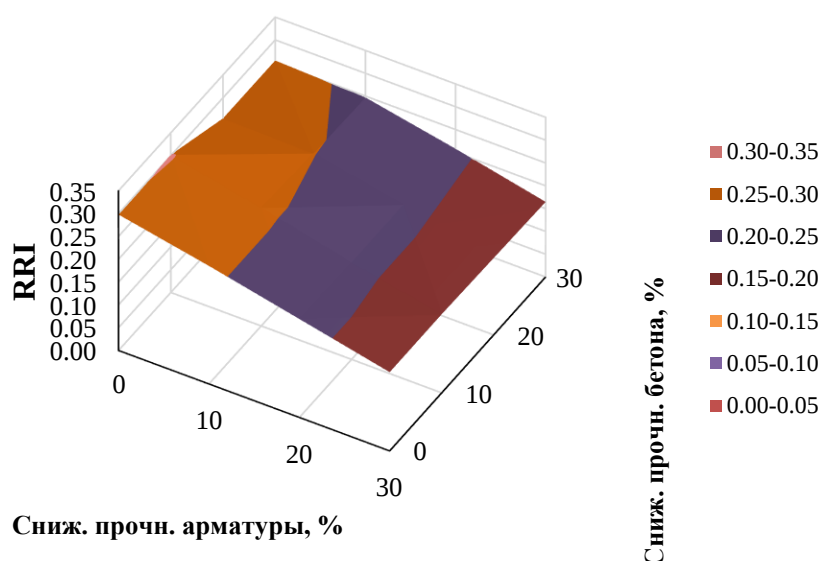


Рисунок 6 – График зависимости относительного индекса живучести при действии проектной нагрузки от снижения прочности бетона и арматуры для системы (п-1) при сценарии начального локального разрушения в виде отказа угловой колонны

4. Заключение

1. Предложен подход к оценке живучести и технического состояния железобетонных конструкций каркаса здания в результате особого воздействия, основанный на использовании относительного индекса живучести, учитывающего степень повреждения элементов конструктивной системы здания в процессе длительной эксплуатации и уровень действующей нагрузки.

2. Показано, что при проектном уровне нагрузки наименьший относительный индекс живучести соответствует сценарию начального локального разрушения, связанного с удалением угловой колонны здания ($RRI = 0.30$), а наибольший – средней колонны ($RRI = 0.5$), что согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований сопротивления конструкций железобетонных каркасов зданий при аварийном воздействии, выполненных различными авторами.

3. Численным моделированием установлено, что в результате снижения прочности бетона и арматуры до 30 % или соответствующего эквивалентного снижения эффективных размеров сечений в результате воздействия агрессивной среды происходит снижение относительного индекса живучести, который достигает значения 0,65 при расчете по первичной расчетной схеме на действие постоянных и длительных нормативных нагрузок и принятых нормативных значений прочностных и деформативных характеристик материалов конструкций.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект по теме «Оценка технического состояния зданий на основе параметров живучести и риска», номер темы FSWG 2024-0003 (госзадание НИУ МГСУ). Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 15.10.2024 №075-03-2024-063/9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Vol. 1, № 1. P. 5–18.
2. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. № 3. С. 62–74.
3. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А., Савин С.Ю. Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозирования риска аварии // Строительство и реконструкция. 2024. № 6. С. 82–91.
4. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
5. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // Structure and Infrastructure Engineering. 2011. Vol. 7, № 7–8. P. 625–631.
6. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion // Eng Struct. 2024. Vol. 314. P. 118309.
7. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng Struct. Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
8. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. A simplified model for alternate load path assessment in RC structures // Eng Struct. 2018. Vol. 171. Pp. 696–711.
9. Federal Emergency Management Agency FEMA 356 / November 2000 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.
10. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. Vol. 113, № 3. P. 31–71.
11. Almusallam T., Al-Salloum Y., Elsanadedy H., Tuan N., Mendis P., Abbas H. Development limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios // Structure and Infrastructure Engineering. Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 12. P. 1616–1634.
12. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Resistance of Reinforced Concrete Frames to Progressive Collapse at Catenary Action of Beams // Reinforced concrete structures. 2024. Vol. 6, № 2. P. 43–53.
13. Lu X., Lin K., Li C., Li Y. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures // Eng Struct. 2018. Vol. 168. P. 721–735.
14. Szyniszewski S. Dynamic energy-based method for progressive collapse analysis // Proceedings of the 2009 Structures Congress - Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role. 2009. P. 1259–1268.
15. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. Москва: Госстройиздат, 1958. 216 p.
16. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Соппротивление железобетонных конструкций. Киев: Основа, 2009. 432 p.
17. Савин С.Ю., Колчунов В.И. Устойчивость железобетонных каркасов зданий к начальному локальному разрушению // Известия вузов. Строительство. 2024. № 10. P. 50–64.
18. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2016. Vol. 30, № 6.
19. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 p.
20. Fedorova N., Vu N.T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental actions // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 109, № 1.

REFERENCES

1. Tamrazian A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1):5-18. (In Russ.).
2. Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. *Reinforced concrete structures*. 2023;3(3):62-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.3.62-74>
3. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting. *Building and Reconstruction*. 2024. № 6. P. 82–91.
4. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
5. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2011. Vol. 7, № 7–8. P. 625–631.

6. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion. *Eng Struct.* 2024. Vol. 314. P. 118309.
7. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng Struct.* Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
8. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. A simplified model for alternate load path assessment in RC structures. *Eng Struct.* 2018. Vol. 171. Pp. 696–711
9. Federal Emergency Management Agency FEMA 356 / November 2000 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.
10. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction.* 2024;(3):31-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71>
11. Almusallam T., Al-Salloum Y., Elsanadedy H., Tuan N., Mendis P., Abbas H. Development limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios. *Structure and Infrastructure Engineering.* Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 12. P. 1616–1634.
12. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Resistance of Reinforced Concrete Frames to Progressive Collapse at Catenary Action of Beams. *Reinforced concrete structures.* 2024. Vol. 6, № 2. P. 43–53.
13. Lu X., Lin K., Li C., Li Y. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures. *Eng Struct.* 2018. Vol. 168. P. 721–735.
14. Szyniszewski S. Dynamic energy-based method for progressive collapse analysis. Proceedings of the 2009 Structures Congress - Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role. 2009. P. 1259–1268.
15. Gemmerling A.V. Load-bearing capacity of steel bar structures. Moscow: Gosstroyizdat, 1958. 216 p.
16. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete structures. Kiev: Osnova, 2009. 432 p.
17. Savin S.Yu., Kolchunov V.I. Robustness check of reinforced concrete frames at initial localized failure. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2024; (10): 50–64. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-50-64.
18. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2016. Vol. 30, № 6.
19. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Robustness of building and structures to undesigned actions. Moscow: Publishing ASV, 2014. 208 p.
20. Fedorova N., Vu N.T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental actions. *Magazine of Civil Engineering.* 2022. Vol. 109, № 1.

Информация об авторах:

Савин Сергей Юрьевич

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

Information about authors:

Savin Sergey Yu.

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

Статья поступила в редакцию 17.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 12.08.2025

The article was submitted 17.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 12.08.2025

А.А. ФЕДОРОВСКАЯ¹, Е.С. КАЛАЙЧЕВА¹, С.Г. ШЕИНА¹,

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

МЕТОДИКА ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ БЕЗБАРЬЕРНОЙ СРЕДЫ В ГОСТИНИЧНОЙ НЕДВИЖИМОСТИ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения доступности объектов гостиничной недвижимости для маломобильных групп населения (далее-МГН). Авторами разработана комплексная методика информационного сопровождения безбарьерной среды, включающая семь последовательных этапов: от систематизации гостиничных объектов до формирования рейтинга их доступности и разработки рекомендаций по адаптации. Особое внимание уделяется вопросам: стандартизации процедуры оценки доступности гостиниц; созданию проекта с помощью геоинформационных систем (далее - ГИС) для визуализации данных; разработке объективной системы ранжирования объектов размещения. Разработанная методика позволяет определять проблемные места в обеспечении МГН доступностью объектов гостиничной недвижимости в крупном городе. Кроме того, результат реализации разработанной методики представляет рейтинг гостиниц по обеспечению МГН. В конце представленного исследования получены первые результаты обследования гостиниц города Ростов-на-Дону: структурированный перечень объектов (80 гостиниц) с базовыми характеристиками; диаграммы, построенные на анализе данных объектов, и электронная карта, сформированная с помощью, ГИС-технологий. Осознание значимости доступного обслуживания в объектах гостиничной недвижимости открывает новые горизонты для привлечения разнообразной аудитории в города, укрепление социально-экономического потенциала.

Ключевые слова: безбарьерная среда, гостиницы, инклюзивность, методология оценки, стандарты оценки, биосферосовместимый город, маломобильные группы населения, доступность гостиниц

A.A. FEDOROVSKAYA¹, E.S. KALAICHEVA¹, S.G. SHEINA¹

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

METHODOLOGY OF INFORMATION SUPPORT OF BARRIER-FREE ENVIRONMENT IN HOTEL REAL ESTATE

Abstract. The article deals with the urgent problem of ensuring accessibility of hotel real estate objects for low-mobility groups of population (further-MGP). The authors have developed a complex methodology of information support of barrier-free environment, including seven consecutive stages: from systematisation of hotel objects to formation of their accessibility rating and development of recommendations for adaptation. Special attention is paid to the following issues: standardisation of the procedure for assessing the accessibility of hotels; creation of a project using geographic information systems (further-GIS) for data visualisation; development of an objective system for ranking accommodation facilities. The developed methodology makes it possible to identify problem areas in providing MGN with accessibility of hotel real estate objects in a large city. In addition, the result of the implementation of the developed methodology is a rating of hotels on the provision of MGN. At the end of the presented research the first results of the survey of hotels in the city of Rostov-on-Don were obtained: a structured list of objects (80 hotels) with basic characteristics; diagrams based on the analysis of these objects, and an electronic map formed with the help of GIS-technologies. Realisation of the significance of accessible service in hotel real estate objects opens new horizons for attracting a diverse audience to the cities, strengthening the socio-economic potential.

Keywords: barrier-free environment, hotels, inclusiveness, assessment methodology, assessment standards, biosphere-compatible city, low mobility groups, accessibility of hotels

© Федоровская А.А., Калайчева Е.С., Шеина С.Г., 2025

1. Введение

Формирование современной туристической инфраструктуры в России осуществляется в рамках национальных проектов, включая «Туризм и индустрию гостеприимства». Одним из ключевых факторов туристической привлекательности регионов является доступность объектов размещения для маломобильных групп населения (далее - МГН). К МГН относятся люди с ограниченными возможностями передвижения, пожилые граждане, семьи с маленькими детьми и другие категории, нуждающиеся в безбарьерной среде.

Социально-психологическая отчужденность МГН обусловлена в том числе недостатками в обеспечении территорий российских городов оптимальными планировочными решениями, что помимо всего этого снижает их социально-экономическую и культурную активность [1,2].

Российские и зарубежные авторы не первый год акцентируют свое внимание на востребованность темы доступности для МГН городских территорий, объектов культуры, спорта и социальной инфраструктуры [3–10]. В частности, в исследованиях [11,12] предложены рекомендации по поэтапному преобразованию биосферсовместимых городов с учетом интересов маломобильных групп населения.

Актуальность проблемы обеспеченности территорий для МГН заключается в отсутствии единой информационной системы, отражающей уровень доступности гостиничных объектов для МГН. В крупных городах таких, как Ростов-на-Дону, нет открытых баз данных, нет структурированного подхода к оценке соответствия гостиниц требованиям безбарьерной среды. Это создаёт сложности для туристов с ограниченной мобильностью и снижает конкурентоспособность регионального туристического продукта.

Цель исследования – разработка методики информационного сопровождения безбарьерной среды в гостиничной недвижимости, включая классификацию объектов, оценку их доступности и формирование рейтинговой системы для дальнейшей модернизации.

Актуальность создания безбарьерной среды в США и Европе для гостиничного бизнеса становится все более очевидной в условиях современной социальной и экономической реальности [13]. Эффективная интеграция доступности в гостиничном секторе не только отвечает требованиям законодательства, но и отражает ценностные ориентиры демократического общества, основанного на принципах равенства и уважения к человеческому достоинству. важно учитывать стандарты доступности, такие как ADA (Americans with Disabilities Act) в США и EHIC (Emergency Health Insurance Card) в Европе, которые устанавливают требования к инфраструктуре и сервисам для людей с ограниченными возможностями [14].

С учетом увеличения числа туристов с ограниченными физическими возможностями, гостиницы, которые могут предложить безбарьерный доступ, получают конкурентное преимущество. В США и Европе давно существуют нормативно-правовые акты по созданию безбарьерной среды, в том числе и для гостиниц. следует обратить внимание на методологии оценки, применяемые в разных странах: например, использование «теста клиента» в Великобритании и системы «Mystery Guest» в других европейских государствах. Эти подходы позволяют получить объективную информацию о состоянии доступности объектов.

International Building Code 2018 (IBC) — это стандарт для коммерческих зданий в США, который объединяет все требования к конструкциям, сантехническим, механическим, топливным газовым, энергетическим и электрическим системам. Стандарт распространяется на все здания, за исключением отдельно стоящих одно- и двухэтажных жилых домов и таунхаусов до трёх этажей [15].

В документе International Building Code 2018 (IBC) доступная среда оценивается по следующим критериям:

Доступность рабочих мест. Пространства и элементы в рабочих зонах сотрудников должны быть спроектированы и построены так, чтобы люди с ограниченными возможностями могли подходить, входить и выходить из рабочей зоны.

Доступность зон погрузки пассажиров. Такие зоны должны быть доступны для пассажиров.

Доступность жилых и спальных помещений. К доступным пространствам относятся туалетные и ваннные комнаты, кухни, жилые и обеденные зоны, а также любые внешние пространства, включая патио, террасы и балконы.

Наличие доступной дороги. Она должна соединять доступные входы в здание или объект с основным входом в каждое доступное помещение внутри здания или объекта, а также с внешними и внутренними пространствами и объектами, которые обслуживают помещения.

Доступность парковочных мест. Если на участке предусмотрено несколько парковок, количество доступных мест рассчитывается отдельно для каждой из них.

BS 8300:2009 + A1:2010. Это стандарт, разработанный в Великобритании, который определяет основы проектирования помещений с учётом нужд людей с ограниченными возможностями. В этом документе предлагаются рекомендации по организации парковки как на улице, так и вне её, а также по созданию посадочных площадок и гаражей. Также он включает инструкции для организации доступных маршрутов к зданиям и вокруг них, а кроме того, даются советы по проектированию входных групп и интерьеров новых построек. Также стандарт применяется для оценки доступности и удобства использования существующих зданий и, по возможности, служит основой для их улучшения [16].

В документе BS 8300:2009 + A1:2010 оценка доступной среды осуществляется по ряду критериев:

Физическая доступность. Обеспечение свободного доступа к зданию (входные группы и двери должны быть доступны), комфортное перемещение внутри (пешеходные пути должны быть оснащены для удобства передвижения), возможность доступа к различным внутренним пространствам и другим функциональным зонам (доступность помещений), а также наличие санитарно-гигиенических условий.

Безопасность. Обеспечение защиты жизни и здоровья в чрезвычайных ситуациях (наличие безопасных зон и четко обозначенных путей эвакуации), снижение вероятных рисков получения травм и увечий, связанных с архитектурными особенностями зданий, включая используемые отделочные материалы.

Информативность. Эффективное распознавание и корректная идентификация инвалидов ориентиров и знаков в архитектурной среде общественных зданий, обеспечение их навигации и ориентировки в любое время суток, предоставление постоянной информационной поддержки на всех пешеходных маршрутах и исключение помех при восприятии информации.

Комфортность. Создание комфортных условий пребывания на объекте, включая кратчайший путь к целевым местам посещения.

Bauordnung für Berlin 2016 (Германия) — это документ, который устанавливает требования к строительству в Берлине. Также в документе рассматриваются усилия по обеспечению доступности туристической инфраструктуры, что способствует улучшению досуга и культурной жизни людей с ограниченными возможностями здоровья [17].

Кроме того, в Bauordnung für Berlin 2016 упоминаются меры государственной поддержки для лиц с ограниченными возможностями здоровья, в том числе налоговые преференции и дотации на услуги личного помощника

В документе Bauordnung für Berlin 2016 доступная среда оценивается по следующим критериям:

Физическая доступность. Оцениваются пути движения к объекту, территория, прилегающая к зданию, вход в здание, пути движения внутри здания, в том числе горизонтальные, вертикальные и пути эвакуации, санитарно-бытовые помещения.

Доступность системы навигации и ориентирования. Учитываются информационные знаки и указатели, которые помогают людям с ограниченными возможностями ориентироваться в пространстве.

Оформление лестниц и ступеней. Для неограниченного использования лестницы и ступени должны быть выполнены в соответствии с требованиями безбарьерной среды. Например, не допускается значительное различие между ступенями, необходимо наличие подступенков, зона повышенного внимания перед ведущей вниз лестницей должна быть шириной от 0,60 до 0,90 м и иметь оптический и тактильный контраст.

Рекомендации UNWTO. Всемирная туристская организация (UNWTO) разработала руководства по доступности туризма для людей с ограниченными возможностями здоровья, которые направлены на обеспечение доступа людей с инвалидностью к физической среде, транспорту, информации и средствам коммуникации, а также к широкому спектру общественных объектов и услуг [18].

В рекомендации UNWTO есть следующие пункты:

В местах проживания номера должны быть организованы так, чтобы человек с инвалидностью мог свободно передвигаться, пользоваться услугами и удобствами, а также средствами связи. Помещения и инфраструктура должны оснащаться системами аварийной сигнализации, учитывающими потребности людей с нарушениями слуха. Также необходимо обеспечить возможность нахождения собак-поводырей в жилых условиях и предоставить им всё необходимое.

Что касается организации питания, рядом с местами проживания должно быть достаточное количество ресторанов, кафе и баров с удобными условиями. Вход в эти заведения должен быть доступен, а мебель – спроектирована с учётом нужд людей на колясках. Необходимо предусмотреть стойки разной высоты, меню с легко читаемым текстом, а также на браилевском шрифте или в альтернативах, доступных через сайт или приложение. Санузлы также должны быть адаптированы для людей с ограниченными возможностями.

Для конференц-услуг помещения должны включать специальные участки или зоны для гостей на колясках, а также иметь наушники или индукционные петли для людей с нарушениями слуха. Рекомендации разработаны с учётом положений Конвенции ООН о правах инвалидов 2007 года.

В последние годы в России наблюдается активное внимание к созданию безбарьерной среды в гостиничном бизнесе [19]. Разработка и внедрение стандартов оценки гостиниц (рис.1) на соответствие принципам доступности стали важным шагом на пути интеграции людей с ограниченными возможностями в общество.

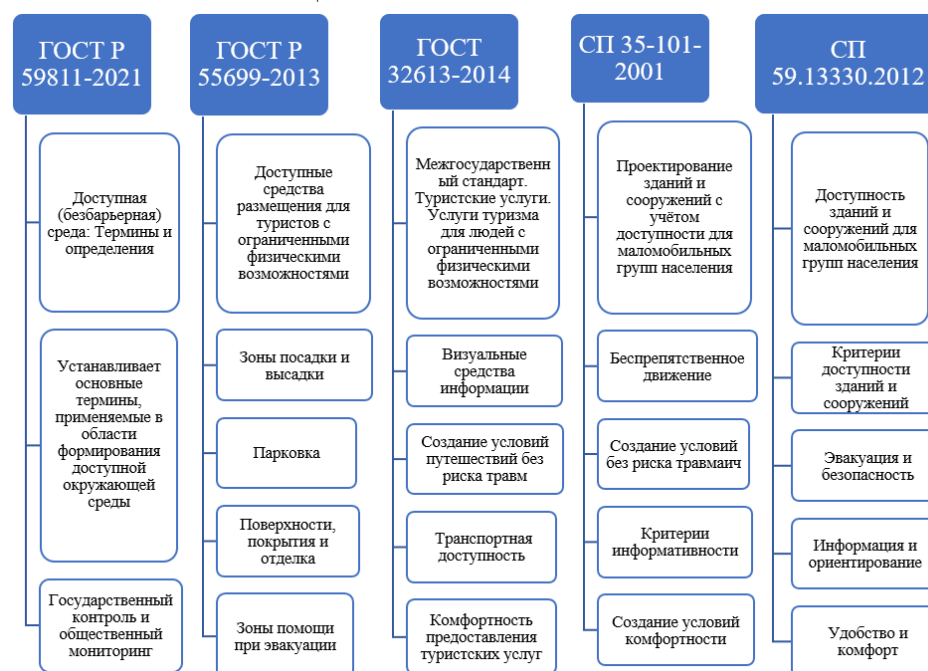


Рисунок 1 – Существующие стандарты в области безбарьерной среды в России

В ходе рассмотрения нормативных документов по безбарьерной (ГОСТ Р 59811-2021), (ГОСТ Р 55699-2013), (СП 35-101-2001), (СП 59.13330.2012), (ГОСТ 32613-2014) среде в России была составлена сравнительная таблица (табл.1).

Таблица 1 – Матрица дублирования в нормативных документах критериев оценки безбарьерной среды

Нормативный документ	ГОСТ Р 55699-2013	ГОСТ Р 59811-2021	СП 35-101-2001	СП 59.13330.2012	ГОСТ 32613-2014
Название нормативного документа	Доступные средства размещения для туристов с ограниченными и физическими возможностями и	Доступная (безбарьерная) среда: Термины и определения	Проектирование зданий и сооружений с учётом доступности для маломобильных групп населения	Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения	Межгосударственный стандарт. Туристские услуги. Услуги туризма для людей с ограниченными физическими возможностями
Критерии оценки	1	2	3	4	5
Доступность	+	+	+	+	+
Безопасность	+	—	+	+	+
Информативность	—	—	+	+	—
Комфортность	+	-	+	+	+

Анализируя таблицу 1, можно сделать вывод, что во многих нормативных документах дублируется информация по безбарьерной среде. Дублирование в нормативных документах критериев оценки безбарьерной среды представляет собой важный аспект, требующий пристального внимания как со стороны законодателей, так и специалистов в области урбанистики и социальной политики. Система критериев, направленных на оценку доступности общественных пространств, должна быть разработана с учетом современных требований и рекомендаций, учитывающих разнообразие потребностей людей с ограничениями по здоровью.

Необходимость устранения избыточных и противоречивых норм, которые дублируют друг друга, способствует не только упрощению правоприменения, но и созданию единой базы для оценки качества безбарьерной среды [24]. Это, в свою очередь, позволит эффективно контролировать выполнение обязательств по доступности объектов инфраструктуры, обеспечивая равные возможности для всех граждан. Несмотря на наличие норм, их исполнение часто носит формальный характер.

Научные подходы к обеспечению безбарьерной среды в гостиничных объектах

1. Универсальный дизайн (Ronald L. Mace, 1985). "Universal Design: Barrier Free Environments for Everyone"[27].

Методика включает в себя два этапа:

1) Интеграция доступности на этапе проектирования (пандусы, лифты, тактильные элементы).

2) 7 принципов универсального дизайна: от равноправного использования до минимизации физических усилий.

Применение: используется в США (стандарты ADA) и ЕС.

2. Инклюзивный подход (Simon Darcy, 2010). "Accessible Tourism: Concepts and Issues" [28].

Методика:

1) Оценка доступности через три критерия: физическая (инфраструктура), информационная (сайты, навигация), коммуникационная (подготовка персонала).

2) Акцент на потребностях людей с разными формами инвалидности (двигательной, сенсорной).

3. ГИС-моделирование (Павлюк Я.В., Алейников А.С.) Основы геоинформационного моделирования туристско-рекреационного потенциала территории [29].

Методика:

Формирование оценки туристско-рекреационного потенциала по критериям: природный потенциал; транспортная инфраструктура; культурно-исторический потенциал и прочие.

4. Нейросетевой анализ. Chen Y. et al. Investigating the determinants of performance of artificial intelligence adoption in hospitality industry during COVID-19 [30].

Методика:

1) Использование искусственного интеллекта для анализа фотоотчетов (выявление пандусов, ширины дверных проемов).

2) Автоматизированная генерация отчетов о нарушениях.

5. Социокультурный подход. Hack-Polay D. et al. Barriers to the effective exploitation of migrants' social and cultural capital in hospitality and tourism: a Dual Labour Market Perspective [31].

Методика:

1) Исследование отношения персонала к МГН через анкетирование.

2) Разработка тренингов по этике общения для сотрудников гостиниц.

Таблица 2 – Сравнение подходов к оценке безбарьерной среды

№ п/п	Автор	Ключевой метод	Преимущества
1	Ronald L. Mace	Универсальный дизайн	Профилактика барьеров
2	Simon Darcy	Трехуровневая оценка	Комплексность
3	Павлюк Я.В., Алейников А.С.	ГИС-технологии, моделирование	Визуализация данных
4	Chen Y. et al	ИИ-анализ	Автоматизация
5	Hack-Polay	Социологические исследования	Учет человеческого фактора

Современные исследования сочетают современные компьютерные технические (ГИС, ИИ) и социальные методы, что позволяет комплексно оценивать доступность гостиниц при соблюдении концепции устойчивого биосферосовместимого города [32].

2. Модели и методы

Основными методами исследования являются:

- сравнительный анализ и синтез исходной информации;
- геопространственный анализ территории в среде ГИС;
- метод взвешенных критериев;
- визуальное обследование зданий гостиниц.

В качестве материалов исследования используются открытые данные из сети «Интернет» о гостиничной недвижимости на территории города.

Разработка методики информационного сопровождения безбарьерной среды в объектах гостиничной недвижимости имеет ключевое значение для развития инклюзивного туризма и создания комфортной среды для всех категорий гостей. Предлагаемая методика включает 6 этапов и представлена на рисунке 2.

Методика предназначена для осуществления мониторинга и информационного сопровождения городов на предмет обеспеченности гостиниц и гостиничных комплексов безбарьерным доступом для МГН. Ключевая особенность методики заключается в поэтапной систематизации информации (результатов обследования) и предоставления ее и визуализации в среде ГИС. Такой подход позволяет не только собирать информацию о гостиницах и их доступности, но и осуществлять пространственный анализ городской территории. Совмещение стандартных подходов таких как – визуальное обследование и современных геоинформационных систем позволяет собрать информацию о доступности гостиниц собрать в единую информационную базу. Разработанная база, визуализируемая с помощью ГИС, позволит принимать в дальнейшем управленческие и проектные решения по совершенствованию гостиниц, определению недостатков в инфраструктурном обеспечении городской территории для туризма, в том числе для МГН.

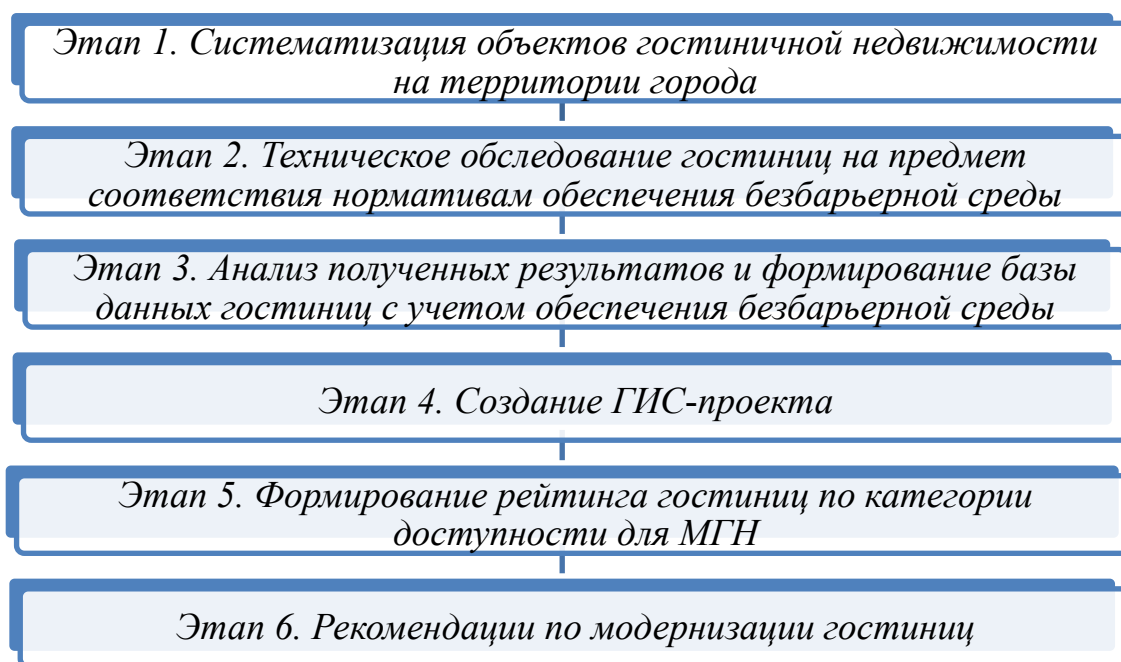


Рисунок 2 – Методика информационного сопровождения безбарьерной среды в объектах гостиничной недвижимости

Такой подход позволяет не только обеспечить соблюдение прав маломобильных групп населения на доступный отдых, но и открывает новые экономические перспективы для гостиничного бизнеса, расширяя потенциальную клиентскую базу.

Каждый этап выполняется последовательно. Именно такая последовательность позволяет собрать пространственную, техническую и визуальную информацию в единую базу данных. Стандартизированная система оценки дает возможность объективно анализировать состояние объектов, планировать их модернизацию и эффективно распределять ресурсы. Особую ценность представляет интеграция геоинформационных технологий, позволяющая создавать интерактивные карты доступности и автоматизировать сбор данных. Кроме того, такая система способствует совершенствованию нормативной базы и формированию прозрачных механизмов сертификации.

Методика носит прикладной характер и универсальна, так как связывает стандартные методы, и ГИС-технологии и может быть применена для любого города. Реализация разработанной методики представлена в следующем разделе подробно.

3. Результаты исследования и их анализ

Продemonстрируем реализацию разработанной методики для условий создания безбарьерной среды объектов гостиничной недвижимости города Ростова-на-Дону.

Этап 1. Систематизация объектов гостиничной недвижимости на территории города.

На первом этапе необходимо сформировать репрезентативную выборку гостиниц для анализа. Были определены границы исследования: выбраны гостиницы, которые имеют 15 номеров и более.

Был проведен сбор первичных данных из открытых источников: официальные реестры, сайты бронирования, данные муниципалитета. Классификации объектов проводилась по следующим параметрам: количество звезд, год открытия, ценовой диапазон, вместимость (количество номеров), рейтинг гостиниц.

В ходе анализа получили следующие результаты:

Рынок гостиничной недвижимости в Ростове-на-Дону ориентирован на средний класс (3-4 звезды), что соответствует потребностям как деловых, так и туристических клиентов (рис.3).

Активное развитие гостиничного бизнеса в Ростове-на-Дону пришлось на последние два десятилетия, что связано с ростом туризма и деловой активности в регионе (рис.4).

Рынок ориентирован на средний ценовой сегмент, что делает его доступным для широкого круга клиентов, включая туристов и деловых путешественников (рис.5).

Преобладание небольших и средних гостиниц указывает на фрагментированность рынка, где доминируют небольшие частные отели и мини-отели (рис.6).

Высокий средний рейтинг гостиниц указывает на хорошее качество услуг и удовлетворённость клиентов (рис.7).



Рисунок 3 – Распределение гостиниц по количеству звезд в г. Ростове-на-Дону



Рисунок 4 – Распределение гостиниц по году постройки в г. Ростове-на-Дону



Рисунок 5 – Распределение гостиниц по ценовому диапазону в г. Ростове-на-Дону



Рисунок 6 – Распределение гостиниц по количеству номеров в г. Ростове-на-Дону



Рисунок 7 – Распределение гостиниц по рейтингу в г. Ростове-на-Дону

Результат: структурированный перечень объектов (80 гостиниц) с базовыми характеристиками; диаграммы, построенные на анализе данных объектов.

Этап 2. Техническое обследование гостиниц на предмет соответствия нормативам обеспечения безбарьерной среды.

При проведении технического обследования были составлены акты обследования на основе СП 59.13330.2020 и проведена фотофиксация соответствия критериям доступности.

Обследование проводится по зонам, представленным в таблице 3, для 80 гостиниц, расположенных на территории г. Ростова-на-Дону. Пример фотофиксации обследования представлен в таблице 3 и на рисунке 8.

Таблица 3 – Критерии доступности, согласно СП 59.13330.2020

<i>№ п/п</i>	<i>Зона обследования</i>	<i>Критерии доступности</i>	<i>Нормативные требования</i>
1	Входная группа	Наличие пандуса/подъёмника	Обязательно
		Ширина дверных проёмов	≥90 см
		Тактильные плитки для слабовидящих	Рекомендовано СП 59.13330.2020
		Тактильная навигация для слабовидящих	Обязательно в общественных зонах
2	Общественные зоны	Ширина коридоров	≥1.5 м
		Лифты с голосовыми объявлениями	Обязательно для новых зданий
		Кнопки Браеля в лифтах	Обязательно
3	Номера для МГН	Площадь номера	≥20 м²
		Санузел с поручнями	Обязательно
		Свободный подход в санузеле (ширина ≥90 см)	Обязательно
		Высота кровати	45-50 см от пола
		Пространство для разворота коляски	≥1.5 м в диаметре
4	Вертикальные коммуникации	Наличие пандусов с допустимым уклоном	≤8% (1:12)
		Наличие противоскользящего покрытия	Обязательно
		Установка двусторонних поручней	высота 70-90 см

На рисунке 8 представлен акт обследования и фотофиксация отеля «Mercure Ростов-на-Дону Центр», располагающегося по адресу: г. Ростов-на-Дону, Ворошиловский пр., 35/107, в таблице 4 представлен сводный анализ акта обследования по этому же объекту исследования.

Результатом этапа являются заполненные акты обследования гостиниц с перечнем соответствий/нарушений. На дату 01.03.2025 обследованы 12 гостиниц.

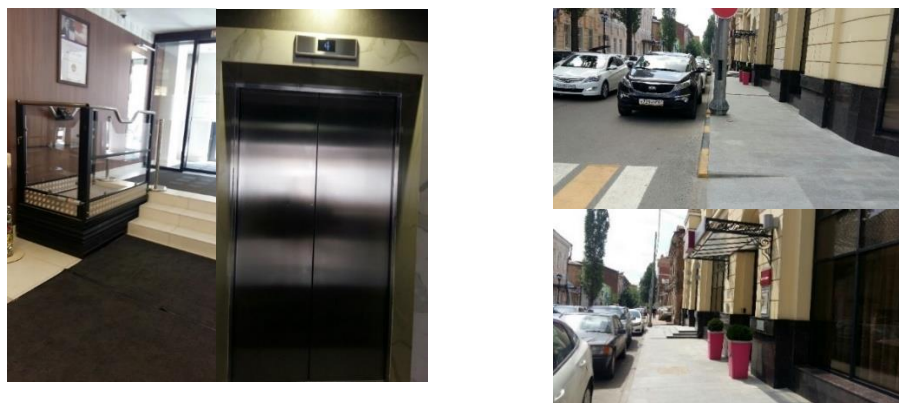


Рисунок 8 – Фотофиксация Отеля «Mercure Ростов-на-Дону Центр», располагающегося по адресу:
г. Ростов-на-Дону, Ворошиловский пр., 35/107

Таблица 4 – Сводный анализ акта обследования Отеля «Mercure Ростов-на-Дону Центр», располагающегося по адресу: г. Ростов-на-Дону, Ворошиловский пр., 35/107

№ п/п	Наименование зоны	Выполненные требования	Доля от общего количества требований
1	Территория, прилегающая к зданию (участок)	информация об объекте; калитки; условия движения; ширина пешеходного пути; съезды с тротуара на транспортный проезд; бордюры; покрытие пешеходных дорожек, тротуаров и пандусов	23 %
2	Вход (входы) в здание	вход, доступный для МГН; входная площадка при входах; ширину в свету; конструкция дверей	27 %
3	Путь (пути) движения внутри здания (в т.ч. пути эвакуации)	ширина пути движения; минимальное пространство; высота и ширина коридоров; ширина прохода в помещении; диаметр зоны для самостоятельного разворота на 180°; окраска дверей; ступени лестниц; ширина марша лестницы; подъемные платформ с наклонным перемещением для преодоления лестничных маршей; места обслуживания и постоянного нахождения МГН; ширина (в свету) участков эвакуационных путей	28 %
Общая доля выполнения требований:			78 %

Этап 3. Анализ полученных результатов и формирование базы данных гостиниц с учетом обеспечения безбарьерной среды.

Согласно анализу стандартного акта обследования СП 59.13330.2020 принято решение проранжировать все объекты в пределах трех категорий:

- «Соответствует» – все нормы соблюдены (полная доступность, 70-100% соответствия нормам);

- «Частично соответствует» – есть отдельные нарушения (требуется доработка, 40-70% соответствия);

- «Не соответствует» – критичные недочёты (узкие двери, отсутствие пандусов); непригодно для МГН (до 40 % соответствия).

Используемые методы при ранжировании и выделении категорий:

- присвоение баллов за каждый параметр;

- кластерный анализ для группировки объектов.

В результате получена матрица доступности объектов гостиничной недвижимости с цветовой маркировкой зелёный/жёлтый/красный (таблица 5). В примере продемонстрированы три объекта, обследованных:

1. Гостиничный комплекс «Парк Сити»
2. Отель «Mercure Ростов-на-Дону Центр»
3. Гостиница Эрмитаж.

Таблица 5 – Матрица доступности с цветовой маркировкой (зелёный/жёлтый/красный)

Название	Адрес	Номер здания	Зона 1 СП 59.13330.2020 Раздел 4 Процент соответствия	Зона 2 СП 59.13330.2020 Раздел 5.1 Процент соответствия	Зона 3 СП 59.13330.2020 Раздел 5.2 Процент соответствия	ИТОГО процент соответствия 59.13330.2020
Гостиничный комплекс «Парк Сити»	Закруткина ул.	67а.26	8	27	Нет доступа	35
Отель «Mercure Ростов-на-Дону Центр»	Проспект Ворошиловский	35/107	23	27	28	78
Гостиница Эрмитаж.	Ульяновская ул.	54	8	27	19	54

В Матрице доступности:

- Красный - проект не соответствует требованиям СП 59.13330.2020;
- Желтый – частично соответствует требованиям СП 59.13330.2020;
- Зеленый – соответствует требованиям СП 59.13330.2020.

Этап 4. Создание ГИС-проекта. Основными преимуществами создания ГИС-проекта являются возможности пространственных информационных систем:

- визуализация данных на электронной карте города;
- фильтр, категорирование и визуализация пространственного распределения гостиниц по критериям доступности;
- интеграция с сервисами бронирования.

В качестве базовых платформ для разработки проекта могут быть использованы программные продукты QGIS и ArcGIS Online. Пространственный анализ размещения гостиниц можно осуществлять относительно следующих критериев:

- Уровень доступности.
- Наличие адаптированных номеров.
- Близость к объектам социальной инфраструктуры.

Результат реализации этапа: электронная карта с возможностью поиска для МГН.

На данный момент создана карта с местоположением гостиниц и базой данных, внесенной в атрибутивную таблицу слоя «Гостиницы» (рис.9, рис. 10).

База данных включает в себя следующий перечень данных:

1. Наименование гостиницы
2. Адрес местоположения
3. Количество звезд
4. Цена за сутки пребывания
5. Количество номеров
6. Рейтинг (по данным сайта <https://101hotels.com>).



Рисунок 9 – Карта с местоположением гостиниц в г. Ростов-на-Дону и базой данных

FID	Shape *	Id	Name	Address	Stars	Price	Room	Year	Rating
0	Точка	0	Гостиничный комплекс «Петровский п	Левобережная ул., 45	5	9400	61	2014	9,7
1	Точка	0	Конгресс-отель Don-Plaza	ул. Большая Садовая, д. 115	4	3500	254	1973	8,9
2	Точка	0	Гостиничный комплекс «Парк Сити»	Закруткина ул., 67в/26	4	2590	27	2007	9,1
3	Точка	0	Ramada by Wyndham Rostov-on-Don Hot	ул. Малюгиной, д. 119	4	5000	72	2017	9,3
4	Точка	0	Конгресс-отель «Топос»	Михаила Нагибина пр., 30	3	4620	150	2018	9,1
5	Точка	0	Гостинично-ресторанный комплекс «	9-я Линия ул., 13	4	5049	23	2005	9,3
6	Точка	0	Отель «Hyatt Regency Rostov DON-PLA	Большая Садовая ул., 121	5	11900	187	2021	9,5
7	Точка	0	Отель «Европа»	Ворошиловский пр., 41/112	4	3960	51	0	8,7
8	Точка	0	Парк-отель «Жардин»	Левобережная ул., 50	3	4200	29	2004	9,1
9	Точка	0	Отель «Mecure Rostov-na-Donu Цент	Ворошиловский пр., 35/107	4	6500	89	2014	9,3
10	Точка	0	Конгресс-отель «Амакс»	Михаила Нагибина пр., 19	3	3320	280	1979	8,9
11	Точка	0	Парк-отель «Надежда»	Подъездная ул., 55	3	4950	130	2013	9,3

Рисунок 10 – Атрибутивная таблица с базой данных гостиниц Ростова-на-Дону

Этап 5. Формирование рейтинга гостиниц по категории доступности для МГН.

Основными параметрами составления рейтинга являются:

- категория, присеваемая в результате обследования соответствия нормам;
- наличие дополнительных услуг (аренда колясок, услуги сурдоперевода);
- отзывы МГН.

Методами исследования являются в рамках этапа:

- Метод взвешенных критериев;
- Публикация в открытых источниках (сайт мэрии, туристические порталы).

Результат этапа: ТОП-10 самых доступных гостиниц города по соответствию критериям обеспеченности и соответствию нормам безбарьерной среды.

Этап 6. Рекомендации по модернизации гостиниц.

В рамках шестого этапа для объектов гостиничной недвижимости, входящих в категорию «частично соответствует» разрабатываются предложения (мероприятия и рекомендации): технические решения (установка поручней, перепланировка),

информационные меры (обучение персонала, маркировка зон), план адаптации (установка поручней, перепланировка).

В случае, если гостиница попадает в категорию «не соответствует» вносятся предложения по реконструкции и модернизации здания, чтобы объект смог попасть в категорию «частично соответствует».

Основными инструментами реализации этапа являются подготовка сметы расходов и поэтапного плана модернизации (сроки, ответственные).

Основные результаты реализации методики информационного сопровождения безбарьерной среды в объектах гостиничной недвижимости в городе Ростове-на-Дону представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результат реализации методики информационного сопровождения безбарьерной среды в объектах гостиничной недвижимости в городе Ростове-на-Дону

№ п/п	Наименование этапа	Достигнутый результат
1	Систематизация объектов гостиничной недвижимости на территории города	сформирован список из 80 гостиниц Ростова-на-Дону
2	Техническое обследование гостиниц на предмет соответствия нормативам обеспечения безбарьерной среды	акты обследования гостиниц с перечнем соответствий/нарушений. Обследовано 12 объектов
3	Анализ полученных результатов и формирование базы данных гостиниц с учетом обеспечения безбарьерной среды	матрица доступности с цветовой маркировкой (зелёный/жёлтый/красный). Проанализировано 12 объектов, в пример вынесено – 3.
4	Создание ГИС-проекта	Составлена электронная карта с местоположением гостиниц и базой данных. Нанесено и заполнена таблица атрибутов по 80 гостиницам.
5	Рейтинг гостиниц	В разработке
6	Рекомендации по модернизации	В разработке

Разработанная методика позволяет систематизировать данные о доступности гостиниц, создать прозрачную систему оценки и стимулировать их владельцев к модернизации, а органам исполнительной власти, курирующим туристический комплекс, иметь полную информацию о состоянии и привлекательности этих объектов для МГН.

4. Заключение

1. В рамках рассматриваемой работы разработана методика информационного сопровождения безбарьерной среды в объектах гостиничной недвижимости, позволяющая оптимизировать процесс управления данными объектами и осуществлять объективный анализ обеспеченности территории города. Реализация методики продемонстрирована на примере города Ростова-на-Дону, в котором обследовано 12 гостиниц из 80.

2. Создан ГИС-проект для города Ростова-на-Дону, включающий в себя базу данных гостиниц (все 80 внесены в базу данных) и отображающий состояние доступности этих объектов для МГН (обследовано 12). Оценка доступности представлена по категориям, отображенным на карте по цветам:

- Красный - не соответствует требованиям СП 59.13330.2020;
- Желтый - частично соответствует требованиям СП 59.13330.2020;
- Зеленый – соответствует требованиям СП 59.13330.2020.

Внедрение ГИС-проекта и рейтинговой системы повысит туристическую привлекательность региона для МГН. Практическая значимость ГИС-проекта состоит в привлекательности для:

- туристов – удобный поиск доступных гостиниц.
- бизнеса – инструмент повышения конкурентоспособности.
- властей – основа для программ субсидирования адаптации объектов.

3. Преимуществом разработанной методики является детальная проработка каждого этапа, обеспечивающая:

- объективность – за счёт стандартизированных чек-листов, актов обследования доступности объектов для МГН;
- прозрачность – в случае публикации рейтингов в открытом доступе;
- практическую реализуемость – благодаря использованию ГИС-инструментов.

4. Перспективность дальнейшей разработки исследования. Данная методика требует формирования структурированного комплекса мероприятий для реконструкции гостиниц с учетом требований по обеспечению доступной среды. Методика является универсальной и может быть применена для других городов Российской Федерации.

5. Благодарности

Работа подготовлена в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакаева Н.В., Гордон В.А., Черняева И.В. Методика оценки доступности зданий и сооружений маломобильным группам населения // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14. №3. С. 157-166. doi: 10.17673/Vestnik.2024.03.20
2. Курганова К.И. Проблемы формирования доступной среды для инвалидов и маломобильных групп населения // Журнал правовых и экономических исследований. 2023. №1. С. 230-235.
3. Lacey A. Designing for Accessibility. London: RIBA, 2004. 70 p.
4. Singhal M. Barrier Free Built Environment for the Disabled // Journal of Indian Institute of Architects. 2005. V. 70. I. 10. P. 29-30.
5. Егорова И.Н., Солоп И.А., Чеботарева Е.А. Развитие системы транспортно-логистической инфраструктуры для маломобильных групп населения на примере железнодорожных вокзальных комплексов юга России // Логистика. 2025. №2(219). С. 28-34.
6. Шнурникова Е.П., Горзова С.П., Кононенко В.В. Реконструкция городской застройки с учетом доступности маломобильных групп населения на примере г. Краснодара // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. №7. С. 1069-1078. doi: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078
7. Пилипенко О.В., Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Борисов М.В. Методика оценки доступности социально-значимых объектов экологически безопасного биосферно-совместимого города // Строительство и реконструкция. 2019. №4. С. 101-114. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-84-4-101-114>
8. Субботин О.С. Концептуальная модель оценки доступности объектов архитектурного наследия Кубани // Жилищное строительство. 2022. №8. С. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-8-22-27>
9. Ovchinnikov Ya.A., Krivogina D.N. Development of a mechanism for comprehensive assessment of the infrastructure facility for compliance with the requirements of low-mobility groups of the population // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. No.3(45). P. 85-91. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-45-3-85-91
10. Шагмуратова А.А., Ковин И.А. Методика оценки условий доступности маломобильных групп населения на территориях объектов здравоохранения: анализ вероятностного использования территории Тольяттинской городской клинической больницы №5 // Вестник евразийской науки. 2023. Т.15. №2.
11. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Вопросы комфортности и безопасности городской среды и их решение в рамках законодательных и нормативных документов // Строительство и реконструкция. 2021. №2. С. 74-85. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-74-85>
12. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Гордон В.А., Бакаева Н.В. Количественная оценка принципов преобразования городов в биосферосовместимые // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сборник научных трудов РААСН. Том 1. Москва: Издательство АСВ, 2022. С. 197-206.
13. Солдаткина М.А., Шарипова Э.Р. Формирование доступной среды в гостиницах для лиц с ограниченными возможностями в Российской Федерации и за рубежом // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. 2019. Т.13. №2. С. 159-164.
14. ISO/TC 228 «Tourism and related services» [Электронный ресурс]. URL: <https://committee.iso.org/home/tc228>
15. International Building Code 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://codes.iccsafe.org/content/ibc2018>
16. BS8300-2009 + A1:2010 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocID=295005>

17. Bauordnung für Berlin 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ak-berlin.de/fachkompetenzen/fachthemen/gesetze-normen-und-verordnungen/bauordnung-berlin.html>
18. UNWTO Recommendations on Accessible Tourism for All [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unwto.org/archive/global/publication/unwto-recommendations-accessible-tourism-all>
19. Офицера Н.А., Солнцева О.Г., Цунаева Ю. Формирование безбарьерной среды для развития доступного туризма: отечественный и зарубежный опыт // Вестник университета. 2018. №1. С. 90-95.
20. ГОСТ Р 55699-2013 Доступные средства размещения для туристов с ограниченными физическими возможностями. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014.
21. СП 35-101-2001 Проектирование зданий и сооружений с учетом доступности для маломобильных групп населения. Общие положения. Введ. 16.06.2001.
22. СП 59.13330.2012 Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001. Введ. 01.01.2013.
23. ГОСТ 32613-2014 «Туристские услуги. Услуги туризма для людей с ограниченными физическими возможностями. Общие требования» [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115693>
24. Магомедова А.Г. Проблемы формирования доступной среды для инвалидов // Юридический вестник Дагестанского государственного университета. 2020. Т.36. №4. С. 117-122.
25. Радыгина Е.Г. Создание безбарьерной среды в средствах размещения для гостей с ограниченными возможностями // Концепт. 2014. №05 (май). ART 14120. URL: <http://e-koncept.ru/2014/14120.htm>
26. Ухина Т.В., Полякова О.Н. Безбарьерная среда в гостиничном бизнесе: проблемы и перспективы // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. 2023. Т.17. №1. С. 225-235.
27. Mace R. Universal design: Barrier free environments for everyone // Designers West. 1985. Т.33. №1. С. 147-152.
28. Darcy S. Accessible tourism: Concepts and issues. Channel View Publications, 2011.
29. Павлюк Я.В., Алейников А.С. Особенности геоинформационного моделирования туристско-рекреационного потенциала (на примере Белгородской области) // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. 2019. Т.5. №2. С. 36-45. doi: 10.18413/2408-9338-2019-5-2-0-4
30. Chen Y. et al. Investigating the determinants of performance of artificial intelligence adoption in hospitality industry during COVID-19 // International Journal of Contemporary Hospitality Management. 2023. Т.35. №8. С. 2868-2889.
31. Hack-Polay D. et al. Barriers to the effective exploitation of migrants' social and cultural capital in hospitality and tourism: a Dual Labour Market Perspective // Journal of Hospitality and Tourism Management. 2022. Т.50. С. 168-177.
32. Власов Д.Н., Данилина Н.В. Концепции устойчивого развития территорий // Архитектура и строительство России. 2023. №2(246). С. 8-9. doi: 10.55394/02357259_2023_2_8
33. Zilberova I., Petrov K., Lamy K.H. Innovation Intelligent Control Systems in Construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol.1079. No.3. P. 032087. doi: 10.1088/1757-899x/1079/3/032087
34. Федоровская А.А., Петров К.С., Мазанов Н.В. [и др.] Организационно-управленческие решения по перспективному размещению объектов социальной инфраструктуры // Инженерный вестник Дона. 2024. №7(115). С. 392-400.
35. Tolochko O.R. Comfortable living environment as a priority for regional development // Real Estate: Economics, Management. 2024. No.4. P. 12-18.
36. Писарская С.Г., Машенко Е.А. Особенности реконструкции номерного фонда городского исторического отеля класса люкс на примере отеля "Метрополь" в Москве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т.20. №5. С. 78-91.

REFERENCES

1. Bakaeva N.V., Gordon V.A., Chernyaeva I.V. Methodology for assessing accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2024. Vol. 14. No. 3. Pp. 157-166. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.20 (rus)
2. Kurganova K.I. Problems of forming accessible environment for disabled and people with limited mobility. *Zhurnal pravovyykh i ekonomicheskikh issledovaniy*. 2023. No. 1. Pp. 230-235. (rus)
3. Lacey A. Designing for Accessibility. London: RIBA, 2004. 70 p.
4. Singhal M. Barrier Free Built Environment for the Disabled. *Journal of Indian Institute of Architects*. 2005. Vol. 70. No. 10. Pp. 29-30.
5. Egorova I.N., Solop I.A., Chebotareva E.A. Development of transport and logistics infrastructure for people with limited mobility using the example of railway station complexes in southern Russia. *Logistika*. 2025. No. 2(219). Pp. 28-34. (rus)

6. Shnurnikova E.P., Gorzova S.P., Kononenko V.V. Urban development reconstruction considering accessibility for people with limited mobility: case study of Krasnodar. *Vestnik MGSU*. 2024. Vol. 19. No. 7. Pp. 1069-1078. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078 (rus)
7. Pilipenko O.V., Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Borisov M.V. Methodology for assessing accessibility of socially significant facilities in environmentally safe biosphere-compatible cities. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No. 4. Pp. 101-114. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-101-114 (rus)
8. Subbotin O.S. Conceptual model for assessing accessibility of architectural heritage sites in Kuban region. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2022. No. 8. Pp. 22-27. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-8-22-27 (rus)
9. Ovchinnikov Ya.A., Krivogina D.N. Development of a mechanism for comprehensive assessment of the infrastructure facility for compliance with the requirements of low-mobility groups of the population. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya*. 2023. No. 3(45). Pp. 85-91. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-45-3-85-91 (rus)
10. Shagimuratova A.A., Kovin I.A. Methodology for assessing accessibility conditions for people with limited mobility in healthcare facilities: analysis of probable use of territory of Togliatti City Clinical Hospital No. 5. *Vestnik yevraziyskoy nauki*. 2023. Vol. 15. No. 2. (rus)
11. Il'ichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Issues of urban environment comfort and safety and their solution in legislative and regulatory documents. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 2. Pp. 74-85. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-74-85 (rus)
12. Il'ichev V.A., Kolchunov V.I., Gordon V.A., Bakaeva N.V. Quantitative assessment of principles for transforming cities into biosphere-compatible ones. *Fundamental'nyye, poiskovyie i prikladnyye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu*. Moscow: ASV Publ., 2022. Pp. 197-206. (rus)
13. Soldatkina M.A., Sharipova E.R. Formation of accessible environment in hotels for people with disabilities in Russia and abroad. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa*. 2019. Vol. 13. No. 2. Pp. 159-164. (rus)
14. ISO/TC 228 "Tourism and related services". Available at: <https://committee.iso.org/home/tc228> (accessed: 03.06.2024)
15. International Building Code 2018. Available at: <https://codes.iccsafe.org/content/ibc2018> (accessed: 03.06.2024)
16. *BS8300-2009 + A1:2010*. Available at: <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocID=295005> (accessed: 03.06.2024)
17. Bauordnung für Berlin 2016. Available at: <https://www.ak-berlin.de/fachkompetenzen/fachthemen/gesetze-normen-und-verordnungen/bauordnung-berlin.html> (accessed: 03.06.2024)
18. UNWTO Recommendations on Accessible Tourism for All. Available at: <https://www.unwto.org/archive/global/publication/unwto-recommendations-accessible-tourism-all> (accessed: 03.06.2024)
19. Ofitserova N.A., Solntseva O.G., Tsunayeva Yu. Formation of barrier-free environment for accessible tourism development: domestic and foreign experience. *Vestnik universiteta*. 2018. No. 1. Pp. 90-95. (rus)
20. Accessible accommodation facilities for tourists with limited physical abilities. General requirements. GOST R 55699-2013. Moscow: Standartinform, 2014. (rus)
21. Design of buildings and structures considering accessibility for people with limited mobility. General provisions. SP 35-101-2001. Introduced 16.06.2001. (rus)
22. *Accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. Updated edition of SNiP 35-01-2001*. SP 59.13330.2012. Introduced 01.01.2013. (rus)
23. Tourist services. Tourism services for people with limited physical abilities. General requirements. GOST 32613-2014. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200115693> (accessed: 03.06.2024) (rus)
24. Magomedova A.G. Problems of forming accessible environment for disabled people. *Yuridicheskiy vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020. Vol. 36. No. 4. Pp. 117-122. (rus)
25. Radygina E.G. Creating barrier-free environment in accommodation facilities for guests with disabilities. *Kontsept*. 2014. No. 05. ART 14120. Available at: <http://e-koncept.ru/2014/14120.htm> (accessed: 03.06.2024) (rus)
26. Ukhina T.V., Polyakova O.N. Barrier-free environment in hotel business: problems and prospects. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa*. 2023. Vol. 17. No. 1. Pp. 225-235. (rus)
27. Mace R. Universal design: Barrier free environments for everyone. *Designers West*. 1985. Vol. 33. No. 1. Pp. 147-152.
28. Darcy S. Accessible tourism: Concepts and issues. Channel View Publications, 2011.
29. Pavlyuk Ya.V., Aleynikov A.S. Features of geoinformation modeling of tourist and recreational potential (case study of Belgorod region). *Nauchnyy rezul'tat. Tekhnologii biznesa i servisa*. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 36-45. DOI: 10.18413/2408-9338-2019-5-2-0-4 (rus)
30. Chen Y. et al. *Investigating the determinants of performance of artificial intelligence adoption in hospitality industry during COVID-19*. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. 2023. Vol. 35. No. 8. Pp. 2868-2889.

31. Hack-Polay D. et al. Barriers to the effective exploitation of migrants' social and cultural capital in hospitality and tourism: a Dual Labour Market Perspective. *Journal of Hospitality and Tourism Management*. 2022. Vol. 50. Pp. 168-177.
32. Vlasov D.N., Danilina N.V. Concepts of sustainable development of territories. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2023. No. 2(246). Pp. 8-9. DOI: 10.55394/02357259_2023_2_8 (rus)
33. Zilberova I., Petrov K., Lamy K.H. Innovation Intelligent Control Systems in Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. No. 3. 032087. DOI: 10.1088/1757-899x/1079/3/032087
34. Fedorovskaya A.A., Petrov K.S., Mazanov N.V. et al. Organizational and managerial solutions for prospective placement of social infrastructure facilities. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2024. No. 7(115). Pp. 392-400. (rus)
35. Tolochko O.R. Comfortable living environment as a priority for regional development. *Real Estate: Economics, Management*. 2024. No. 4. Pp. 12-18.
36. Pisarskaya S.G., Mashchenko E.A. Features of reconstruction of room stock in urban historic luxury hotels: case study of "Metropol" hotel in Moscow. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018. Vol. 20. No. 5. Pp. 78-91. (rus)

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.

Калайчева Екатерина Сергеевна

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

Шейна 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 A.

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.

Kalajcheva Ekaterina S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University", Rostov-on-Don, Russia,
Master's student of the Department of "Urban Construction and Economy"
E-mail: esskatena@mail.ru

Sheina Svetlana G.

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.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025
Одобрена после рецензирования 21.07.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 19.05.2025
Approved after reviewing 21.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025

С.В. ФЕДОСОВ¹, И.С. ПУЛЯЕВ², О.В. АЛЕКСАНДРОВА^{1*}, А.Н. МИТЯГИНА²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия²Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ МАССИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Массивные железобетонные конструкции – фундаменты, стены, перекрытия, ригели, тела мостовых опор, плотины – подвержены значительным температурным деформациям из-за экзотермии бетона и внешнего теплового воздействия. Неравномерное распределение температур по массиву конструкции приводит к возникновению температурных напряжений, которые могут вызвать трещинообразование в бетоне и приводить к снижению долговечности конструкции. Теплофизическое моделирование позволяет с большой долей вероятности прогнозировать температурные поля возводимых конструкций и напряжения на этапе проектирования, оптимизируя технологии бетонирования (скорость оборачиваемости опалубки, термообработку, состав бетонной смеси и проч.). Методологическую основу исследования составляют: теория нестационарного нелинейного теплопереноса, подходы механики деформируемого твердого тела, позволяющие моделировать напряженно-деформируемое состояние массивных конструкций с учетом сопряженных термических, фазовых и химических процессов. При твердении бетона происходит экзотермическая реакция гидратации компонентов цемента, сопровождающаяся выделением тепла. В массивных конструкциях из-за низкой теплопроводности бетона тепло аккумулируется, что приводит к: неравномерному прогреву; температурным деформациям (расширению при нагреве и сжатию при остывании); возникновению напряжений из-за ограниченной свободы деформирования. Моделирование процессов теплопереноса позволяет прогнозировать температурные поля и напряжения, оптимизировать технологии бетонирования и предотвращать разрушение конструкций. Современные вычислительные методы обеспечивают высокую точность расчетов, что особенно важно для ответственных сооружений (плотин, мостов, фундаментов АЭС).

Ключевые слова: железобетонные конструкции, процессы теплопереноса, технология бетонирования, напряженно-деформируемое состояние.

S.V. FEDOSOV¹, I.S. PULYAEV², O.V. ALEKSANDROVA^{1*}, A.N. MITYAGINA²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN CONCRETING OF MASSIVE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. Massive reinforced concrete structures – foundations, walls, floors, crossbars, bridge support bodies, dams – are subject to significant temperature deformations due to concrete exothermy and external thermal effects. Uneven temperature distribution over the structure leads to the occurrence of temperature stresses, which can cause cracking in concrete and lead to a decrease in the durability of the structure. Thermophysical modeling makes it possible to predict with a high degree of probability the temperature fields of structures under construction and stresses at the design stage, optimizing concreting technologies (the rate of turnover of the formwork, heat treatment, the composition of the concrete mixture, etc.).

© Федосов С.В., Пуляев И.С., Александрова О.В., Митягина А.Н., 2025

The methodological basis of the research consists of the theory of unsteady nonlinear heat and mass transfer, approaches of mechanics of deformable solids, which allow modeling the stress-strain state of massive structures, taking into account the associated thermal, phase and chemical processes. When concrete hardens, an exothermic reaction of cement hydration occurs, accompanied by the release of heat. In massive structures, due to the low thermal conductivity of concrete, heat accumulates, which leads to: uneven heating; temperature deformations (expansion during heating and compression during cooling); stress due to limited freedom of deformation. Modeling of heat transfer processes makes it possible to predict temperature fields and stresses, optimize concreting technologies, and prevent structural failure. Modern computational methods ensure high accuracy of calculations, which is especially important for critical structures (dams, bridges, foundations of nuclear power plants).

Keywords: reinforced concrete structures, heat and mass transfer processes, concreting technology, stress-strain state.

1. Введение

В строительной отрасли проблемы долговечности становятся все более актуальными. Это объясняется тем, что строительные объекты инфраструктуры, возведенные в середине прошлого века в настоящее время в ветхом (аварийном), состоянии. В западных странах в настоящее время расходуется около 50 процентов строительного бюджета на ремонт, реконструкцию и восстановление строительных объектов и сооружений. В конструкциях, эксплуатирующихся в агрессивных (неблагоприятных) условиях, работающих в интенсивном (форсированном) режиме; пролеты мостов, высотные и большепролетные здания, гидротехнические сооружения, туннели, береговые сооружения, процессы разрушения начинают проявляться в более ранние сроки эксплуатации, что приводит к сокращению проектных сроков службы.

Анализ современных нормативных и проектных документов, регламентирующих строительство объектов транспортной инфраструктуры и промышленных сооружений, выявил недостаточную проработку вопросов учета температурного фактора при формировании эксплуатационных свойств бетона, включая долговечность и надежность возводимых конструкций [1 - 3].

Эмпирические данные, полученные в ходе строительства искусственных сооружений [4, 5], демонстрируют, что пренебрежение температурными воздействиями на стадии проектирования приводит к возникновению дефектов и трещинообразования в бетонных конструкциях, что обуславливает существенные временные и финансовые затраты на их устранение.

Установлено, что минимизация негативных последствий температурных колебаний требует комплексного учета как микронапряжений в бетонной матрице, так и макронапряжений в конструкции в целом. Разработанные на этой основе мероприятия направлены на предотвращение трещинообразования и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик бетона [6].

В настоящей статье представлены ключевые решения, реализованные при проектировании исследуемого объекта с целью оптимизации температурного фактора и повышения долговечности бетонных конструкций.

Традиционно [7, 8, 9], при проектировании технологических стадий производства массивных железобетонных конструкций и изделий одним из основных этапов расчёта является выполнение расчётов по определению прогнозного срока долговечности конструкций. Важными этапами этих расчётов, выбора технологических принципов, а также температурно-влажностных параметров для проведения операций бетонирования на начальном этапе развития являются гидратационные процессы и структурообразование в бетонируемой субстанции [4, 10, 11].

В публикациях по тематике производства строительных материалов [12] и технологиям возведения строительных объектов [13] справедливо отмечается, что структурирование и

набор прочности сопровождаются тепловыми эффектами реакций гидратации компонентов - составляющих цементной смеси, которые, с одной стороны, способствуют ускорению процессов твердения, а с другой стороны, структурирование твёрдой фазы и связывание воды в гидросиликаты, зачастую сопровождаются процессами усадки, ползучести.

Всё это происходит во многом вследствие возникновения и развития температурных напряжений в твёрдой фазе. Работы в этом направлении представлены в известных публикациях [14 - 20]. Отметим особо работы учёных Донского ГУ [21, 22], в которых исследуются проблемы формирования напряжённо-деформированного состояния в массивных фундаментных плитах.

Авторами настоящей статьи [6, 23, 24] также изучались вопросы учёта собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона при обеспечении требуемых эксплуатационных свойств конструкций [25].

В настоящей работе рассматриваются проблемы математического моделирования процессов нестационарного теплопереноса бетона железобетонной массивной конструкции.

2. Модели и методы

В основу методов математического анализа изучаемых процессов положены фундаментальные представления физико-математических принципов теории нелинейных нестационарных процессов взаимосвязанного тепломассопереноса [20], а также теорий и методов механики деформируемого твёрдого тела [26] в направлении динамики напряжённо-деформируемого состояния массивных объёмов конечных геометрических размеров, осложнённых явлениями термических фазовых и химических превращений.

Теория нелинейных нестационарных процессов взаимосвязанного тепломассопереноса базируется на системе сопряжённых дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих перенос тепла и массы в условиях их взаимного влияния. Фундаментальную основу составляют:

1. Уравнение энергии (нестационарное уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_{\text{гидр}} + Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{хим}} - \rho c_p (v \nabla T), \quad (1)$$

где ρ - плотность материала; c_p - удельная теплоёмкость, λ - коэффициент теплопроводности; $Q_{\text{гидр}}$, $Q_{\text{фаз}}$, $Q_{\text{хим}}$ - источники тепла, обусловленные гидратацией, фазовыми и химическими превращениями соответственно, а последнее слагаемое учитывает конвективный перенос тепла.

2. Уравнение массопереноса (обобщённый второй закон Фика):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla(D_i \nabla C_i) + R_i(T, C) - \nabla(v C_i), \quad (2)$$

где C_i - концентрация компонента i ; D_i - коэффициент диффузии; $R_i(T, C)$ - скорость химической реакции, зависящая от температуры и состава, а последний член описывает конвективный перенос массы.

3. Результаты исследования и их анализ

Процессы твердения бетонного раствора в форме опалубки сопровождаются явлениями гидратации основных составляющих цемента, тепловыми эффектами реакций гидратации. И всё это сопровождается непрерывным изменением по координатам и во времени как теплофизических, плотность - ρ , теплоёмкость - c , теплопроводность - λ , температуропроводность - a ; так и физико-механических характеристик: модуль упругости - E , модуль сдвига - G , коэффициент Пуассона - ν .

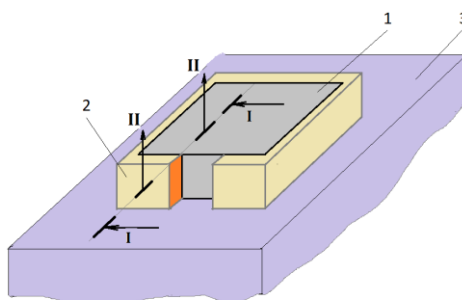


Рисунок 1 - Иллюстрация фундаментной плиты:

1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; I-I, II-II – выделенные сечения к рисунку 2

На рисунке 1 приведена иллюстрация фундаментной плиты, часто применяемой в мостовом и дорожном строительстве [27].

В общем случае, в трёхмерной постановке задача развития динамики температурного поля с учётом теплового эффекта реакций гидратации цементных компонентов запишется следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (a \cdot \nabla t) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z). \quad (4)$$

В большинстве технологических процессов тепловой обработки строительных материалов и изделий температура внутренних слоёв материала не достигает значений выше 100°C. В противном случае в отдельных частях объёма конструкции может происходить неконтролируемое вскипание воды затворения. А это явление способно приводить к изменению технологического параметра: водоцементного отношения - В/Ц. Результатом станет отклонение кинетики процесса от заданных параметров. В свою очередь, следствием таких отклонений станет невозможность достижения массивом заданных значений прочностных показателей, и значит, к экономическим потерям, как заказчика, так и производителя.

Возвращаемся к теоретической постановке задачи исследования. В одномерной постановке, например, для осей X и Y задача нестационарного теплопереноса может быть рассмотрена в симметричной постановке:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a(x, \tau) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{q_{VT}(\tau)}{\rho(t)c(t)}. \quad (5)$$

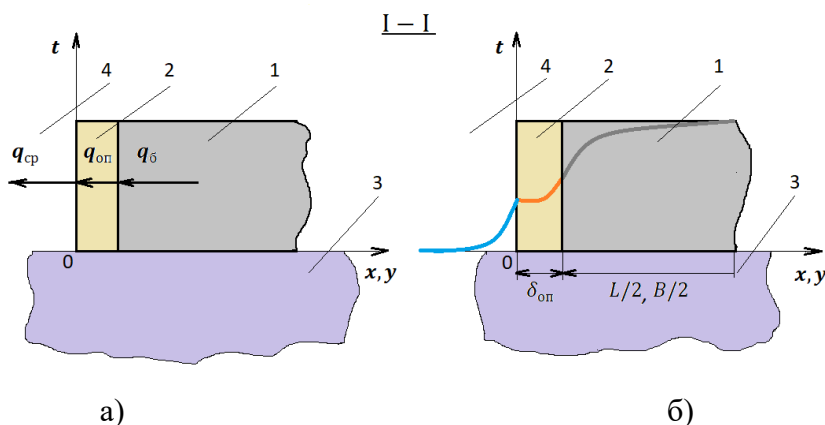


Рисунок 2 - Фрагмент системы «бетон-опалубка» в сечении I – I:

а) плотности тепловых потоков, б) график профиля температур в плоскости координат X – Y;
1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; 4 - внешняя среда

Обратимся к рисунку 2, который показывает фрагмент системы «бетон – опалубка». Условия теплообмена фрагмента опалубки с окружающей средой в общем случае характеризуются граничным условием III - го рода:

$$\alpha[t_c(\tau) - t_{оп}(x^*, \tau)] = \lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=0} + q_{VT}, \quad (6)$$

здесь, величина $t_{оп}(x^*, \tau)$ обозначает температуру материала опалубки в точке с координатой $x^* = 0$ (здесь x^* - координата в отрицательном направлении); $\lambda_{оп}$ - коэффициент теплопроводности материала опалубки.

На внутренней поверхности опалубки условия теплового взаимодействия значительно осложняются и записываются в форме граничных условий IV - го рода:

$$t_{оп}(x^*, \tau) \Big|_{x^*=\delta_{оп}} = t(x, \tau) \Big|_{x=\frac{B}{2}}, \quad (7)$$

$$-\lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=\delta_{оп}} = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{B}{2}}. \quad (8)$$

Для упрощения записи уравнение (8) может быть представлено в следующем виде:

$$q_{оп}(\tau) = -\lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=\delta_{оп}}, \quad (9)$$

$$q(\tau) = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{B}{2}}. \quad (10)$$

Аналогичным образом запишется краевая задача нестационарного теплопереноса для координаты Y . Отличие будет заключаться в физическом размере координаты граничного условия. А именно: при обозначении размеров плиты $L \times B \times H$ на границе бетонного массива плиты с опалубкой будет: $Y = L/2$.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности по оси Z запишется по уже принятой форме:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[a(z, \tau) \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \right] + \frac{q_{VT}(\tau)}{\rho(t)c(t)}. \quad (11)$$

Начальное условие также запишется по аналогии:

$$t(z, \tau) = t_0(z). \quad (12)$$

В то же время, на границах бетонного массива по вертикальной координате Z условия теплового взаимодействия будут существенно отличаться от предыдущих (см. рисунок 3).

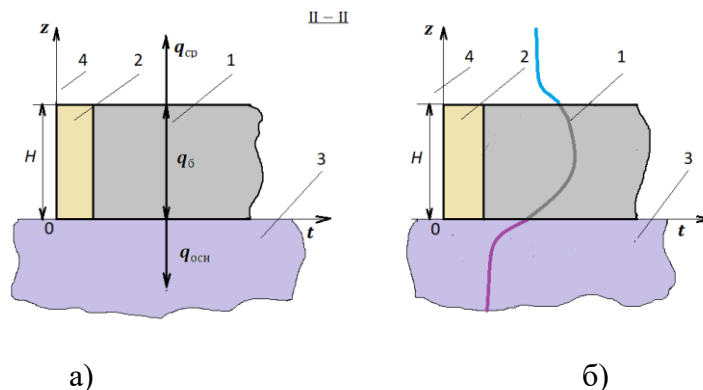


Рисунок 3 - Фрагмент системы «бетон-опалубка» в сечении II-II:

а) плотности тепловых потоков; б) график профиля температур, по координате Z ; 1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; 4- внешняя среда

Во-первых, как правило [4, 28, 29], при строительстве мостов и асфальтодорожных покрытий бетонная смесь укладывается на предварительно подготовленную площадку из уплотнённого сыпучего материала.

Кроме того, для условий данного случая задача не может быть представлена в симметричной постановке. Для этого случая, в качестве первого приближения можно принять допущение:

$$t(z, \tau)|_{z=0} = \varphi(\tau). \quad (13)$$

На верхней границе массива условия теплового взаимодействия также могут быть различны в зависимости как от температурно-влажностных состояний среды эксплуатации, так и поставленных заказчиком технических условий. Примем, в первом приближении, заданный закон изменения температуры поверхности. С учётом изложенного, краевая задача нестационарного теплопереноса по оси Z может быть представлена основным уравнением (11), начальным условием (12), граничным условием для $z = 0$ - уравнение (13), и граничным условием для верхней поверхности, – в общем случае, условие III-го рода:

$$\alpha[t_c - t(z, \tau)]|_{z=H} = -\lambda \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} |_{z=H}; \quad (14)$$

– в частном случае, условие I-го рода:

$$t(z, \tau)|_{z=H} = \psi(\tau). \quad (15)$$

Решение общей задачи определения динамики объёмных полей температур по координатам возможно **численными** методами [30]. Практика применения методов теории тепломассопереноса применительно к реальным задачам строительных технологий [31] показывает наибольшую эффективность методов решений, базирующихся на сочетании численных и аналитических методов расчета. Впервые в фундаментальной монографии А.В. Лыкова и Ю.А. Михайлова [32] было показано, что для решения задач нестационарного тепло- и массопереноса для тел канонической формы (пластина, цилиндр, сфера) эффективным способом является метод суперпозиции.

В соответствии с этим методом, решения краевых задач нестационарного переноса в трехмерной системе координат находится по двухэтапному способу.

1. Краевые задачи для каждой координатной оси представляются в безразмерном виде.
2. Находятся решения для каждой краевой задачи в форме выражений:

$$T(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}) = \varphi(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}), \quad T(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}) = \psi(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}), \quad T(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}) = \phi(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}). \quad (16)$$

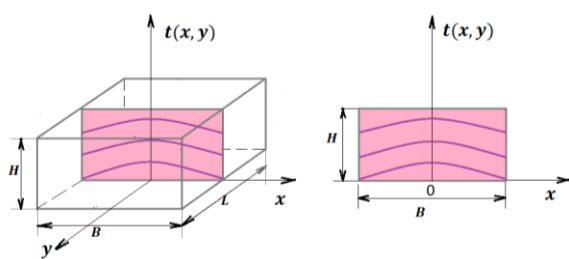
Здесь для безразмерных величин приняты обозначения:

$$\bar{x} = \frac{x}{L/2}; \quad \bar{y} = \frac{y}{B/2}; \quad \bar{z} = \frac{z}{H}; \quad Fo_{\bar{x}} = \frac{a \cdot \tau}{(L/2)^2}; \quad Fo_{\bar{y}} = \frac{a \cdot \tau}{(B/2)^2}; \quad Fo_{\bar{z}} = \frac{a \cdot \tau}{H^2}. \quad (17)$$

3. И, наконец, в соответствии с отмеченным принципом суперпозиции, общее решение будет представлено в форме выражения:

$$T(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, Fo) = T(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}) \cdot T(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}) \cdot T(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}). \quad (18)$$

Численная реализация некоторых результатов математического моделирования приведена на рисунках 4 - 6. Вычисления выполнены для плоской модели в координатном пространстве t - x - y , при этом рисунки 4 и 5 иллюстрируют профили температур по соответствующим координатным осям, а рисунок 6 показывает типичный профиль температур в двумерной координатной плоскости.

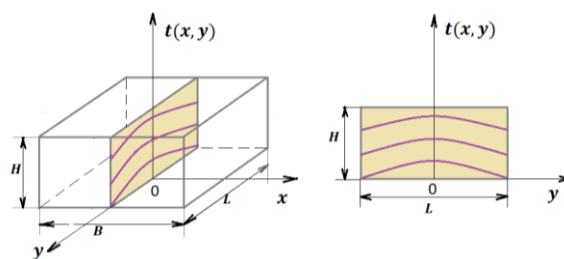


а)

б)

Рисунок 4 - Модель размерного массивного тела: иллюстрация динамики полей температур в плоскости $t-x$:

а) центральное сечение; б) профиль температур в плоскости сечения



а)

б)

Рисунок 5 - Модель размерного массивного тела: иллюстрация динамики полей температур в плоскости $t-y$:

а) центральное сечение; б) профиль температур в плоскости сечения

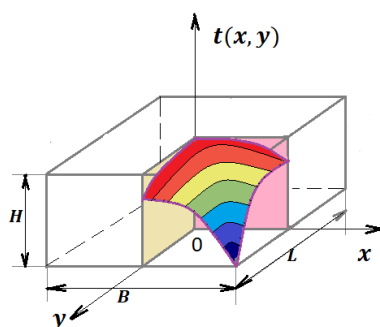


Рисунок 6 - Иллюстрация развития двумерного поля температур

Результаты модельных расчетов показывают адекватность математической модели тепломассопереноса реальным физическим представлениям. Следующим этапом исследований предполагается «осложнение» модели дополнительными явлениями, такими как влияние опалубки, свойства которой существенно отражаются на границах тел, и значениями тепловых потоков. В свою очередь, именно соотношение этих величин влияют на динамику развития полей температур в пристенных слоях твердых тел, определяя величину температурных градиентов, которые являются источниками трещинообразования в бетоне.

4. Заключение

1. Низкая теплопроводность бетона в массивных конструкциях приводит к неравномерному прогреву, температурным деформациям (расширению при нагреве и сжатию при охлаждении) и возникновению напряжений из-за ограниченной свободы деформирования.

2. Численное моделирование процессов теплопереноса позволяет прогнозировать температурные поля и напряжения в бетонных конструкциях, что способствует оптимизации технологий бетонирования и предотвращению разрушений.

3. Современные вычислительные методы обеспечивают высокую точность расчетов температурных полей и напряжений, что критически важно для проектирования и эксплуатации ответственных сооружений, таких как плотины, мосты и фундаменты АЭС.

4. На этом авторы статьи считают целесообразным завершить изложение результатов части настоящего исследования. В последующей статье предполагается изложение результатов по постановке, решению и анализу задачи термонапряженного деформированного состояния блока массивного железобетона с учетом влияния термоопалубки, подстилающего слоя грунтобетона и материалов верхнего покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Н.В., Антонов Е.А. Роль ползучести бетона в формировании термонапряжённого состояния монолитных железобетонных конструкций в процессе её возведения // Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам». 2005. №213. С. 89–117.
2. Евланов С.Ф. Технологические трещины на поверхности монолитных пролётных строений // Научные труды ОАО ЦНИИС «Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов». 2002. № 208. С. 27–36.
3. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.
4. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Ильин А.А., Соколов С.Б. Выбор технологических параметров производства бетонных работ при возведении массивных ростверков и опор арочного пилона вантового моста через реку Москву // Научные труды ОАО ЦНИИС «Исследование транспортных сооружений». 2006. № 230. С. 24–30.
5. Gakhova, L.N. Температурные напряжения в массивах железобетонных конструкций // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. № 4(3). С. 48-53. <http://jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/116>
6. Пуляев И.С., Александрова О.В., Пуляев С.М., Курицын В.С. Обоснование размеров блоков бетонирования при возведении тоннельных сооружений и подпорных стен мостовых конструкций // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 4 (91). С. 56-64.
7. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.
8. СП 46.13330.2012 Мосты и трубы.
9. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции.
10. Соловьянчик А.Р., Коротин В.Н., Шифрин С.А., Вейцман С.Г. Опыт снижения трещинообразования в бетоне от температурных воздействий при сооружении Гагаринского тоннеля // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. №3–4. С. 53–59.
11. Величко В.П., Черный К.Д. Учет напряженно-деформированного состояния в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». 2013. № 2. С. 11–13.
12. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ. 2015. 528 с.
13. Лапидус А.А., Хубаев А.О., Бидов Т.Х., Топчий Д.В. Совершенствование процесса бетонирования монолитных конструкций в условиях арктической зоны // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 12. С. 9-16. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.12.09-16
14. Пассек В.В., Соловьянчик А.Р. Методика исследований температурного режима балок пролётных строений мостов в процессе тепловлажностной обработки // Сборник научных трудов ЦНИИС «Температурный режим и вопросы повышения устойчивости и долговечности транспортных сооружений на БАМ». 1980. С. 97–103.
15. Соколов С.Б. Влияние колебаний температуры воздуха в тепляках на температуру твердеющего бетона при возведении монолитных плитно-ребристых пролётных строений в холодный период года // Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам». 2005. №213. С. 167–172.
16. Смирнов Н.В., Антонов Е.А. Роль ползучести бетона в формировании термонапряжённого состояния монолитных железобетонных конструкций в процессе её возведения // Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам». 2005. №213. С. 89–117.
17. Шифрин С.А., Ткачёв А.В. Тепловое взаимодействие твердеющего бетона и бетонного основания в условиях солнечной радиации // Сборник трудов ВНИИПИТеплопроект. 1985. С. 19-27.
18. Лукьянов В.С., Соловьянчик А.Р. Физические основы прогнозирования собственного термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций // Сборник научных трудов ЦНИИС. 1972. №73. С. 36–42.
19. Величко В.П., Цимеринов А.И. Методика прогнозирования термонапряжённого состояния цилиндрических бетонных массивов // Сборник научных трудов ЦНИИС. 1972. №73. С. 117–129.
20. Гинзбург А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». № 1. 2014. С. 98–110.
21. Nesvetaev, G.V., Koryanova, Yu.I., Yazyev, B.M. Autogenous shrinkage and early cracking of massive foundation slabs. Maazine of Civil Engineering. 2024. № 17(6). Article no. 13005. DOI: 10.34910/MCE.130.5
22. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Учет влияния добавок на тепловыделение бетона с целью предотвращения раннего трещинообразования массивных монолитных конструкций // Вестник евразийской науки. - 2024. - Т.16. № 6. URL: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf>.
23. Пуляев И.С., Пуляев С.М. Учет температурного фактора твердеющего бетона при возведении объектов транспортной инфраструктуры // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 4 (79). С. 92-100.
24. Пуляев И.С., Пуляев С.М. Учёт собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона при обеспечении требуемых потребительских свойств конструкций крымского моста // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 5 (63). С. 742-759.

25. Травуш В.И., Никифоров С.В. Технология бетонирования массивных конструкций фундаментов зданий МФК «Лакта Центр» // Строительство и реконструкция. 2025. № 2. С. 44-55. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>
26. Елисеев В.В. Механика деформируемого твёрдого тела. С.-П(б), 2006, 231 с.
27. Fedosov S., Pulyaev I., Aleksandrova O., Cherednichenko N., Derbasova E., Lezhnina Yu. Thermophysical processes in hardening concrete as a factor for quality assurance of erected reinforced concrete structures of transport facilities. *Architecture and Engineering*. 2024. Vol. 9. № 4. Pp. 75-86.
28. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.
29. Балючик Э.А., Черный К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами // Сборник научных трудов ЦНИИС. 2010. № 257. С. 49–57.
30. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат. 1963, 536 с.
31. Федосов С.В., Баканов М.О., Федосеев В.Н. Методы теории теплопроводности в приложении к задачам моделирования процессов сушки и термической обработки твёрдых материалов. Москва - Вологда, «Инфра-Инженерия», 2024, 212 с.
32. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Изд. АН БССР, 1961, 525 с.

REFERENCES

1. Smirnov N.V., Antonov E.A. The role of concrete creep in the formation of the thermally stressed state of monolithic reinforced concrete structures during its construction [Rol polzuchesti betona v formirovanii termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruktсий v protsesse eye vozvedeniya]. *Scientific works of JSC TSNIIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2005. No. 213. Pp. 89-117. (rus)
2. Evlanov S.F. Technological cracks on the surface of monolithic superstructures [Tekhnologicheskiye treshchiny na poverkhnosti monolitnykh proletnykh stroyeniy]. *Scientific papers of JSC TSNIIS "Problems of rationing and research of consumer properties of bridges"*. 2002. No. 208. Pp. 27-36. (rus)
3. Vasiliev A.I., Weizman S.G. Modern trends and problems of domestic bridge construction. *Scientific and technical journal [Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya]. Bulletin of Bridge Construction*". 2015.No. 1. Pp. 2–17. (rus)
4. Solovyanchik A.R., Shifrin S.A., Ilyin A.A., Sokolov S.B. Selection of technological parameters for the production of concrete work during the construction of massive grillages and supports of the arched pylon of a cable-stayed bridge across the Moscow River [Vybor tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva betonnykh rabot pri vozvedenii massivnykh rostverkov i opor arochnogo pilona vantovogo mosta cherez reku Moskvu]. *Scientific works of JSC TsNIIS "Research of transport structures"*. 200. No. 230. Pp.24–30. (rus)
5. Gakhova, L.N. Temperature stresses in arrays of reinforced concrete structures [Температурные напряжения в массивах железобетонных конструкций]. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2017. No. 4(3). Pp. 48-53. (rus). <http://jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/116>
6. Pulyaev I.S., Aleksandrova O.V., Pulyaev S.M., Kuritsyn V.S. Justification of the size of concreting blocks during the construction of tunnel structures and retaining walls of bridge structures [Obosnovaniye razmerov blokov betonirovaniya pri vozvedenii tonnelnykh sooruzheniy i podpornykh sten mostovykh konstruktсий]. *Bulletin of VSGUT*. 2023. No. 4 (91). Pp. 56-64. (rus)
7. GOST 27751-2014 Nadezhnost stroitelnykh konstruktсий in osnovaniy [GOST 27751-2014 Nadezhnost stroitelnykh konstruktсий i osnovaniy]. (rus)
8. SP 46.13330.2012 Mosty i truby [SP 46.13330.2012 Mosty i truby]. (rus).
9. SP 63.13330.2018 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. [SP 63.13330.2018 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии]. (rus)
10. Solovyanchik A.R., Korotin V.N., Shifrin S.A., Weizman S.G. Experience in reducing cracking in concrete from temperature influences during the construction of the Gagarin tunnel [Opyt snizheniya treshchinoobrazovaniya v betone ot temperaturnykh vozdeystviy pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya]. *Scientific and technical journal "Bulletin of Bridge Construction"*. 2002 No. 3(4). Pp. 53–59. (rus)
11. Velichko V.P., Cherny K.D Accounting for the stress-strain state in prefabricated monolithic bridge supports at the stage of their construction [Uchet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sborno-monolitnykh oporakh mostov na stadii ikh sooruzheniya]. *Scientific and technical journal "Transport Construction"*. 2013. No 2. Pp. 11–13. (rus)
12. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete [Tekhnologiya betona]. Moscow : Publishing house of the DIA. 2015. 528 p. (rus)
13. Lapidus A.A., Hubaev A.O., Abidov T.Kh., Topchiy D.V. Improvement of the concreting process of monolithic structures in the Arctic zone [Sovershenstvovaniye protsessa betonirovaniya monolitnykh konstruktсий v usloviyakh arkticheskoy zony]. *Industrial and civil engineering*. 2024. No. 12. Pp. 9-16. DOI:10.33622/0869-7019.2024.12.09-16. (rus)
14. Passek V.V., Solovyanchik A.R. Methodology for studying the temperature regime of bridge span beams during heat and moisture treatment [Metodika issledovaniy temperaturnogo rezhima balok proletnykh stroyeniy mostov v protsesse teplovlazhnostnoy obrabotki]. *Collection of scientific papers of TSNIIS "Temperature regime and issues of increasing the stability and durability of transport structures at BAM"*. 1980. Pp. 97-103. (rus)

15. Sokolov S.B. The influence of air temperature fluctuations in greenhouses on the temperature of hardening concrete during the construction of monolithic slab-ribbed span structures in the cold season [Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukha v tepleyakh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristyykh proletnykh stroyeniy v kholodnyy period goda]. *Scientific works of OJSC TsNIIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2002. No. 213. Pp.167–172. (rus)
16. Smirnov N.V., Antonov E.A. The role of concrete creep in the formation of the thermally stressed state of monolithic reinforced concrete structures during its construction [Rol polzuchesti betona v formirovaniy termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse eye vozvedeniya]. *Scientific works of JSC TSNIIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2005. No. 213. Pp. 89-117. (rus)
17. Shifrin S.A., Tkachev A.V. Thermal interaction of hardening concrete and concrete base in conditions of solar radiation [Rol polzuchesti betona v formirovaniy termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse eye vozvedeniya]. *Proceedings of VNIIPITeploproekt*. 1985. Pp. 19-27. (rus)
18. Lukyanov V.S., Solovyanchik A.R. Physical basis for predicting the own thermally stressed state of concrete and reinforced concrete structures [Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhennogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy]. *Collection of scientific works of TsNIIS*. 1972. No. 73. Pp. 36–42. (rus)
19. Velichko V.P., Tsimerinov A.I. Methodology for predicting the thermally stressed state of cylindrical concrete massifs Metodika prognozirovaniya termonapryazhennogo sostoyaniya tsilindricheskikh betonnykh massivov]. *Collection of scientific papers of TSNIIS*. 1972. No. 73. Pp. 117-129. (rus)
20. Ginzburg A.V. Ensuring high quality and efficiency of work during the construction of tunnels made of monolithic concrete. Scientific and technical journal [Obespecheniye vysokogo kachestva i effektivnosti rabot pri vozvedenii tonney iz monolitnogo betona]. *"Bulletin of MGSU"*. 2014. No. 1. Pp. 98–110. (rus)
21. Nesvetaev, G.V., Koryanova, Yu.I., Yazyev, B.M. Autogenous shrinkage and early cracking of massive foundation slabs. *Maazine of Civil Engineering*. 2024. № 17(6). Article No. 13005. DOI: 10.34910/MCE.130.5
22. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Shut V.V. Taking into account the influence of additives on the heat dissipation of concrete in order to prevent early cracking of massive monolithic structures [Uchet vliyaniya dobavok na teplovydeleniye betona s tselyu predotvrashcheniya rannego reshchinoobrazovaniya massivnykh monolitnykh konstruksiy]. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024. Vol. 16. No. 6: 50SAVN624. (rus). Available at: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf>
23. Pulyaev I.S., Pulyaev S.M. Consideration of the temperature factor of hardening concrete during the construction of transport infrastructure facilities [Uchet temperaturnogo faktora tverdeyushchego betona pri vozvedenii obyektov transportnoy infrastruktury]. *Bulletin of VSGUT*. 2020. No. 4 (79). Pp. 92-100. (rus)
24. Pulyaev I.S., Pulyaev S.M. Accounting for the intrinsic thermally stressed state of hardening concrete while ensuring the required consumer properties of the Crimean bridge structures [Uchet sobstvennogo termonapryazhennogo sostoyaniya tverdeyushchego betona pri obespechenii trebuyemykh potrebitelskikh svoystv konstruksiy krymskogo mosta]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2018. Vol. 15.No. 5 (63). Pp. 742-759. (rus)
25. Travush V.I., Nikiforov S.V. Technology of concreting massive structures of the foundations of the Lakhta Center multifunctional complex [Tekhnologiya betonirovaniya massivnykh konstruksiy fundamentov zdaniy MFK «Lakhta Tsentr»]. *Building and Reconstruction*. 2025. No. 2. Pp. 44-55. (rus.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>
26. Eliseev V.V. Mechanics of a deformable solid [Mekhanika deformiruemogo tvyordogo tela.]. S.-P(b), 2006, 231 p. (rus)
27. Fedosov S., Pulyaev I., Aleksandrova O., Cherednichenko N., Derbasova E., Lezhnina Yu. Thermophysical processes in hardening concrete as a factor for quality assurance of erected reinforced concrete structures of transport facilities. *Architecture and Engineering*. 2024. Vol. 9. No. 4. Pp. 75-86.
28. Vasiliev A.I., Veitsman S.G. Modern trends and problems of domestic bridge construction [Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya]. *Scientific and technical journal "Bulletin of Bridge Engineering"*. 2015. No. 1. Pp. 2-17. (rus)
29. Balyuchik E.A., Cherny K.D. Increasing the crack resistance of monolithic concrete bridge supports by constructive methods [Povysheniye treshchinostoykosti opor mostov iz monolitnogo betona konstruktivnymi metodami]. *Collection of scientific papers of TSNIIS*. 2010. No. 257. Pp. 49-57. (rus)
30. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Theory of heat and mass transfer [Teoriya teplo- i massoperenosa]. Moscow: Gosenergoizdat. 1963, 536 p. (rus)
31. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Fedoseev V.N. Methods of the theory of thermal conductivity in application to the problems of modeling the processes of drying and heat treatment of solid materials [Metody teorii teploprovodnosti v prilozhenii k zadacham modelirovaniya protsessov sushki i termicheskoy obrabotki tverdykh materialov]. Moscow - Vologda, Infra-Engineering, 2024, 212 p. (rus)
32. Lykov A.V. Theoretical foundations of building thermophysics [Teoreticheskiye osnovy stroitelnoy teplofiziki]. Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1961, 525 p. (rus)

Информация об авторах

Федосов Сергей Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Технологии и организация строительного производства»,
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Пуляев Иван Сергеевич

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Промышленное, гражданское и подземное строительство»,
E-mail: ivanes50@mail.ru

Александрова Ольга Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии и организация строительного производства»,
E-mail: aleks_olvl@mail.ru

Митягина Анастасия Николаевна

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры «Промышленное, гражданское и подземное строительство»,
E-mail: raschetiv@gmail.com

Information about authors

Fedosov Sergey V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia,
Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), doctor in tech. sc., prof.,
prof. of the dep. of Technology and Organization of Construction Production,
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Pulyaev Ivan S.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., docent, Head of the dep. of Industrial, Civil and Underground Construction,
E-mail: ivanes50@mail.ru

Aleksandrova Olga V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., docent, Associate Prof. of the dep. of Technology and Organization of Construction Production,
E-mail: aleks_olvl@mail.ru

Mityagina Anastasia N.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,
postgraduate student of the dep. of Industrial, Civil and Underground Construction,
E-mail: raschetiv@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.05.2025
Одобрена после рецензирования 23.07.2025
Принята к публикации 13.08.2025

The article was submitted 30.05.2025
Approved after reviewing 23.07.2025
Accepted for publication 13.08.2025

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 18.06.2025 г.
Дата выхода в свет 28.06.2025 г.
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ № 67

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