

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

Редколлегия:

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

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

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

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

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

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

Ильичев В.А., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Каприелов С.С., *акад. РААСН, д.т.н., проф. (Россия)*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Себешиев В.Г., *почетный чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (Россия)*

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

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

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

Тур В.В., *инostr. чл. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

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

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

Исполнительный редактор:

Амелина М.А., *(Россия)*

Адрес редакции:

302030, Орловская обл., г. Орёл,

ул. Московская, д. 77.

Тел.: +79065704999

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

E-mail: str_and_rek@mail.ru

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 объединённому каталогу «Пресса России»

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

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2026

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Кореньков П.А., Федорова Н.В.** Экспериментальные исследования сопротивления узлов железобетонных рам при статическом и динамическом нагружении..... 5
- Мондрус В.Л., Парамонов Е.Е., Панов М.А.** Линейные и нелинейные гасители колебаний в системе виброзащиты зданий..... 19

Безопасность зданий и сооружений

- Джагарян И.Г., Федоров В.С.** Нормативная оценка выносливости бетона транспортных сооружений..... 34
- Мерзлякова А.Д., Чепурненко А.С., Языев Б.М., Тюрина В.С.** Аналитический метод расчёта пологих трёхслойных оболочек на основе решения Навье..... 42
- Николюкин А.Н., Антонов В.М., Монастырев П.В., Лисовский В.А.** Интеграция нейросетевых и нечётких регуляторов (ANFIS/ML) при решении обратной задачи подбора эффективных размеров свай при заданной несущей способности..... 60
- Тамразян А.Г., Тягуз Д.В.** Оценка эксплуатационной живучести изгибаемых железобетонных элементов при неравномерной коррозии арматуры..... 74
- Мацеевич Т.А., Данков С.А.** Оценка надёжности ферменных конструкций при коррозионном износе на основе имитационного моделирования..... 84

Архитектура и градостроительство

- Ивашенко Ю.А., Шабиев С.Г.** Идеология и перспектива развития архитектурной деятельности..... 98

Строительные материалы и технологии

- Ерофеев В.Т., Дергунова Е.С., Гончарова М.А., Дергунова В.В.** Деформации усадки и трещиностойкость бетонов, модифицированных урезными биодобавками..... 109

Editor-in-Chief

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

Editor-in-Chief Assistants:

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Illichev V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sebeshev V.G., candidate sc. tech., prof.
(Russia)

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

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

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

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

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

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

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

Managing Editor:

Amelina M.A., (Russia)

The edition address:

302030, Oryol region., Oryol,

Moskovskaya Street, 77

+79065704999

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

E-mail: str_and_rek@mail.ru

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 r.

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

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

www.akc.ru

© Orel State University, 2026

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Korenkov P.A., Fedorova N.V.** Experimental studies of reinforced concrete frame joint resistance under static and dynamic loading 5
- Mondrus V.L., Paramonov E.E., Panov M.A.** Linear and nonlinear oscillation dampers in the vibration protection system of buildings 19

Building and structure safety

- Dzhagaryan I.G., Fedorov V.S.** Regulatory assessment of concrete endurance in transport structures 34
- Merzlyakova A.D., Chepurmenko A.S., Yazyev B.M., Tyurina V.S.** Analytical method for calculating shallow three-layer shells based on the Navier solution 42
- Nikolyukin A.N., Antonov V.M., Monastirev P.V., Lisovskiy V.A.** Integration of neural network and fuzzy controllers (ANFIS/ML) for solving the inverse problem of selecting effective pile dimensions for a given bearing capacity 60
- Tamrazyan A.G., Tyagur D.V.** Assessment of the ability of flexural reinforced concrete elements to maintain functionality under non-uniform reinforcement corrosion 74
- Matseevich T.A., Dankov S.A.** Assessment of the reliability of trusses in case of corrosion wear based on simulation modeling 84

Architecture and urban planning

- Ivashenko Yu.A., Shabiev S.G.** Ideology and development perspective of architectural activity 98

Construction materials and technologies

- Yerofeyev V.T., Dergunova E.S., Goncharova M.A., Dergunova V.V.** Shrinkage deformation and crack resistance of concrete modified with urease bioadditives 109

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

К 90-летию Владимира Ильича Травуша

4 мая 2026 г. исполняется 90 лет выдающемуся инженеру, ученому, вице-президенту РААСН, профессору, доктору технических наук, главному конструктору и заместителю генерального директора ЗАО «Горпроект», Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, Заслуженному строителю Российской Федерации, Почетному строителю России, лауреату Премии Совета Министров СССР, лауреату Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий, лауреату государственной Премии, трижды лауреату Премии Правительства Российской Федерации Владимиру Ильичу Травушу.

Владимир Ильич Травуш автор более 350 научных трудов, патентов, национальных нормативных документов по строительным конструкциям, зданиям и сооружениям, автор более 70 реализованных уникальных объектов, среди которых Останкинская телевизионная башня, Дворцы спорта в Москве, Архангельске, Твери и Сочи; Музей Хо Ши Мина в Ханое, «Москва-парк» в Астане, а также уникальных проектов ММДЦ «Москва-Сити» в Москве и «Лахта-центр» в Санкт-Петербурге, открывших новую страницу в истории российского высотного строительства.

Владимир Ильич Травуш удостоен Государственной Премии Российской Федерации 2021 года за заслуги мирового уровня в уникальном высотном строительстве, обеспеченные системными достижениями ученого в развитии строительных наук и технологий в России. Он лауреат трех премий правительства РФ в области науки и техники за разработку проектов уникальных объектов, в их числе многофункционального общественно-делового комплекса "Лахта-Центр". В мае 2021 года это уникальное сооружение было удостоено главной международной премии в области высотного строительства и городского развития СТБУН



Awards 2021 в Чикаго. По результатам общего голосования участников конференции 462-метровый небоскреб победил в номинациях «Лучшее здание высотой более 400 метров», «Лучшее высотное здание Европы» и «Строительство высотных зданий».

В настоящее время Владимир Ильич ведет активную научно-творческую деятельность по подготовке аспирантов и докторантов в НИУ МГСУ и других организациях. За последние годы под его руководством защищено ряд докторских и кандидатских диссертаций. Проблемные лекции, читаемые В.И. Травушем в ВУЗах страны, вызывают огромный интерес не только у студентов, аспирантов и преподавателей ВУЗов, но и у широкой инженерной общественности. Владимир Ильич обладает колоссальной работоспособностью, большим авторитетом, коммуникабельностью, уникальным умением достигать цели в решении задач архитектурно-строительной отрасли.

Редакция, члены редколлегии журнала «Строительство и реконструкция» сердечно поздравляют Владимира Ильича с Юбилеем и желают доброго здоровья, больших творческих и новых научных достижений во всех начинаниях на благо отечественной строительной науки.

П.А. КОРЕНЬКОВ¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹

¹Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УЗЛОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Разработана комплексная методика экспериментального исследования узлового соединения железобетонных рам при статико-динамическом нагружении. В качестве объекта исследования выбрана крестообразная модель узла рамного каркаса многоэтажного здания. Для испытаний предложено использовать специально разработанную нестандартную установку копрового типа, интегрированную в гидравлическую систему, которая позволяет моделировать как статические, так и динамические воздействия. Экспериментальными исследованиями, с использованием современных измерительных систем, включая тензометрические розетки и высокоскоростную видеосъемку цифровой видеокамерой, получены деформации бетона и арматуры, параметры трещинообразования и разрушения для опытных конструкций узлов рам. Полученные экспериментальные данные о статическом и динамическом сопротивлении узла железобетонной рамы позволят верифицировать создаваемые расчетные модели железобетонных конструкций рамных каркасов зданий.

Ключевые слова: железобетон, предельное состояние, статико-динамическое нагружение, узлы рам, экспериментальные исследования, трещинообразование, разрушение.

P.A. KORENKOV¹, N.V. FEDOROVA¹

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

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE FRAME JOINT RESISTANCE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

Abstract. A comprehensive methodology for experimental research of nodal connections under static-dynamic loading has been developed. A cruciform model of a frame joint in a multi-story building was chosen as the design scheme. For testing, it is proposed to use a specially developed non-standard drop-weight type setup, integrated into a hydraulic system. This system allows for the simulation of both service and emergency impacts, including the additional dynamic loading of the joint under special conditions. The experimental studies yielded data on concrete and reinforcement deformations, crack formation parameters, and failure characteristics for the prototype frame joints. This was achieved using modern measurement systems, including strain gauge rosettes and high-speed video recording. The obtained experimental data on the static and dynamic resistance of the frame system joints will allow for the verification of analytical models, enhance the current understanding of the behavior of joints made from a new type of concrete, and validate both improved and newly developed analytical models for reinforced concrete building frames.

Keywords: reinforced concrete, ultimate and beyond-ultimate states, static-dynamic loading, frame assemblies, experimental studies, crack formation, destruction.

©Кореньков П.А., Федорова Н.В., 2026

1. Введение

В настоящее время изучение проблемы защиты конструктивных систем зданий и сооружений из железобетона сопротивлению прогрессирующему обрушению активно развивается в научных исследованиях российских [1-3] и зарубежных [4-7] ученых. Решены ряд задач, связанных с прогнозированием поведения несущих систем при их статико-динамическом нагружении вследствие выключения из работы отдельных несущих элементов [8-12].

В то же время экспериментальные исследования по рассматриваемой проблеме в силу разных причин, крайне ограничены, а имеющиеся относятся в основном к испытаниям конструкций на моделях. Из известных в открытой печати исследований можно отметить работы, в которых установлена степень влияния различных типов армирования железобетонных конструкций на сопротивление прогрессирующему обрушению [12-15]. Экспериментально изучались характер и схемы приложения нагрузки на исследуемые конструкции [16,17], деформирование монолитных железобетонных узлов балок и колонн для оценки альтернативных механизмов перераспределения усилий в конструктивной системе.

Известен также ряд исследований, посвященных изучению силового сопротивления узлов железобетонных рам при статических и динамических нагружениях и на их основе разработаны способы усиления узловых соединений, например, с применением бетонно-стальной оболочки [19], армированием полимерным волокном [20], введение эпоксидно-смоляных инъекций [21-22] и др.

Из недавних исследований, выполненных по рассматриваемой тематике, можно отметить работу [23], в которой представлены результаты экспериментальных исследований четырех моделей узлов балка-колонна в масштабе 1:2, запроектированные со специальными L-образными кронштейнами на концах балок. Основное внимание здесь уделялось оценке деформативности, несущей способности, развитию вантового эффекта и механизмам разрушения конструкций. Полученные авторами результаты показали, что такие узлы обладают достаточно высокой жесткостью на различных уровнях их нагружения в предельных и запредельных состояниях. При больших перемещениях учет вантового механизма сопротивления позволил значительно увеличить несущую способность конструктивной системы, что может стать дополнительным резервом при проектировании. В то же время в этой и других работах по рассматриваемой тематике [8,13,24] недостаточно изучены динамические эффекты и картины трещинообразования, возникающие при особых воздействиях. Установленные эффекты обратного аточного действия (РАА) и компрессионного аточного действия (САА) оказываются значительными, особенно при увеличении скорости воздействия, что подчеркивает важность учета картин образования и раскрытия трещин, выявленных при динамических догружениях. В первом приближении оценка такого влияния, с учетом реализации известных механизмов сопротивления приведена в работе [25], но без учета физических особенностей сопротивления железобетона после образования трещин.

На рис. 1,а представлена подконструкция рамной системы в виде двухпролетного ригеля железобетонного рамного каркаса. Методом декомпозиции здесь выделяется конструктивный узел.

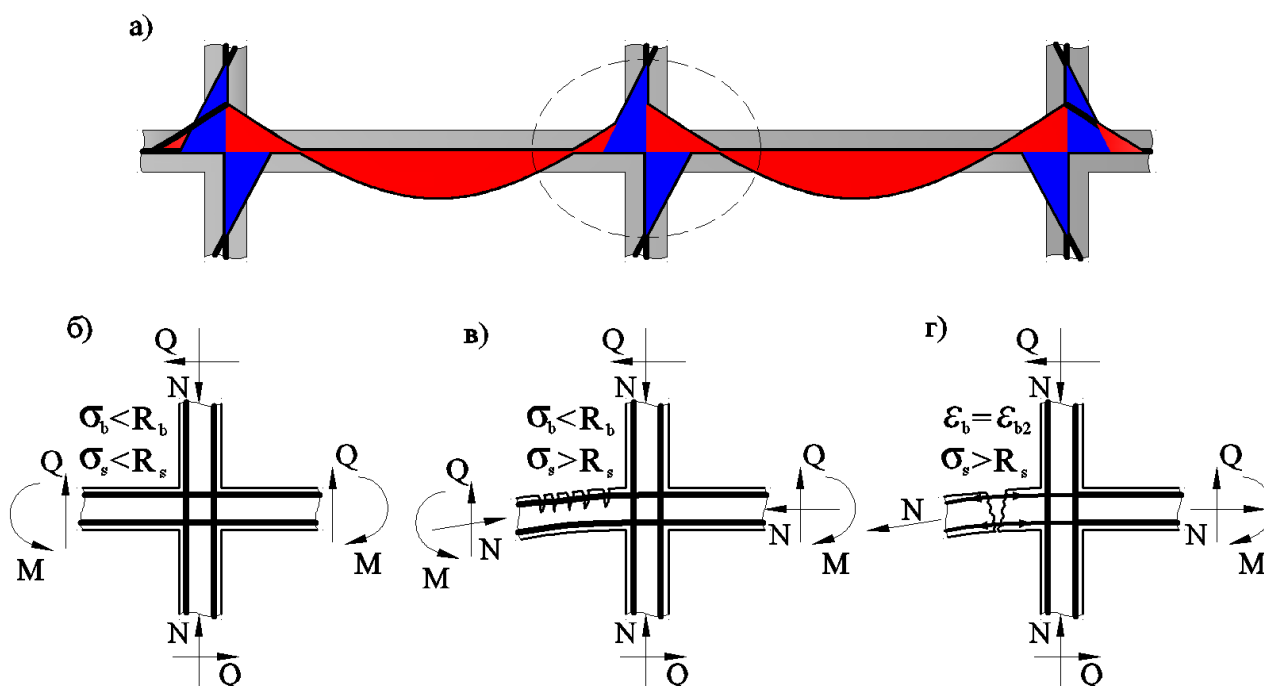


Рисунок 1 – Фрагмент каркасного здания (а) и реализация изгибного (б), арочного (в) и цепного (вантового) (г) механизма сопротивления при выключении из работы колонны крайнего ряда

В соответствии с принятой в исследованиях [26] моделью приопорный участок ригеля, примыкающего к узлу, на стадии нормальной эксплуатации работает по изгибной схеме (рис. 1,б). В результате возникновения начального локального разрушения от особого воздействия, например, разрушение промежуточной опоры, в рассматриваемой конструкции ригеля могут последовательно смениться следующие стадии напряженно-деформированного состояния: арочная схема работы ригелей в результате достижения предела текучести в растянутой арматуре $\sigma_s > R_s$ и роста деформаций, приводящего к значительному росту распора N (см. рис. 1,в); цепная схема работы ригелей после разрушения бетона сжатой зоны ($\epsilon_b = \epsilon_{b2}$) и при пластической работе наиболее растянутой арматуры в приопорном сечении $\sigma_s > R_s$ (см. рис. 1,г).

Экспериментальная проверка стадий деформирования нормальных и наклонных сечений узлов рам при статико-динамических режимах их нагружения характерных режимам нагружения рамных конструкций особыми воздействиями, в настоящее время отсутствует. В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка методики и проведение экспериментальных исследований силового сопротивления узлов железобетонных рам каркасов зданий до и после образования трещин на всех уровнях их нагружения.

2. Модели и методы

На основании обобщения результатов исследований рамных конструктивных систем и их узлов, представленных в известных публикациях, была разработана конструкция модели опытных образцов и методика испытаний узлов железобетонных рам (рис. 2). Выбор конструктивного решения и масштаба опытного образца обусловлен необходимостью максимально адекватного моделирования реальных условий работы конструкции узла и наиболее полного отражения основных закономерностей деформирования

трещинообразования и разрушения узловых зон железобетонных рам при статическом и динамическом нагружении.

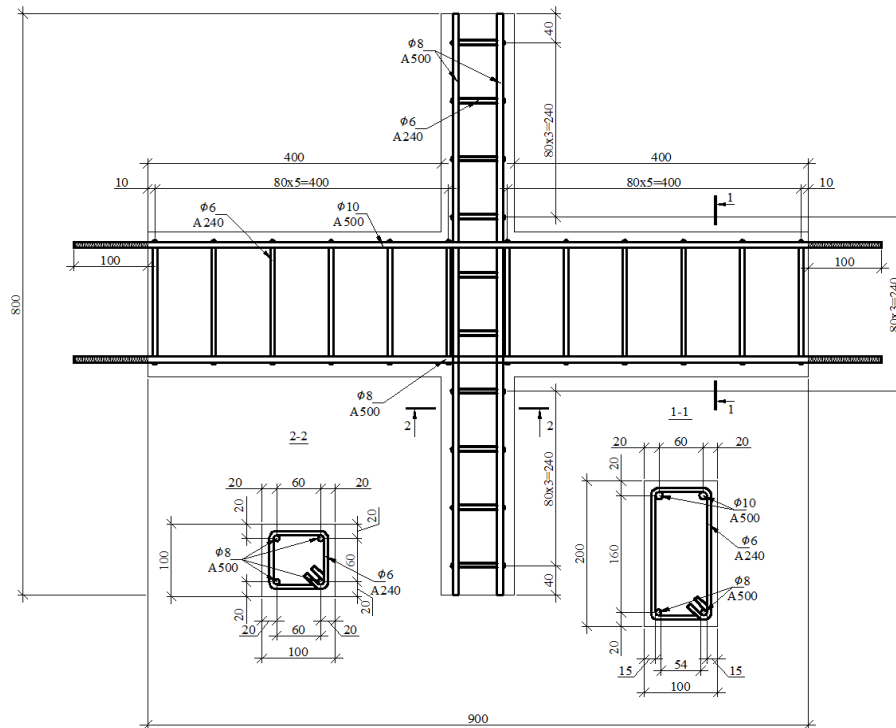


Рисунок 2 – Схема армирования конструкции опытного образца

Материалы конструкций узлов приняты следующими: тяжелый бетон со средней призмной прочностью $R_{b,n} = 35$ МПа, рабочая продольная арматура колонн выполнена из стрежней диаметром 8 мм, класса А 500С. Рабочая продольная арматура ригелей принята из стрежней диаметром 8 и 10 мм, класса А 500С. Поперечная диаметром ригелей и колонн запроектирована из стрежней диаметром 6 мм класса А 240С. Продольная арматура имела выпуски с резьбой нарезанной на величину 100 мм, для надежной фиксации узла в испытательной установке.

Методика экспериментального исследования конструкции узла опытной рамы предусматривала установку опытного образца в специально разработанную установку в виде металлической рамы. Рама имела опорные устройства для закрепления опытного образца и упорные захваты для приложения сосредоточенных сил. Для ограничения горизонтальных перемещений опытных конструкций узлов и перемещений из плоскости изгиба торцы ригелей закреплены линейными связями (см. поз. 7, рис. 3).

Было испытано два опытных образца узла железобетонных рам. В соответствии с методикой испытания конструкция железобетонного узла рамы испытывалась в два этапа. На первом этапе испытаний к первой опытной конструкции узла с помощью гидравлической системы ступенчато прикладывалась статическая нагрузка.

Для моделирования динамического (ударного) воздействия на втором этапе испытаний использовалась специально разработанная и запатентованная установка копрового типа [27] Установка была интегрирована в гидравлическую систему, передающую нагрузку.

Способ создания динамического догружения узла реализовывался следующим образом. В силовую раму с помощью гидравлического домкрата и фиксирующих захватов устанавливается опытный образец.

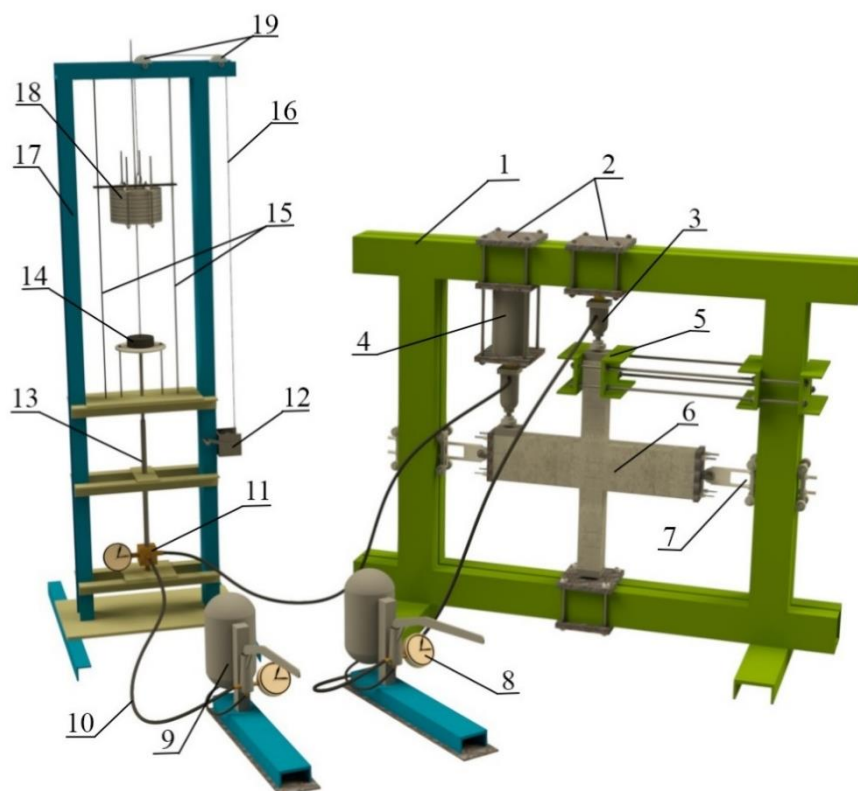


Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки с гидравлической системой нагружения: 1-силовая рама; 2-упорные захваты; 3-гидравлический домкрат; 4-жесткий упор; 5-фиксирующий захват; 6-опытный образец; 7- устройство для закрепления узла от горизонтального смещения; 8-манометр; 9-насосная станция; 10-высокопрочный шланг; 11- соединительный элемент гидравлической системы; 12- лебедка поршень; 13-поршень; 14-резиновая прокладка; 15-направляющие; 16-трос; 17-силовой каркас ударной установки; 18-догружающий элемент; 19-направляющие блоки

Затем в местах передачи нагрузки были установлены гидравлические домкраты. В гидравлическую систему насосной станции нагнеталось давление, соответствующее заданному уровню статической нагрузки. Изначально экспериментальная установка подключалась к общей гидравлической системе. Затем, с помощью подъемного механизма, состоящего из блоков, троса и лебедки, осуществляется подъем догружающего элемента на заданную расчетом высоту и при его сбрасывании догружающий элемент соударяясь с резиновой прокладкой, передавал энергию удара на поршень, создавая при этом во всей гидравлической системе мгновенный градиент давления, и, соответственно, динамическое догружение опытного образца. Прирост нагрузки происходит за счет не сжимаемости жидкости в системе, и разнице площадей поршня, по которому наносится удар и поршня домкрата.

Программой исследований было предусмотрено два режима испытания узла: квазистатический- на первом этапе испытаний, с доведением опытной конструкции до разрушения; статико-динамический, при котором вначале образец нагружался до нагрузки, соответствующей эксплуатационному значению, ступенями по 10%, а затем производилось его динамическое догружение.

Для измерения деформаций бетона и арматуры использовались тензорезисторы и розетки тензорезисторов. Они устанавливались по специальной схеме (рис. 4) позволяющей определять деформации в зоне сложного напряженного состояния в месте сопряжения

Исследование деформаций в сжатой зоне, включая определение её размеров и фактической высоты образования наклонных трещин, проводилось с помощью розеток тензорезисторов. Розетки, состоящие из четырех тензорезисторов, ориентированных под углом 45° , устанавливались на бетон в двух идентичных симметричных сечениях опытного образца (со стороны А). Такая схема позволяет экспериментально определять параметры плоского деформированного состояния узла в зоне сопряжения ригеля с колонной по измеренным опытным значениям главных деформаций ε_1 и ε_2 и угла φ между направлением ε_1 и заданной базовой осью.



Для контроля данных, полученных методом тензометрии и подтверждения изучаемой модели деформирования рассматриваемых конструкций была предусмотрена также система наклеенных на поверхность образца магнитов с зенковкой, полностью повторяющей поверхность измерительного прибора и исключающей влияние механических неровностей

поверхности образца на точность выполняемых измерений путем приложения штангенциркуля, высокой точности измерения (0,01 мм), подключенного к компьютеру, когда значения измеряемых величин выходят за границы возможности их измерения методами тензометрии (см. рис. 5).

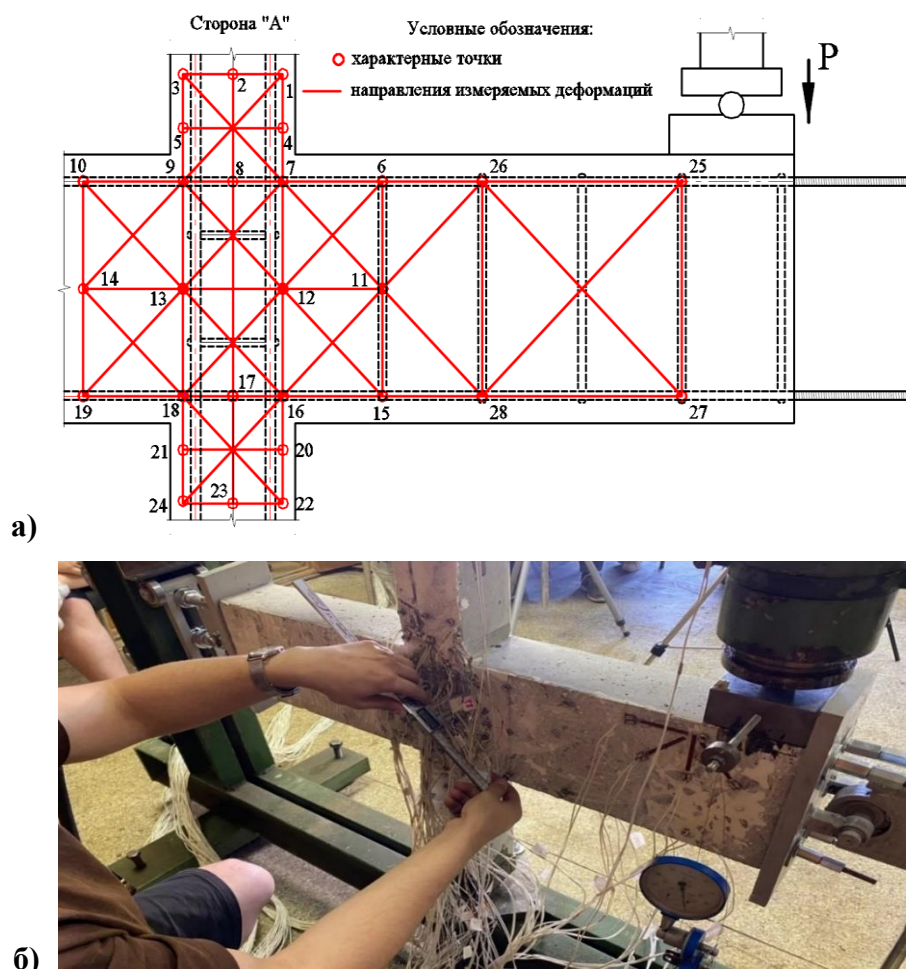


Рисунок 5 – Схема размещения характерных точек для оценки деформативности узлового соединения (а) и процесс измерения деформаций между базовыми точками (б) на прямой стороне опытных образцов

Контроль за образованием трещин осуществлялся методом визуального осмотра. Каждая новая трещина на поверхности образцов маркировалась с указанием соответствующей ступени нагружения. Ширина раскрытия трещин в точке пересечения с продольной арматурой измерялась на каждой ступени микроскопом МБП-2. Для обнаружения самых мелких трещин в элементах рам применялась лупа с 30-кратным увеличением.

Для фиксации характера образования и раскрытия трещин со стороны Б устанавливалась также камера высокого разрешения со скоростью записи 240 кадров в секунду (рис. 6).

В ходе проведения эксперимента было запланировано экспериментальное определение следующих параметров для конструкции узла рамы:

- характерных схем трещинообразования и разрушения конструкции;
- определение значения деформаций бетона и арматуры и взаимных смещений в момент образования трещин в зоне примыкания ригеля к стойке (см. рис.3, область 2 и зоне по длине ригеля);
- определение высоты сжатой зоны над нормальными и наклонными трещинами;
- определение перемещения элементов узла до и после образования трещин;

- определение ширины раскрытия и развитие трещин на оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещин и изменения расстояния между трещинами l_{crc} .

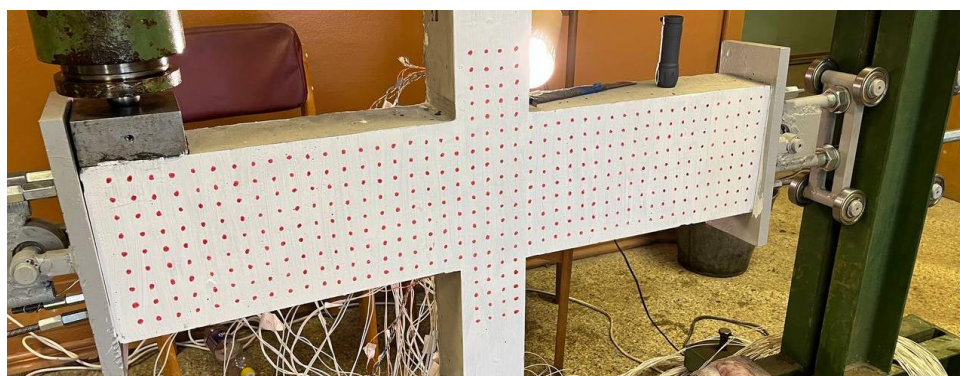


Рисунок 6 – Общий вид обратной стороны образца (стороны Б) для фиксации параметров развития и раскрытия трещин a_{crc} и Δa_{crc} цифровой видеокамерой

3. Результаты исследования и их анализ

Обработка полученных результатов измерений опытных параметров позволила установить ряд следующих особенностей сопротивления конструкции узла на разных этапах нагружения. В таблице приведены значения сосредоточенной силы P приложенной на конце ригеля (см. табл.) и значение соответствующих поэтапно приложенной нагрузке изгибающих моментов на различных ступенях нагружения.

Таблица – Значения нагрузок и изгибающих моментов на ступенях нагружения

№ ступени	P , кН	M , кН*м	№ ступени	P , кН	M , кН*м
I	3,55	1,25	VI	21,3	7,5
II	7,1	2,5	VII	24,85	8,75
III	10,65	3,75	VIII	28,4	10
IV	14,2	5	IX	31,95	11,25
V	17,75	6,25	X	35,5	12,5

Экспериментально установлено, что при статической нагрузке вплоть до 3-й ступени нагружения при $P_i = 0,30P_u$ образуются первые нормальные трещины в наиболее растянутой зоне ригеля. Затем, по мере увеличения нагрузки, на 4-й ступени нагружения образовывались наклонные трещины (рис. 7,8). Дальнейшее нагружение (этапы 5, 6 и 7) привело к образованию наклонных трещин в плосконапряженной области сопряжения ригеля с колонной, а также нормальные трещины в стойке от ее изгиба.

Полученная опытная картина прогибов на ступенях приложения относительной статической нагрузки в зависимости от относительных значений нагрузки и уровневых значений образования нормальных ($P_{crc,1}$) и наклонных ($P_{crc,2}$) трещин свидетельствует о заметном снижении жесткости ригеля после образования этих трещин и проявлении в конструкции узла нелинейных деформаций (рис. 7, кривая 1). Во время испытания второго опытного образца, в соответствии с методикой, к опытной конструкции узла, на первом этапе была приложена статическая нагрузка до уровня $P/P_{ult}=0,65$ а затем консоль узла была догружена динамической нагрузкой того же направления. Догрузка вызвало значительное приращение прогибов ригеля конструкции узла. Такой характер приложения нагрузки к узлу рамы был принят с той целью, чтобы моделировать сопротивление узла

рамы при особых воздействиях, когда к нагруженному узлу статической нагрузкой прикладывается дополнительная динамическая нагрузка [3]. При таком нагружении качественная картина образовавшихся при статической нагрузке типов не изменилась, а произошло лишь увеличение раскрытие образовавшихся при статическом нагружении трещин. (рис. 7, кривая 2).

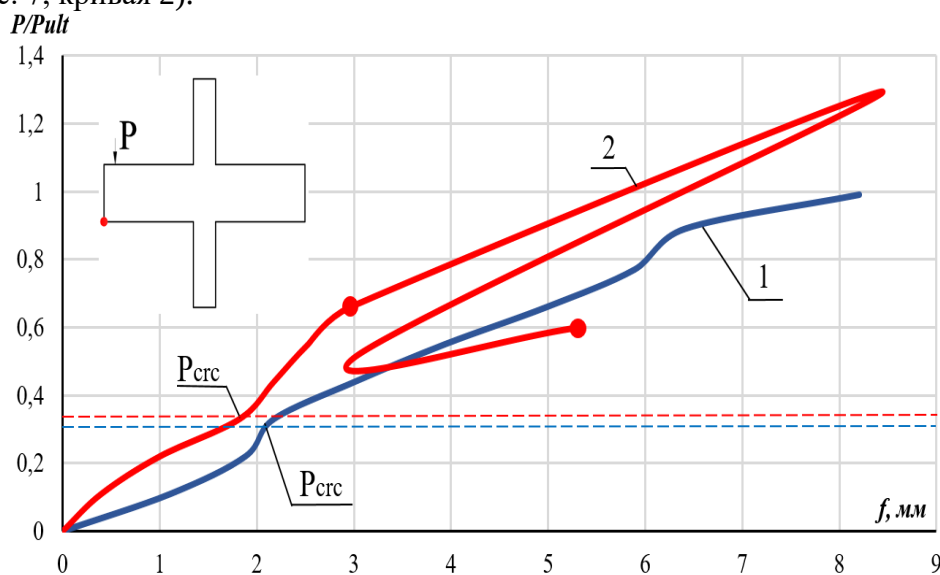


Рисунок 7 – Зависимость прогиба ригеля от относительного уровня нагрузки: 1-статическое нагружение; 2- статико-динамическое нагружение

Из этого следует важный вывод о том, что при моделировании параметров жесткости и трещиностойкости узла при статическом нагружении и динамическом воздействии картина и типы трещин может быть принята идентичной. При таком нагружении дополнительно образовались новые нормальные трещины от изгиба в верхней стойке узла (см. рис. 8).

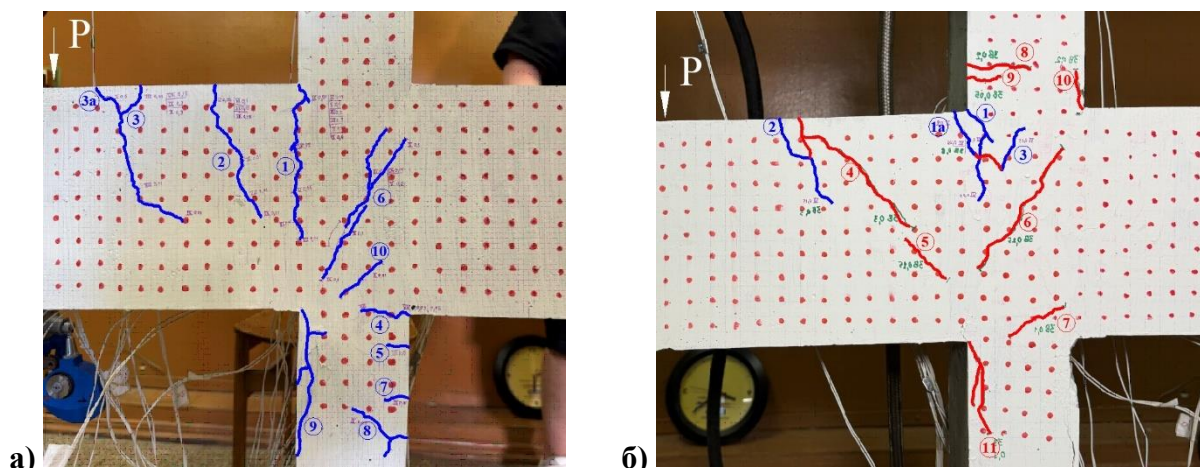


Рисунок 8 – Общий вид разрушения при испытании статической (а) и статико-динамической нагрузкой (б)

После приложения динамического воздействия (удара) на уровне нагрузки $P/P_{ult} = 0,65$ прогибы ригеля получили почти двухкратное приращение. При этом с помощью цифровой видеокамеры было определено изменение этих прогибов во времени (рис.9)

Установлено, что после динамического догружения узла период собственных колебаний составил 0,5 секунды, а частота собственных колебаний составила 2 Гц. Приращение прогиба на первом полупериоде собственных колебаний ригеля через 0,1

секунды увеличилось с 3,09 мм до 9,58 мм и соответственно ускорение до момента достижения амплитудного значения перемещения составило 649 мм/с^2 , а скорость - $64,9 \text{ мм/с}$.

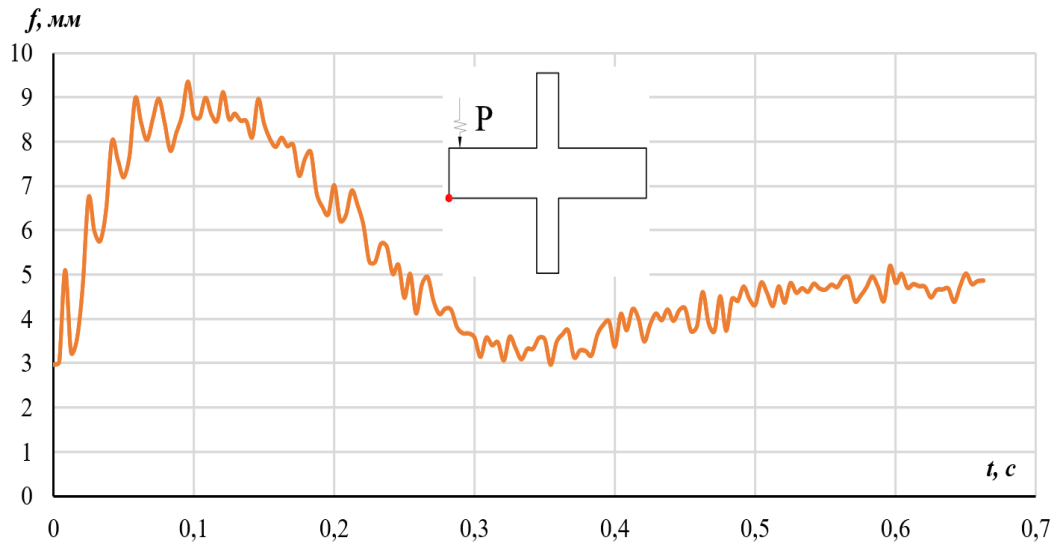


Рисунок 9 – Зависимость перемещений ригеля в сечении на конце консоли от времени при динамическом воздействии

В момент времени, равный 0,6 секунды колебательный процесс практически затух, что свидетельствовало об установлении статического равновесия в опытной конструкции.

С целью двойного контроля параметров собственных колебаний узла был проведен также анализ передаваемого нагрузочным устройством воздействия, экспериментально определенного посредством датчика силы, установленного между гидравлическим домкратом и силовой рамой. Изменение относительного значения этого динамического усилия (P/P_{ult}) в зависимости от времени приведено на рисунке 10.

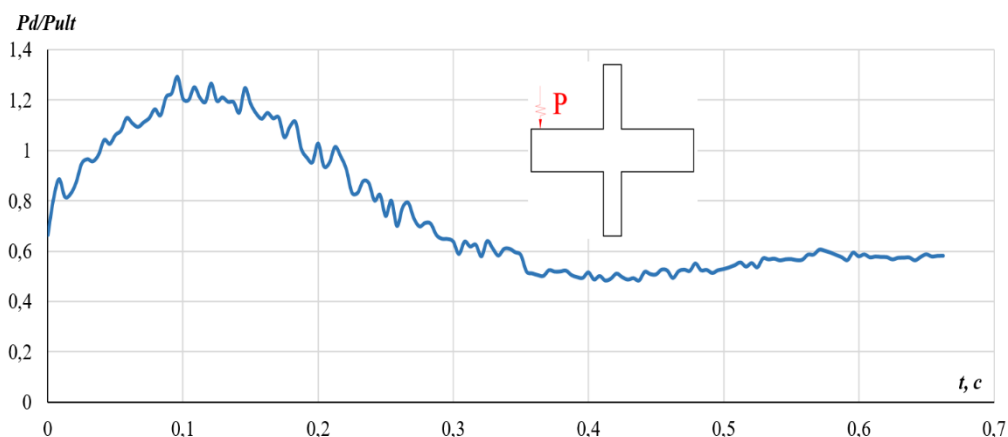


Рисунок 10 – Зависимость изменения относительной динамической нагрузки от времени

Указанное время определено от начала увеличения нагрузки гидравлическом домкрате во времени до максимального значения, т.е. это время первой полуволны от начала колебаний рассматриваемого конструктивного элемента (t_d). Уставлено, что время максимальной амплитуды колебаний от рассматриваемого динамического воздействия, так же как и в случае с перемещениями, составило составляет 0,1 секунды, что находится в

близком диапазоне значений, полученных как авторами [8-10], так и другими исследователями [32].

Сведения о других установленных экспериментально результатах, в частности о параметрах трещинообразования и раскрытия трещин в испытанной конструкции узла планируется представить в следующей публикации авторов.

4. Заключение

1. Предложенная методика экспериментальных исследований позволяет выявить ранее неизученные закономерности и особенности деформирования трещинообразования и разрушения узлов железобетонных рам при статическом и статико-динамическом нагружении. Применение инструментария высокоточных методов измерений (тензометрия, цифровые оптические системы, механические приборы) обеспечило получение достаточно точных значений параметров деформирования, трещинообразовании конструкции железобетонного рамного узла на всех этапах нагружения.

2. Полученные по результатам испытаний качественные и количественные характеристики статического и статико-динамического деформирования опытных конструкций узла железобетонной рамы на всех уровнях нагружения являются надежной основой для верификации численных и аналитических моделей сопротивления железобетонных рамных конструкций.

5. Благодарности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fedorova N. V., Savin S. Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Building and Reconstruction*. – 2021. – No. 3(95). – P. 76-108.
2. Колчунов В. И., Тур В. В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 7. – С. 5-15.
3. Колчунов В. И., Ильющенко Т. А., Федорова Н. В. [и др.] Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // *Строительство и реконструкция*. – 2024. – № 3(113). – С. 31-71.
4. Azim I, Yang J, Bhatta S et al. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *J Build Eng*. 27, 100986 (2019). [https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2019.100986](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100986).
5. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Appl. Sci.* 12, 1045 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12031045>
6. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios// *Journal of Building Engineering*. 90 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>
7. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Eng. Struct.* 211, 110425 (2020).
8. Fedorova N., Medyankin M., Fedorov S., Savin S. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress–Strain Curves / // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 170. – P. 151-161. – DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_14.
9. Vu N. T., Fedorova N. V. Concrete Delayed Failure Time // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 20, No. 2. – P. 118-131. – DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-2-118-131.
10. Бу Н. Т., Федорова Н. В. Динамический отклик железобетонного каркаса здания при сценарии удаления колонны // *Строительство и реконструкция*. – 2024. – № 5(115). – С. 82-94. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-82-94.
11. Korenkov P. A., Meliksetyan S. R. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard // *E3S Web Conf.* 533 02004 (2024). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302004>

12. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Appl. Sci.* 12, 1045 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12031045>
13. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios // *Journal of Building Engineering*. 90 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109405>
14. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Eng. Struct.* 211, 110425 (2020).
15. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures. *Constr. Build. Mater.* 125, 533–545 (2016).
16. Cheng Y, Sun L, Liu J et al. Dynamic performance of a remaining RC frame with a central-column failure subjected to impact loads. *Arab J SciEng.* 47(10), 12479–96 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06525-3>
17. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage. *Shock. Vib.* 2016, 1–17(2016).
18. Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 411 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134511>.
19. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology. 79 (2014).
20. Karayannis C.G., Chalioris C.E., Sideris K.K. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections. *J Earthq Eng.* 2(2), 217 (1998). <http://dx.doi.org/10.1080/13632469809350320>
21. Obaidat Y.T., Abu-Farsakh G.A., Ashteyat A.M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Constr Build Mater.* 198, 313–22 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267>
22. Ma C, Wang D, Wang Z. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps. *Compos Struct.* 159, 397–409 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.094>
23. Yintong Bao, Kang Hai Tan. Performance of precast concrete beam-column joint with a hidden corbel under progressive collapse scenarios // *Engineering Structures*. Volume 267. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622007738>
24. Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi. Experimental investigation on dynamic response behavior of PC beam-column sub-assemblages under middle-joint drop-weight loading // *Journal of Building Engineering*. Volume 80. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223022647>.
25. Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings [Electronic resource] : CIB Report № 391 / ed. by D. A. Nethercot. — Electronic data. — Rotterdam : CIB, 2021. — 139 p.
26. Pham, A. T., & Tan, K. H. (2017). Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Engineering Structures*, 139, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>
27. Патент № 2841155 С1 Российская Федерация, МПК G01M 99/00. Способ экспериментального определения динамических догрузений в несущих конструктивных элементах монолитных железобетонных каркасов: заявл. 22.11.2024 : опубл. 03.06.2025 / В. И. Колчунов, П. А. Кореньков, И. М. Безгодов, С. Р. Меликсетян; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет".
28. Колчунов Вл. И., Яковенко И. А., Ключева Н. В. Метод физических моделей сопротивления железобетона // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 12. – С. 51-55.
29. Колчунов, Вл. И. Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций / Вл. И. Колчунов, П. А. Кореньков, Н. В. Федорова // *Вестник МГСУ*. – 2025. – Т. 20, № 8. – С. 1165-1177. – DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177. – EDN SDAPQS.
30. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments // *Cement and Concrete Composites*, 2015, No. 55, pp. 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.
31. Malvar L.J., Ross C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension // *ACI Materials Journal*, 1998, No. 95(6), pp. 735739
32. Fu H.C., Erki M.A., Seckin M. Review of Effects of Loading Rate on Concrete in Compression // *Journal of Structural Engineering*, 1991, No. 117(12), pp. 3645-3659.

REFERENCES

1. Fedorova N.V., Savin S.Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021;(3(95)):76-108.
2. Kolchunov V.I., Tur V.V. Directions for designing structural systems in special design situations. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023;(7):5-15.
3. Kolchunov V.I., Ilyushchenko T.A., Fedorova N.V., et al. Vitality of structural systems of buildings and structures: an analytical review of research. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2024;(3(113)):31-71.
4. Azim I., Yang J., Bhatta S., et al. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *Journal of Building Engineering*. 2019;27:100986. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100986>.
5. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Applied Sciences*. 2022;12:1045. <https://doi.org/10.3390/app12031045>.
6. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2024;90. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>.
7. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020;211:110425.
8. Fedorova N., Medyankin M., Fedorov S., Savin S. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress-Strain Curves. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;170:151-161. DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_14.
9. Vu N.T., Fedorova N.V. Concrete Delayed Failure Time. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(2):118-131. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-2-118-131.
10. Vu N.T., Fedorova N.V. Dynamic response of reinforced concrete building frame under column removal scenario. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2024;(5(115)):82-94. DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-82-94.
11. Korenkov P.A., Meliksetyan S.R. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard. *E3S Web of Conferences*. 2024;533:02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302004>.
12. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Applied Sciences*. 2022;12:1045. <https://doi.org/10.3390/app12031045>.
13. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2024;90. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>.
14. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020;211:110425.
15. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures. *Construction and Building Materials*. 2016;125:533–545.
16. Cheng Y., Sun L., Liu J., et al. Dynamic performance of a remaining RC frame with a central-column failure subjected to impact loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;47(10):12479–12496. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06525-3>.
17. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly. *Shock and Vibration*. 2016;2016:1–17.
18. Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 2024;411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134511>.
19. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology. 2014;79.
20. Karayannis C.G., Chalioris C.E., Sideris K.K. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections. *Journal of Earthquake Engineering*. 1998;2(2):217. <http://dx.doi.org/10.1080/13632469809350320>.
21. Obaidat Y.T., Abu-Farsakh G.A., Ashteyat A.M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2019;198:313–322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267>.

22. Ma C., Wang D., Wang Z. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps. *Composite Structures*. 2017;159:397–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.094>.
23. Yintong Bao, Kang Hai Tan. Performance of precast concrete beam-column joint with a hidden corbel under progressive collapse scenarios. *Engineering Structures*. 2022;267. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622007738>.
24. Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi. Experimental investigation on dynamic response behavior of PC beam-column sub-assemblages under middle-joint drop-weight loading. *Journal of Building Engineering*. 2023;80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223022647>.
25. Nethercot D.A., ed. Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings: CIB Report No. 391. Rotterdam: CIB; 2021. 139 p.
26. Pham A.T., Tan K.H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Engineering Structures*. 2017;139:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>.
27. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Bezgodov I.M., Meliksetyan S.R. Method for experimental determination of dynamic overloads in load-bearing structural elements of monolithic reinforced concrete frames. Patent No. 2841155 C1 Russian Federation. Filed November 22, 2024; Published June 3, 2025.
28. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Klyueva N.V. Method of physical models of reinforced concrete resistance. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2013;(12):51-55.
29. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Fedorova N.V. Program of experimental studies of complexly stressed joints of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2025;20(8):1165-1177. DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177. EDN SDAPQS.
30. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments. *Cement and Concrete Composites*. 2015;55:34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.
31. Malvar L.J., Ross C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*. 1998;95(6):735-739.
32. Fu H.C., Erki M.A., Seckin M. Review of Effects of Loading Rate on Concrete in Compression. *Journal of Structural Engineering*. 1991;117(12):3645-3659.

Информация об авторе:

Кореньков Павел Анатольевич

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры Промышленного и гражданского строительства.
E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Федорова Наталья Витальевна

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Промышленного и гражданского строительства.
E-mail: fedorovanv@mfmgsu.ru

Information about author:

Korenkov Pavel A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering.
Email: kpa_gbk@mail.ru

Fedorova Natalya V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering.
Email: fedorovanv@mfmgsu.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 18.11.2025
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

УДК 624.04

DOI: 10.33979/2073-7416-2026-124-2-19-33

В.Л. МОНДРУС¹, Е.Е. ПАРАМОНОВ¹, М.А. ПАНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ГАСИТЕЛИ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ВИБРОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье представлен алгоритм расчета зданий и сооружений, рассматриваемых как системы с конечным числом степеней свободы, в конструктивную схему которых с целью ограничения уровня колебаний включен динамический гаситель колебаний. При построении алгоритма расчета используются метод основанный на численном решении систем нелинейных интегральных уравнений, к которым сводятся системы нелинейных дифференциальных уравнений колебаний систем с конечным числом степеней свободы. Численный алгоритм строится на основе шагового метода по времени с уточнением нелинейных составляющих итерациями.

В результате получены расчетные зависимости, позволяющие производить расчет зданий с линейными и нелинейными гасителями колебаний, в частности, с включающимися при достижении гасителем колебаний заданных перемещений дополнительными связями. Произведен расчет здания с линейным и нелинейным гасителем колебаний, показана эффективность применения различных типов гасителей колебаний в системе виброзащиты зданий и выполнен анализ результатов расчета.

Ключевые слова: гасители колебаний, импульсная переходная функция, виброзащита.

V.L. MONDRUS¹, E.E. PARAMONOV¹, M.A. PANOV¹

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

LINEAR AND NONLINEAR OSCILLATION DAMPERS IN THE VIBRATION PROTECTION SYSTEM OF BUILDINGS

Abstract. The article presents an algorithm for the analysis of buildings and structures modeled as systems with a finite number of degrees of freedom, whose structural model includes a dynamic vibration damper intended to limit vibration levels. The algorithm is constructed using a method based on the numerical solution of systems of nonlinear integral equations, to which the systems of nonlinear differential equations of motion for finite-degree-of-freedom systems are reduced. The numerical procedure is implemented using a time-stepping method with iterative refinement of the nonlinear terms.

As a result, computational relationships were obtained that make it possible to analyze buildings equipped with linear and nonlinear vibration dampers, including dampers with additional links that are activated when specified displacements are reached. Calculations were performed for a building with both linear and nonlinear vibration dampers, demonstrating the effectiveness of various types of dampers within the building vibration protection system, and an analysis of the results was carried out.

Keywords: vibration dampers, impulse response function, vibration protection.

© Мондрус В.Л., Парамонов Е.Е., Панов М.А., 2026\

1. Введение

Развитие инфраструктуры городов, рост и модернизация промышленности приводит к увеличению вибрационной нагрузки на здания и сооружения, ускоряя процессы их физического износа. В стесненных условиях городской застройки возможны ситуации, при которых вибрации грунта, вызываемые виброактивным оборудованием, высокоскоростными поездами передаются на близрасположенные здания и сооружения, а также ситуации, при которых необходима установка виброактивного оборудования внутри многоэтажного здания, оказывающие заметное негативное воздействие на конструкции зданий и здоровье людей. В ряде случаев влияние вибродинамических воздействий может иметь более серьезные последствия в виде нарушения эксплуатационной пригодности, в том числе, появление трещин, развитие недопустимых деформаций и даже разрушение.

В связи с этим возникает необходимость в развитии методов снижения влияния вибраций на здания и сооружения: устройство виброизоляции под виброактивное оборудование, использование вертикальных барьеров в грунте для снижения уровня передаваемых колебаний через грунт, устройство виброизоляции здания, а также устройство динамических гасителей колебаний (ДГК).

Динамический гаситель колебаний – это устройство, состоящее из массы (жесткого элемента) и упругой связи, присоединяющей массу к опорной конструкции (перекрытию, балке и т.д.), в котором возникает сила инерции, уменьшающая уровень колебаний защищаемой конструкции [1]. По характеру зависимости реакции гасителя от амплитуд колебаний можно разделить на линейные и нелинейные ДГК.

Наиболее универсальным методом виброзащиты зданий и сооружений может быть применение ДГК, так как конструктивные решения ДГК достаточно просты и легко учитываются на этапе проектирования здания или сооружения, а также в процессе эксплуатации при уровнях колебаний, превышающих значения, установленных нормативными документами, с возможностью индивидуальной настройки гасителя под характер внешнего воздействия.

Теория динамического гашения колебаний, основные результаты применения ДГК при различных динамических воздействиях, а также оптимальные параметры и различные конструктивные схемы ДГК с различными характеристиками демпфирования подробно описаны в известной монографии Б.Г. Коренева и Л.М. Резникова [2]. Большой вклад в создание различных систем гасителей колебаний и практических методов расчета внесли В.С. Поляков, Н.А. Пикулев, И.С. Шейнин., М.Я. Волоцкий, А.В. Дукарт, А.И. Олейник [3-4] и другие.

Исследования применения различных типов гасителей колебаний, в том числе, нелинейных и методов их расчета, в частности, с применением численных, численно-аналитических методов, программ на основе метода конечных элементов, остается актуальной задачей и рассматривается в работах современных отечественных и зарубежных авторов [5-13].

Метод расчета нелинейных систем, основанный на сведении дифференциальных уравнений движения к системам нелинейных интегральных уравнений описан в [14] и развит применительно к расчету различных систем виброзащиты, например, в работах [15-18]. Данный численно-аналитический метод принят в качестве основного в связи возможностью его применения для анализа различных расчётных схем с конечным числом степеней свободы с возможностью учета влияния на систему ДГК с различными жесткостными характеристиками (линейными, нелинейными), в частности с включающимися связями, а также достаточно простого для построения алгоритма и программы расчета.

2. Модели и методы

В статье приводится одна из возможных схем виброзащиты, включающая динамический гаситель колебаний, установленный на одном из этажей защищаемого здания. Расчетная схема представляется в виде упругого стержня с присоединенными массами в уровне перекрытия. Воздействия могут быть как силовые, так и кинематические. Подобная схема, как известно, принята также и в основном нормативном документе СП 14.13330 «Строительство в сейсмических районах» при расчете на сейсмическое воздействие.

Место установки ДГК определяется расчетом и зависит от частоты внешнего воздействия и зоны максимальных амплитуд соответствующих форм колебаний близких по частоте к спектру частот воздействия [2].

Для построения алгоритма расчета зданий с линейными и нелинейными гасителями колебаний используется метод основанный на сведении дифференциальных уравнений движения к системе нелинейных интегральных уравнений [14]. Решения дифференциальных уравнений движения записаны для частного случая при действии внешних нагрузок на присоединенные массы и позволяют производить расчет, например, при действии динамических нагрузок от виброактивного оборудования установленного на этажах здания, однако, при небольших преобразованиях формул, записываются решения при кинематическом воздействии (смещении основания).

Алгоритм расчета зданий с линейным гасителем колебаний

Уравнение движения линейного гасителя колебаний, расчетная схема которого отображена на рисунке 1, можно представить в виде [14]:

$$m_{ds}\ddot{y}_d + \left(1 + 2v_{ds}\frac{d}{dt}\right)k_{ds}\Delta y_s = 0, \quad (1)$$

где $\Delta y_s = y_d - y_s$; (2)

y_d, y_s – перемещения гасителя колебаний и массы m_s , в уровне которой установлен гаситель колебаний;

m_{ds} – масса гасителя колебаний;

k_{ds} – жесткость упругих элементов линейного гасителя колебаний.

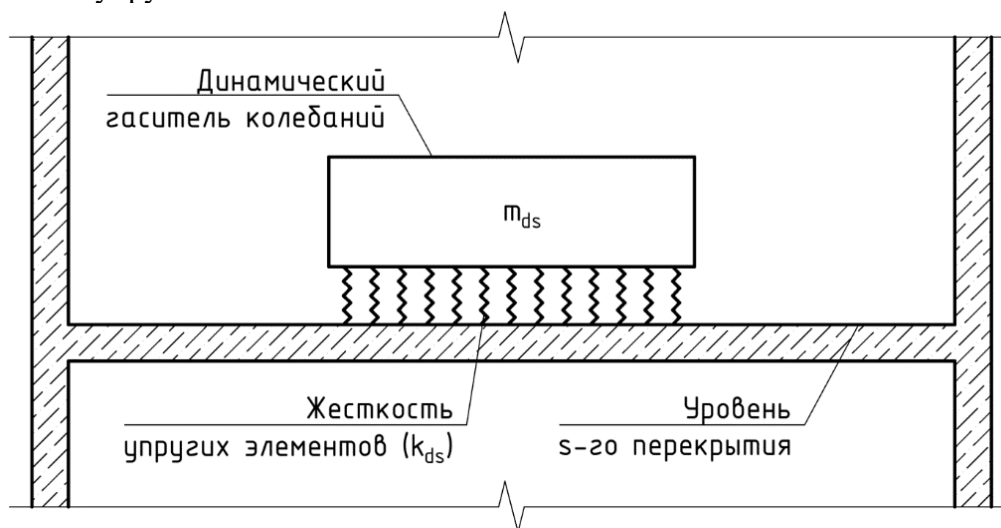


Рисунок 1 – Расчетная схема линейного ДГК

Перепишем уравнение (1) к виду:

$$m_{ds}\ddot{y}_d + \left(1 + 2v_{ds}\frac{d}{dt}\right)k_{ds}y_d = \left(1 + 2v_{ds}\frac{d}{dt}\right)k_{ds}y_s. \quad (3)$$

Выбор коэффициентов демпфирования определяет модель диссипации энергии, так для данного алгоритма принята модифицированная модель Фойгта, коэффициент демпфирования которой зависит от частоты колебаний с основным параметром γ_{ds} –

коэффициентом неупругого сопротивления. Таким образом при учете затухания принимаем $v_{ds} = \frac{\gamma_{ds}}{2 \cdot p_{ds}}$.

Воспользуемся импульсной переходной функцией (ИПФ) для системы с одной степенью свободы [14] и запишем решение уравнения (3):

$$y_d(t) = \int_0^t \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) \frac{k_{ds} y_s(\tau)}{m_{ds}} V_{ds}(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

$$\text{где } V_{ds} = \frac{e^{-\frac{\gamma_{ds}}{2} p_{ds} t}}{p_{ds}^*} \cdot \sin p_{ds}^* t \quad (5)$$

- импульсная переходная функция ДГК с жесткостью k_{ds} ;

$$p_{ds}^* = p_{ds} (1 - v_{ds}^2 p_{ds}^2)^{1/2}; \quad (6)$$

$$p_{ds}^2 = \frac{k_{ds}}{m_{ds}} - \text{квадрат парциальной частоты гасителя колебаний.} \quad (7)$$

Запишем уравнения движения (в матричном виде) основной линейной системы (без ДГК) – линейной системы с конечным числом степеней свободы, представленной в виде упругого стержня с присоединенными массами в уровне перекрытия:

$$M \ddot{\bar{y}} + D \dot{\bar{y}} + K \bar{y} = \bar{q}(t), \quad (8)$$

где M, D, K – матрицы масс, диссипативных и жесткостных характеристик соответственно; $\bar{y}, \bar{q}(t)$ – векторы перемещений и внешней нагрузки.

Рассмотрим систему с одним ДГК (1) с линейной характеристикой $k_{ds} \Delta y_s$, установленном в уровне массы m_s . Тогда в правую часть s -го уравнения системы (8) вводится дополнительное слагаемое, учитывающее реакцию в связи гасителя:

$$r_s = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s. \quad (9)$$

Тогда матричное уравнение движения системы с динамическим гасителем колебаний, расчетная схема которой показана на рисунке 2, запишется так [14]:

$$M \ddot{\bar{y}} + D \dot{\bar{y}} + K \bar{y} = \bar{q}(t) + \bar{r}(\bar{y}), \quad (10)$$

где $\bar{r}(\bar{y})$ - вектор реакций от ДГК (линейно зависит от перемещений y_d, y_s),

а s -е уравнение системы:

$$m_s \ddot{y}_s + d_{s1} \dot{y}_1 + \dots + d_{sn} \dot{y}_n + k_{s1} y_1 + \dots + k_{sn} y_n = q_s(t) + \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s. \quad (11)$$

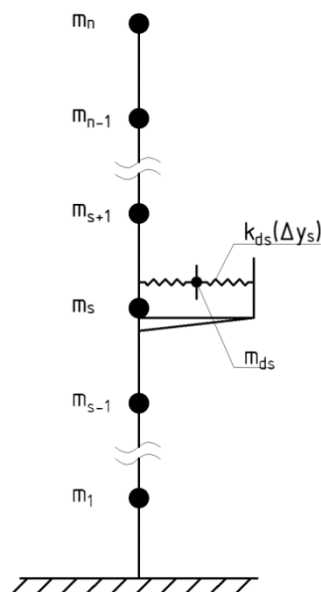


Рисунок 2 – Расчетная схема здания с линейным гасителем колебаний

Воспользуемся аналитическим методом расчета и исследования динамических систем – методом «нормальных форм» [14], так как такой подход позволяет свести связанные уравнения движения к системе несвязанных уравнений движения с одной степенью свободы относительно главных координат, получить аналитические решения, учесть диссипативные силы.

Матрицу диссипативных коэффициентов D системы (10) приводим к диагональной (внедиагональные члены матрицы D малы и ими можно пренебречь).

Решение системы представим в виде разложения по нормированным собственным векторам основной системы:

$$\bar{y} = \Phi^N \bar{a}, \quad (12)$$

где Φ^N – матрица нормированных собственных векторов с элементами Y_{ir}^N по r -ой форме; $\bar{a}$ – вектор перемещений в главных координатах.

Собственные векторы нормируются таким образом, чтобы жесткости в главных координатах были равны собственным значениям (p_r^2), а матрица масс была единичной.

Подставляя (12) в (10) в результате получаем систему n уравнений относительно главных координат (нормальных координат), связанных элементами b_r и d_r , определяемые при разложении внешней нагрузки и реакции от динамического гасителя колебаний по формам собственных колебаний основной системы с конечным числом степеней свободы:

$$\ddot{a}_r + \left(1 + 2v_r \frac{d}{dt}\right) p_r^2 a_r = b_r + d_r, \quad (13)$$

где $r = 1, 2 \dots n$ – форма колебаний;

$\bar{b}$, $\bar{d}$ – векторы, определяемые при разложении по собственным формам вектора нагрузки и реакции от гасителя колебаний соответственно:

$$\bar{b} = \Phi^{N'} \bar{q}(t); \quad (14)$$

$$\bar{d} = \Phi^{N'} \bar{r}(\bar{y}), \quad (15)$$

где $\Phi^{N'}$ – транспонированная матрица нормированных собственных векторов.

Элементы b_r и d_r равны:

$$b_r = \sum_{s=1}^n Y_{sr}^N q_s; \quad (16)$$

$$d_r = Y_{sr}^N r_s = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) Y_{sr}^N k_{ds} \Delta y_s. \quad (17)$$

Воспользуемся ИПФ для системы с одной степенью свободы [14] и систему (13) сведем к системе нелинейных интегральных уравнений второго рода [19] по r -ой форме:

$$a_r(t) = a_{r0}(t) + a_{r\text{лин.}}(t). \quad (18)$$

Решение первого интеграла ($a_{r0}(t)$), определяющее перемещения в основной системе от внешней нагрузки без гасителя колебаний, можно представить в виде:

$$a_{r0}(t) = \int_0^t b_r(\tau) V_r(t - \tau) d\tau, \quad (19)$$

$$\text{где } V_r = \frac{e^{-\frac{\gamma}{2} p_r t}}{p_r^*} \cdot \sin p_r^* t - \text{ИПФ, соответствующая } r\text{-ой форме колебаний}; \quad (20)$$

$$p_r^* = p_r (1 - v_r^2 p_r^2)^{\frac{1}{2}}, \quad v_r = \frac{\gamma}{2 p_r}, \quad (21)$$

где p_r – частота собственных колебаний системы (8) по r -ой форме.

Решение второго интеграла ($a_{r\text{лин.}}(t)$), учитывающее реакцию от ДГК, запишем:

$$a_{r\text{лин.}}(t) = Y_{sr}^N \int_0^t \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s(\tau) V_r(t - \tau) d\tau. \quad (22)$$

При действии произвольной нагрузки на динамические системы с конечным числом степеней свободы обобщённые перемещения определяются как сумма соответствующих

перемещений по всем формам колебаний в главных координатах. Перемещения масс в обобщенных координатах $y_s(t)$ воспользовавшись (12) определяются [14]:

$$y_s(t) = Y_{1r}^N a_1(t) + Y_{2r}^N a_2(t) + \dots + Y_{sr}^N a_r(t) = \sum_{r=1}^n Y_{sr}^N a_r(t). \quad (23)$$

Общая схема алгоритма:

- 1) Записывается система уравнений движения всей системы с конечным числом степеней свободы с учетом реакции от динамического гасителя колебаний (10);
- 2) К системе (10) добавляется уравнение движения линейного гасителя колебаний (1);
- 3) Методом «нормальных форм» система (10) сводится к системе несвязных дифференциальных уравнений движений с одной степенью свободы (13) в главных координатах.
- 4) Шаговым методом по времени итерациями вычисляются главные перемещения по формам колебаний на основании формулы (18) и из (23) вычисляются обобщённые перемещения масс, а также на основании формулы (4) уточняются перемещения линейного гасителя колебаний.

Алгоритм расчета зданий с нелинейным гасителем колебаний

Уравнение движения нелинейного гасителя колебаний можно представить в виде:

$$m_{ds} \ddot{y}_d + \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) c_s(\Delta y_s) \Delta y_s = 0. \quad (24)$$

Для данного гасителя колебаний и принятого типа нелинейности зависимость «реакция-перемещение» (нелинейная зависимость реакций в связях $c_s(\Delta y_s) \Delta y_s$ от перемещений Δy_s отображена на рисунке 3) [14]:

$$\begin{aligned} c_s(\Delta y_s) \Delta y_s &= k_{ds} \Delta y_s \text{ при } |\Delta y_s| \leq \Delta y_{s0}; \\ c_s(\Delta y_s) \Delta y_s &= k_{ds} \Delta y_{s0} + (k_{ds} + k_{ds2})(\Delta y_s - \Delta y_{s0}) \text{ при } |\Delta y_s| > \Delta y_{s0}. \end{aligned} \quad (25)$$

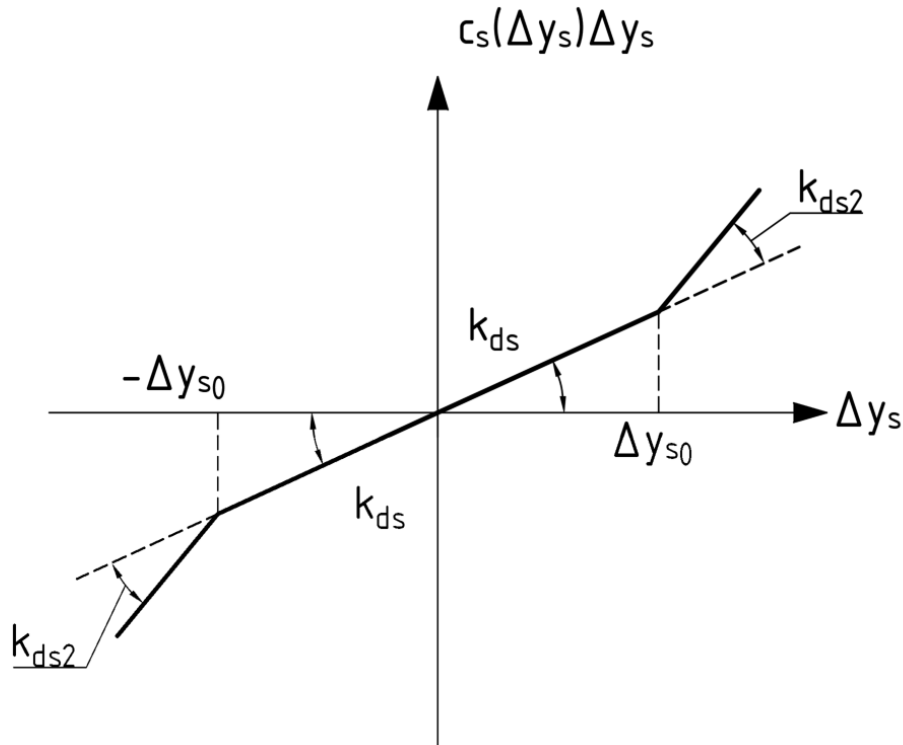


Рисунок 3 – Нелинейная зависимость реакций в связях $c_s(\Delta y_s) \Delta y_s$ от перемещений Δy_s

Представленная на рисунке 3 нелинейная зависимость реакций от перемещений может применяться при устройстве ДГК с нелинейной характеристикой, как системы с включающимися при достижении заданных перемещений дополнительными связями, тем самым определяя алгоритм расчета.

При построении алгоритма уравнение (24) следует переписать, записав нелинейные составляющие в правой части и добавив к обеим частям $\left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s$:

$$\begin{aligned} m_{ds} \ddot{y}_d + \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s = \\ = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} \Delta y_s - \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) c_s(\Delta y_s) \Delta y_s. \end{aligned} \quad (26)$$

После дополнительных преобразований (26) можно переписать в виде:

$$m_{ds} \ddot{y}_d + \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} y_d = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds} y_s - \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) k_{ds2} (\Delta y_s - \Delta y_{s0}). \quad (27)$$

Решения нелинейного дифференциального уравнения (24) можно записать в виде нелинейного интегрального уравнения второго рода [19]. Общее решение системы будет определяться интегралами:

$$y_d(t) = y_{d.лин.}(t) + y_{d.нелин.}(t). \quad (28)$$

Решение линейной части можно представить в виде:

$$y_{d.лин.}(t) = \int_0^t \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) \frac{k_{ds} y_s(\tau)}{m_{ds}} V_{ds}(t - \tau) d\tau. \quad (29)$$

Решение нелинейной части можно представить в виде:

$$y_{d.нелин.}(t) = - \int_0^t \lambda \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) \frac{k_{ds2} (\Delta y_s(\tau) \pm \Delta y_{s0})}{m_{ds}} V_{ds}(t - \tau) d\tau, \quad (30)$$

где λ – прерывистая функция, учитывающая включение и выключение дополнительных связей, равная 0 при $|\Delta y_s| \leq |\Delta y_{s0}|$ и 1 при $|\Delta y_s| > |\Delta y_{s0}|$. Знак «+» в (30) при $\Delta y_s(t) \leq 0$ и «-» при $\Delta y_s(t) > 0$.

По аналогии с (8) запишем уравнения движения основной линейной системы (без ДГК). Рассмотрим систему с одним динамическим гасителем колебаний (24) с нелинейной характеристикой $c_{ds}(\Delta y_s) \Delta y_s$, установленном в уровне массы m_s . Тогда в правую часть s -го уравнения основной линейной системы (8) вводится дополнительное слагаемое, учитывающее реакцию в связи гасителя:

$$h_s = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) c_{ds}(\Delta y_s) \Delta y_s. \quad (31)$$

Тогда матричное уравнение движения системы с нелинейным ДГК, расчетная схема которой показана на рисунке 4, запишется так [14]:

$$M \ddot{\bar{y}} + D \dot{\bar{y}} + K \bar{y} = \bar{q}(t) + \bar{h}(\bar{y}), \quad (32)$$

где $\bar{h}(\bar{y})$ - вектор реакций от ДГК (нелинейно зависит от перемещений y_d, y_s),

а s -е уравнение системы:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{y}_s + d_{s1} \dot{y}_1 + \dots + d_{sn} \dot{y}_n + k_{s1} y_1 + \dots + k_{sn} y_n = \\ = q_s(t) + \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) c_{ds}(\Delta y_s) \Delta y_s. \end{aligned} \quad (33)$$

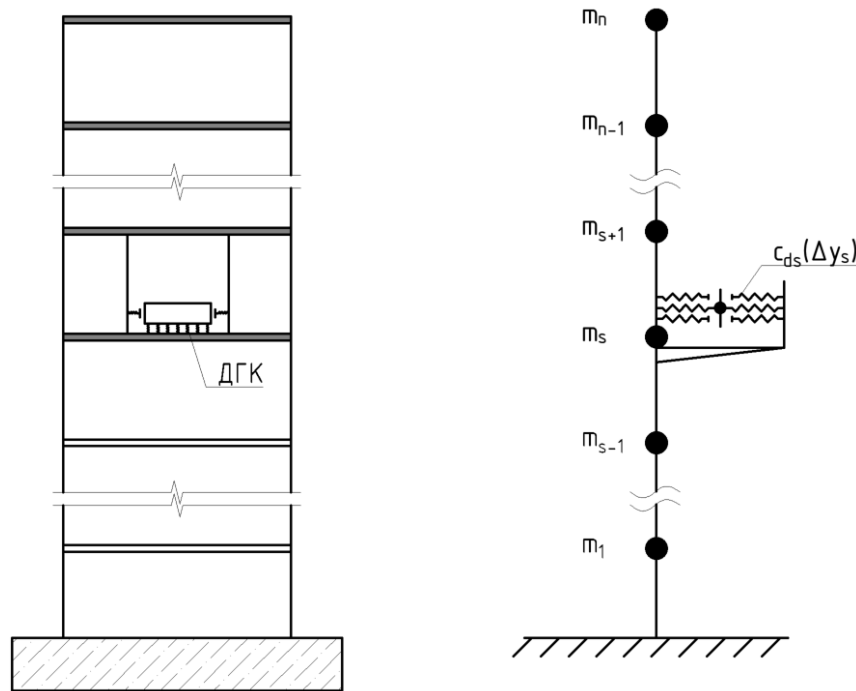


Рисунок 4 – Расчетная схема здания с нелинейным гасителем колебаний

По аналогии с (12) воспользовавшись методом «нормальных форм» [14], а также приводя матрицу диссипативных коэффициентов к диагональной, сводим систему (32) к системе n уравнений движений с одной степенью свободы (13) относительно главных координат (нормальных координат), связанных элементами b_r и d_r , где для системы с нелинейным гасителем колебаний элементы d_r равны:

$$d_r = Y_{sr}^N h_s = \left(1 + 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) Y_{sr}^N c_{ds}(\Delta y_s) \Delta y_s. \quad (34)$$

Воспользуемся ИПФ для системы с одной степенью свободы [14] и систему n уравнений движений относительно главных координат сведем к системе нелинейных интегральных уравнений второго рода [19] по r -ой форме:

$$a_r(t) = a_{r0}(t) + a_{r,\text{нелин}}(t). \quad (35)$$

Перемещения основной линейной системы без гасителя колебаний ($a_{r0}(t)$) определяются по формуле (19), нелинейные составляющие решения, учитывающее влияние нелинейного гасителя колебаний, определяются из интегральных уравнений зависящих от принятого типа нелинейности:

$$\begin{aligned} a_{r,\text{нелин}}(t) &= Y_{sr}^N \int_0^t \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) c_{ds}[\Delta y_s(\tau)] \Delta y_s(\tau) V_r(t - \tau) d\tau = \\ &= Y_{sr}^N \int_0^t \left(1 - 2v_{ds} \frac{d}{dt}\right) (k_{ds} \Delta y_s(\tau) + \lambda k_{ds2} (\Delta y_s(\tau) \pm \Delta y_{s0})) V_r(t - \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (36)$$

Знак «+» в (36) при $\Delta y_s(t) \leq 0$ и «-» при $\Delta y_s(t) > 0$.

Обобщенные перемещения $y_s(t)$ определяются по формуле (23).

Общая схема алгоритма по аналогии с линейным ДГК:

- 1) Записывается система уравнений движения всей системы с конечным числом степеней свободы с учетом реакции от динамического гасителя колебаний (32);
- 2) К системе (32) добавляется уравнение движения нелинейного гасителя колебаний (24);
- 3) Методом «нормальных форм» система (32) сводится к системе несвязных уравнений движений с одной степенью свободы (13) в главных координатах;

4) Шаговым методом по времени итерациями вычисляются главные перемещения по формам колебаний на основании формулы (35) и из (23) вычисляются обобщённые перемещения масс, а также на основании формулы (28) уточняются перемещения нелинейного гасителя колебаний.

3. Результаты исследования и их анализ

Для иллюстрации алгоритма произведем расчет пятиэтажного здания. Каркас здания запроектирован по пространственной рамно-связевой схеме, габариты в плане по осям 18х18 м с шагом колонн 6 м. Колонны представлены стальными двутаврами, перекрытия – монолитной плитой по профлисту по главным и второстепенным стальным балкам, образующими жесткие диски здания. Модуль упругости стальных конструкций $E = 2.06 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, коэффициент неупругого сопротивления каркаса здания $\gamma = 0.01$.

Учитывая [1, 14], применение динамических гасителей колебаний наиболее эффективно для высоких гибких и многоэтажных зданий (сооружений), первые частоты собственных горизонтальных колебаний которых лежат в диапазоне 0.5-6 Гц и эффективно при гашении колебаний, которые носят резонансный характер. В связи с этим для анализа принята расчетная схема здания с высотой этажа 5 м.

Сейсмические волны от промышленных источников передаваясь через грунт нередко могут явиться причиной вибраций здания: собственные периоды колебаний зданий значительно ниже рабочих периодов высокочастотных машин и поэтому явление резонанса исключается, однако возможно их совпадение при работе низкочастотных машин с периодическим установившимся режимом работы вблизи здания [20]. Поэтому внешнее воздействие принято с частотой колебаний, соответствующей первой собственной частоте колебания здания, оказывающей наибольший вклад в характер результирующих колебаний здания. Внешнее воздействие на здание представлено в виде закона смещения основания (ускорения грунта):

$$\ddot{\xi}(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где A – амплитуда ускорений грунта;

$\omega = p_1$ – частота внешнего воздействия, соответствующая первой собственной частоте колебания здания.

Запишем матрицу масс, матрицу жесткости, определим частоты собственных колебаний здания:

$$M = \begin{pmatrix} 131.29 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 131.29 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 131.29 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 131.29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 131.29 \end{pmatrix} [\text{Т}];$$

$$K = 10^3 \cdot \begin{pmatrix} 33.31 & -33.31 & 0 & 0 & 0 \\ -33.31 & 66.62 & -33.31 & 0 & 0 \\ 0 & -33.31 & 66.62 & -33.31 & 0 \\ 0 & 0 & -33.31 & 66.62 & -33.31 \\ 0 & 0 & 0 & -33.31 & 66.62 \end{pmatrix} \left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right];$$

$$p = \begin{pmatrix} 30.566 \\ 26.800 \\ 20.862 \\ 13.234 \\ 4.534 \end{pmatrix} [\text{Гц}].$$

При учете диссипативных сил используется подход, когда диссипативные коэффициенты (21) вводятся в уравнения колебаний в главных координатах (13), а затем

записываются решения с учетом их влияния. Диссипативные коэффициенты приняты согласно модифицированной модели Фойгта (21).

Характеристики гасителя колебаний приняты с учетом рекомендаций [1, 21]:

- масса гасителя колебаний $m_{ds} = 5$ т;
- жесткость основных упругих связей $k_{ds} = 103$ кН/м;
- парциальная частота гасителя колебаний $p_{ds} = 4.539$ Гц;
- величина зазора $\Delta y_{s0} = 10$ мм;
- место установки гасителя – 5-й этаж.

Для анализа эффективности применения различных типов гасителей колебаний рассмотрим три системы: без гасителя колебаний, с линейным гасителем колебаний, с нелинейным гасителем колебаний. Некоторые дополнительные характеристики (k_{ds2} – жесткость дополнительных включающихся связей, γ_{ds}) и результаты расчета показаны в таблице 1.

Для простоты вычисления интегралов и построения программы расчеты на языке программирования MATLAB ИПФ разделяют на части, зависящие исключительно от t или τ . Алгоритм вычисления таких интегралов показан, например, в [14], [22]. Время интегрирования принято $t = 20$ с (30 с).

Таблица 1 - Амплитуды перемещений в системах

Тип системы	Дополнительные характеристики системы	Максимальные перемещения (мм)					
		Масса №1	Масса №2	Масса №3	Масса №4	Масса №5	Гаситель колебаний
Система без гасителя колебаний	-	1.0792	2.0711	2.8953	3.4851	3.7926	-
Система с линейным гасителем колебаний	$\gamma_{ds} = 0.15$	$\frac{0.8783}{19\%}$	$\frac{1.6921}{18\%}$	$\frac{2.3563}{18\%}$	$\frac{2.8327}{18\%}$	$\frac{3.0886}{18\%}$	32.09
	$\gamma_{ds} = 0.2$	$\frac{0.8315}{23\%}$	$\frac{1.5960}{23\%}$	$\frac{2.2162}{23\%}$	$\frac{2.6613}{24\%}$	$\frac{2.9024}{24\%}$	29.65
Система с нелинейным гасителем колебаний	$\gamma_{ds} = 0.15$ $k_{ds2} = 10.3$ кН/м	$\frac{0.8193}{24\%}$	$\frac{1.1399}{45\%}$	$\frac{1.1056}{62\%}$	$\frac{1.3136}{62\%}$	$\frac{1.5020}{60\%}$	33.03
	$\gamma_{ds} = 0.15$ $k_{ds2} = 20.6$ кН/м	$\frac{1.0002}{7\%}$	$\frac{2.0265}{2\%}$	$\frac{1.7145}{40\%}$	$\frac{1.8387}{47\%}$	$\frac{2.7151}{28\%}$	54.03
	$\gamma_{ds} = 0.20$ $k_{ds2} = 10.3$ кН/м	$\frac{0.4629}{42\%}$	$\frac{0.7543}{63\%}$	$\frac{1.0573}{63\%}$	$\frac{1.2819}{63\%}$	$\frac{1.4004}{63\%}$	18.44
	$\gamma_{ds} = 0.2$ $k_{ds2} = 20.6$ кН/м	$\frac{0.9213}{15\%}$	$\frac{1.3167}{36\%}$	$\frac{1.2711}{56\%}$	$\frac{1.2832}{64\%}$	$\frac{1.9556}{48\%}$	45.17

Примечание к таблице 1: значение в знаменателе показывает процент снижения уровня колебаний относительно системы без гасителя колебаний.

В результате расчета, при принятых жесткостных характеристиках здания и ДГК, максимальные амплитуды колебаний здания снизились на 19-24% при применении линейного гасителя колебаний и снизились на 2-63% при применении нелинейного гасителя колебаний, зависимость «реакция-перемещения» которого представлена ломаной (система с включающимися связями).

Снижение уровня колебаний здания при применении линейного и нелинейного гасителя колебаний, относительно системы без гасителя колебаний, характерно наблюдается на рисунках 5 и 6 соответственно, где также отображены уровни колебаний применяемых гасителей колебаний.

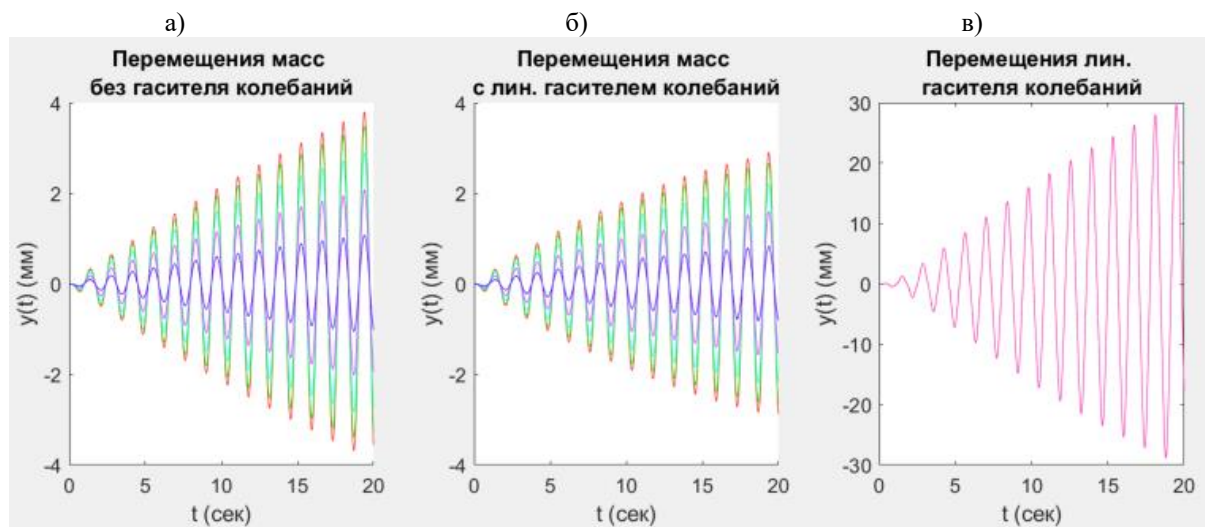


Рисунок 5 - Перемещения масс(ы) в системах(е):
 а - без гасителя колебаний, б - с линейным гасителем колебаний,
 в – линейного гасителя колебаний ($\gamma_{ds}=0.20$)

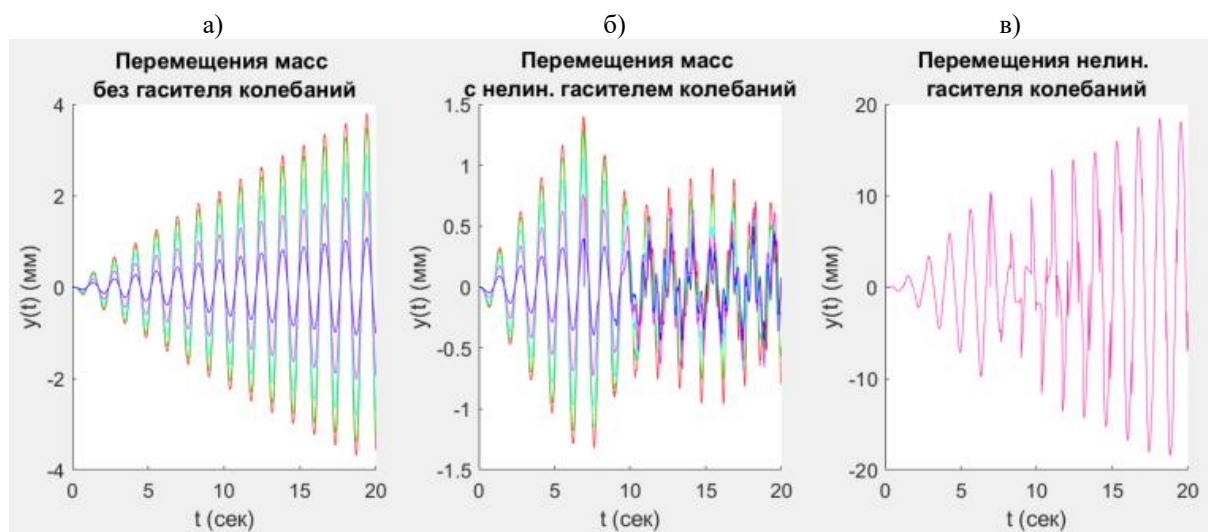


Рисунок 6 - Перемещения масс(ы) в системах(е):
 а - без гасителя колебаний, б - с нелинейным гасителем колебаний,
 в – нелинейного гасителя колебаний ($\gamma_{ds}=0.20$, $k_{ds2}=10.3$ кН/м)

Примечание к рисункам 5, 6: синяя кривая – масса №1, фиолетовая кривая – масса №2, голубая кривая – масса №3, зеленая кривая – масса №4, красная кривая – масса №5

Наибольшая эффективность гашения колебаний здания достигается с применением нелинейного гасителя колебаний с характеристиками $\gamma_{ds} = 0.20$, $k_{ds2} = 10.3$ кН/м. Характер снижения уровня колебаний массы (№5), в уровне которой установлен ДГК, можно увидеть на рисунке 7. Однако учитывая относительную сложность устройства ДГК с включающимися связями, целесообразность его устройства относительно других методов виброзащиты должна быть рассмотрена отдельно.

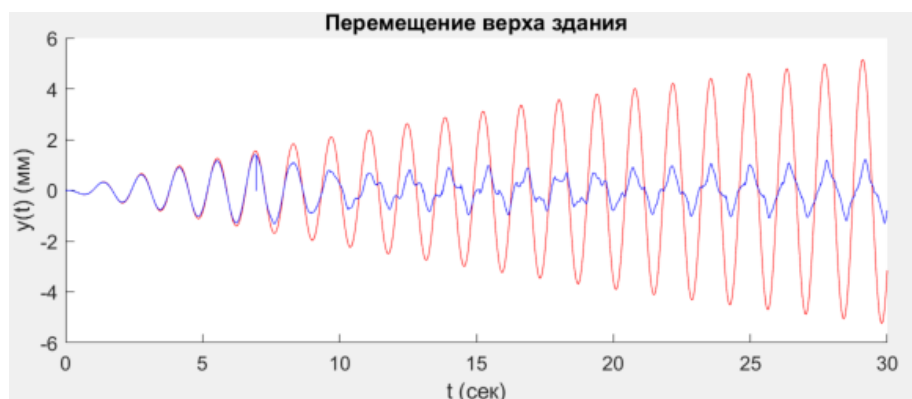


Рисунок 7 – Перемещения верха здания (массы №5)

Примечание к рисунку 7: красная кривая – перемещения в системе без гасителя колебаний, синяя кривая – перемещения в системе с нелинейным гасителем колебаний ($\gamma_{ds}=0.20$, $k_{ds2}=10.3$ кН/м)

При снижении демпфирования упругих элементов ДГК его эффективность снижается и уровень колебаний здания существенно увеличивается. Так при коэффициенте неупругого сопротивления γ_{ds} меньше 0.15 применение ДГК с включающимися связями становится неэффективным – колебания здания возрастают.

Перспективным направлением дальнейших исследований является более комплексный и детализированный анализ различных расчетных схем зданий и сооружений на основе представленного алгоритма, например, с учетом влияния нескольких гасителей колебаний в системе в виброзащиты здания, с линейными и нелинейными характеристиками изменяющимися, например, по степенному, экспоненциальному законам, а также с внедрением гасителей колебаний с демпфером вязкого трения, при различных значениях диссипативных коэффициентов и формирование обобщённых рекомендаций по устройству и оптимизации параметров гасителей колебаний с учетом специфики эксплуатации объектов, в частности, при устройстве виброактивного оборудования внутри здания на определенном этаже или фундаменте, и действия различного рода динамических воздействий.

4. Заключение

1. В статье приведен метод и алгоритм расчета систем с конечным числом степеней свободы с ДГК с линейными и нелинейными характеристиками, эффективность метода показана на примерах.
2. Приведенные в статье алгоритмы расчета позволяют рассматривать большое количество расчетных схем зданий и сооружений различной этажности с учетом влияния линейных и нелинейных ДГК.
3. Применение линейных и нелинейных гасителей колебаний при оптимальном подборе их характеристик и настройке под характер внешнего воздействия может быть эффективно в системе виброзащиты зданий.
4. На эффективность применения ДГК влияет коэффициент неупругого сопротивления (коэффициент демпфирования) упругих элементов гасителя, с увеличением которого, колебания здания снижаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по проектированию гасителей колебаний для защиты зданий и сооружений, подверженных горизонтальным динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра. ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат: 1978. 69 с.
2. Корнев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. М.: Наука, 1988. 304 с.
3. Дукарт А.В., Олейник А.И. Динамические гасители колебаний конструкций. М.: Издательство АСВ, 2015. 248 с.

4. Корнев Б.Г. Пикулев Н.А. Шейнин И.С. О мерах уменьшения вибраций при прохождении через резонанс во время пуска и остановки оборудования // *Колебания зданий и сооружений*. М.: Госстройиздат. 1963. С. 74-97.
5. Низомов Д.Н., Каландарбеков И. Численное решение задач по расчету зданий с учетом динамического гасителя колебаний // *Доклады Национальной Академии Наук Таджикистана*. 2010. Т. 53. №6. С. 460-467.
6. Нестерова О.П. Особенности расчета сооружений с динамическими гасителями колебаний по акселерограммам проектных землетрясений // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. №2 (73). С. 48-53.
7. Мирсаидов М.М., Ишматов А.Н., Юлдошев Б.Ш., Салимов Ш.М., Хазраткулов И.О. Нелинейные колебания высотного сооружения с динамическим гасителем колебаний // *Известия вузов. ПНД*. 2025. DOI: 10.18500/0869-6632-003186.
8. Богданова Г. А., Иванова Ж. В. Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2023. Т. 20. Вып. 3. С. 660–672. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672.
9. Hashim A., Taiki S. Dynamic vibration control of non-linear buildings using multiple tuned mass dampers. *Building Engineering*. 2023. 1(1): 488. DOI: 10.59400/be.v1i1.488.
10. Vilceanu V., Kavrakov I., Morgenthal G. Coupled numerical simulation of liquid sloshing dampers and wind–structure simulation model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Volume 240. id.105505. Germany. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105505.
11. Mirsaidov M., Abdikarimov R., Khudainazarov Sh., Sabirjanov T. Damping of high-rise structure vibrations with viscoelastic dynamic dampers. *E3S Web of Conferences*. 2020. 224. 02020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022402020.
12. Bogdanova G., Benin A. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts. *Technological Advancements in Construction 2022*. Pp.553-564. DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50.
13. P. Kuras, L. Ortyl, T. Owerko, R. Kocierz, M. Kedzierski, P. Podstolak. Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods. In *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016)*. Book 2. Vol. 3. Bulgaria. 2016. Pp. 255–262.
14. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям. 2-е издание. М.: Издательство АСВ, 2011. 384 с.
15. Петров И.А. Оценка эффективности виброзащитных систем с нелинейными характеристиками : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. Москва. 2013. 119 с.
16. Чернов Ю.Т., Петров И.А. Определение эквивалентных статических сил при расчете систем с выключающимися связями // *Вестник МГСУ*. 2012. №4. С. 98-101.
17. Зебилина М.Д.Х. Расчет виброзащитных систем с нелинейными элементами // *Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс] : сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых*. М. 2016. С. 281-285. URL: https://mgisu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2016/stroy_form_2016.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
18. Кбейли Д., Чернов Ю.Т. Расчет виброизолированной системы здания с нелинейными характеристиками при кинематическом воздействии (смещении основания) // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 4. С. 374-387.
19. Чернов Ю.Т. Интегральные уравнения второго рода в задачах расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы при произвольных динамических воздействиях и характере физических зависимостей // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023. 38(3). С. 155-167.
20. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов. М.: Стройвоенмориздат, 1948. 411 с.
21. Рекомендации по виброзащите несущих конструкций производственных зданий. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат: 1988. 217 с.
22. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений: Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979. 320 с. перевод изд.: *Dynamics of Structures*. Ray W. Clough, Joseph Penzien. New York, 1975.

REFERENCES

1. Recommendations for the design of vibration dampers to protect buildings and structures subjected to horizontal dynamic impacts from process equipment and wind. TsNIISK im. Kucherenko. Moscow: Stroyizdat; 1978. 69 p.
2. Korenev B.G., Reznikov L.M. Dynamic vibration absorbers: Theory and technical applications. Moscow: Nauka; 1988. 304 p.
3. Dukart A.V., Oleynik A.I. Dynamic vibration dampers of structures. Moscow: Publishing House ASV; 2015. 248 p.

4. Korenev B.G., Pikulev N.A., Sheynin I.S. On measures to reduce vibrations when passing through resonance during equipment start-up and shutdown. In: *Vibrations of buildings and structures*. Moscow: Gosstroyizdat; 1963. p. 74-97.
5. Nizomov D.N., Kalandarbekov I. Numerical solution of problems for calculating buildings considering a dynamic vibration absorber. *Doklady Natsional'noy Akademii Nauk Tadzhikistana [Proceedings of the National Academy of Sciences of Tajikistan]*. 2010;53(6):460-467.
6. Nesterova O.P. Features of calculation of structures with dynamic vibration absorbers based on design earthquake accelerograms. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*. 2019;(2(73)):48-53.
7. Mirsaidov M.M., Ishmatov A.N., Yuldoshev B.Sh., Salimov Sh.M., Khazratkulov I.O. Nonlinear oscillations of a high-rise structure with a dynamic vibration absorber. *Izvestiya vuzov. PND [Proceedings of Universities. Nonlinear Dynamics]*. 2025. DOI: 10.18500/0869-6632-003186.
8. Bogdanova G.A., Ivanova Zh.V. Application of dynamic vibration dampers to increase the stability of tower communication structures to wind effects. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg: PGUPS; 2023;20(3):660-672. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672.
9. Hashim A., Taiki S. Dynamic vibration control of non-linear buildings using multiple tuned mass dampers. *Building Engineering*. 2023;1(1):488. DOI: 10.59400/be.v1i1.488.
10. Vilceanu V., Kavrov I., Morgenthal G. Coupled numerical simulation of liquid sloshing dampers and wind-structure simulation model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;240:105505. Germany. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105505.
11. Mirsaidov M., Abdikarimov R., Khudainazarov Sh., Sabirjanov T. Damping of high-rise structure vibrations with viscoelastic dynamic dampers. *E3S Web of Conferences*. 2020;224:02020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022402020.
12. Bogdanova G., Benin A. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts. In: *Technological Advancements in Construction 2022*. p. 553-564. DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50.
13. Kuras P., Ortyl L., Owerko T., Kocierz R., Kedzierski M., Podstolak P. Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods. In: *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016)*. Book 2. Vol. 3. Bulgaria; 2016. p. 255-262.
14. Chernov Yu.T. *Vibrations of building structures. Analytical calculation methods. Fundamentals of design and standardization of vibrations of building structures subjected to operational dynamic impacts*. 2nd ed. Moscow: Publishing House ASV; 2011. 384 p.
15. Petrov I.A. *Assessment of the effectiveness of vibration protection systems with nonlinear characteristics [dissertation]*. Moscow; 2013. 119 p. (In Russian)
16. Chernov Yu.T., Petrov I.A. Determination of equivalent static forces in the calculation of systems with disconnecting connections. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012;(4):98-101.
17. Zebilila M.D.Kh. Calculation of vibration protection systems with nonlinear elements. In: *Construction – formation of living environment [Electronic resource]: Proceedings of the XIX International Interuniversity Scientific-Practical Conference of Students, Undergraduates, Postgraduates and Young Scientists*. Moscow; 2016. p. 281-285. URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2016/stroy-form-2016.pdf> (accessed: 12/15/2025).
18. Kbeili D., Chernov Yu.T. Calculation of a vibration-isolated building system with nonlinear characteristics under kinematic excitation (base displacement). *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Structures and Buildings]*. 2024;20(4):374-387.
19. Chernov Yu.T. Integral equations of the second kind in problems of calculating nonlinear systems with a finite number of degrees of freedom under arbitrary dynamic impacts and the nature of physical dependencies. *Vestnik NITs "Stroitel'stvo" [Bulletin of the Research Center "Construction"]*. 2023;38(3):155-167.
20. Barkan D.D. *Dynamics of bases and foundations*. Moscow: Stroyvoenmorizdat; 1948. 411 p.
21. *Recommendations for vibration protection of load-bearing structures of industrial buildings*. TsNIISK im. V.A. Kucherenko. Moscow: Stroyizdat; 1988. 217 p.
22. Clough R.W., Penzien J. *Dynamics of structures*. New York: McGraw-Hill; 1975. (Russian translation: Moscow: Stroyizdat; 1979. 320 p.)

Информация об авторах:

Мондрус Владимир Львович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры «Строительной и теоретической механики»
E-mail: mondrus@mail.ru

Парамонов Евгений Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительной и теоретической механики»
E-mail: evg.paramonov@yandex.ru

Панов Максим Александрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры «Строительной и теоретической механики»
E-mail: pnvmx@mail.ru

Information about authors:

Mondrus Vladimir L.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
doctor of Technical Science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor of the department of Structural and Theoretical Mechanics
E-mail: mondrus@mail.ru

Paramonov Evgenii E.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
candidate of Technical Science, associate professor of the department of Structural and Theoretical Mechanics
E-mail: evg.paramonov@yandex.ru

Panov Maksim A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
postgraduate student of the department of Structural and Theoretical Mechanics
E-mail: pnvmx@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.01.2026
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 18.01.2026
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

И.Г. ДЖАГАРЯН¹, В.С. ФЕДОРОВ²¹Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия²Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ БЕТОНА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Актуальность работы обусловлена ростом интенсивности воздействия железнодорожного и автомобильного транспорта на железобетонные конструкции транспортных сооружений, что определяет необходимость повышения требований к сопротивлению этих конструкций усталостным явлениям при многократно повторяющихся нагрузках. Показано, что лабораторная оценка выносливости бетона регламентируется отдельными стандартами и основана на установлении зависимости предельного уровня нагружения от числа циклов до разрушения. Вместе с тем результаты таких испытаний не интегрированы напрямую в расчётные методики, применяемые при проектировании железобетонных конструкций. В действующих нормах, в том числе в СП 63.13330, отсутствуют требования, позволяющие однозначно связать класс бетона с допустимым уровнем нагружения при расчётах на выносливость. В работе установлена связь расчётного сопротивления бетона с уровнем нагружения при действии циклических нагрузок, что позволяет сопоставить нормативные расчётные предпосылки с экспериментальными представлениями о выносливости бетона. Выявлено, что экспериментально-аналитические исследования выносливости лёгких высокопрочных бетонов в настоящее время практически отсутствуют, что не позволяет обоснованно применять действующие нормативные требования при их использовании в конструкциях, работающих в условиях циклического нагружения. Совокупность указанных факторов определяет актуальность настоящего исследования.

Ключевые слова: выносливость бетона; усталостная долговечность; циклические нагрузки; нормативные методы расчёта; транспортные сооружения; мостовые сооружения; лёгкий высокопрочный бетон

I.G. DZHAGARYAN¹, V.S. FEDOROV²¹Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, Russia²Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, Russia

REGULATORY ASSESSMENT OF CONCRETE ENDURANCE IN TRANSPORT STRUCTURES

Abstract. The relevance of this work is driven by the increasing intensity of impacts from rail and road transport on reinforced concrete structures of transport facilities, necessitating stricter requirements for the resistance of these structures to fatigue under repeated loads. It is shown that laboratory assessment of concrete fatigue strength is regulated by separate standards and is based on establishing the relationship between the ultimate load level and the number of cycles to failure. However, the results of such tests are not directly integrated into the calculation methods used in the design of reinforced concrete structures. Current standards, including SP 63.13330, lack requirements that explicitly link concrete grade to the permissible load level in fatigue calculations. This work establishes a relationship between the design resistance of concrete and the load level under cyclic loads, enabling a comparison of regulatory calculation assumptions with experimental data on concrete fatigue strength. It has been revealed that experimental and analytical studies of the fatigue life of lightweight high-strength concrete are currently virtually nonexistent, preventing the valid application of current regulatory requirements for their use in structures operating under cyclic loading. The combination of these factors determines the relevance of this study.

Keywords: concrete fatigue life; fatigue life; cyclic loads; regulatory calculation methods; transport structures; bridge structures; lightweight high-strength concrete

1. Введение

По данным информационного агентства ТАСС [1], объём перевозок грузов всеми видами транспорта в России ежегодно возрастает. Согласно данным «Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень. 2023 год» [2], количество перемещенной одной тонны груза на расстояние один километр (тонн-километр, ткм) в 2023 году больше на 57,2 млрд ткм по сравнению с 2022 годом. В работах предшественников [8-11] неоднократно отмечалось, что рост интенсивности транспортных потоков ведёт к увеличению циклических нагрузок на сооружениях транспортного назначения. При этом конструктивные элементы этих сооружений проектировались и строились многие десятилетия назад, когда фактический уровень динамических нагрузок был значительно ниже. Как следует из отраслевых публикаций и данных Министерства транспорта Российской Федерации [3], в 2024 году в рамках нацпроекта «Безопасные качественные дороги» запланировано реконструировать и отремонтировать более 58,7 тыс. погонных метров мостов и путепроводов. В свою очередь, по данным Росавтодор, около 13% сооружений находятся в аварийном и предаварийном состоянии [4].

Вопрос выносливости бетона уже рассматривался в научной литературе [10, 12, 13] применительно к традиционным тяжёлым бетонам. Однако в связи с внедрением новых, эффективных конструкционных бетонов, в частности, легких высокопрочных бетонов при строительстве и реконструкции мостов, путепроводов, тоннелей, аэродромных покрытий и объектов метрополитена, существующие нормативные и методические подходы, как показано в работах предшественников, не в полной мере позволяют оценить способность именно таких материалов сопротивляться циклическим нагрузкам на протяжении установленного срока службы. Таким образом, из обзора публикаций следует, что задача оценки выносливости железобетонных и бетонных конструкций с использованием легкого высокопрочного бетона остаётся нерешённой и становится ключевым направлением обеспечения долговечности транспортной инфраструктуры.

2. Модели и методы

Нормативные методы оценки выносливости

Вопрос оценки выносливости бетонных и железобетонных конструкций отражён в ряде нормативных документов, регламентирующих проектирование, испытания и расчёт сооружений транспортного назначения. Несмотря на наличие отдельных требований к долговечности и усталостной стойкости, подходы к оценке выносливости в отечественной и международной практике существенно различаются, что требует систематизации действующих норм и выявления направлений их развития.

Российская нормативная база по вопросам выносливости бетонных и железобетонных конструкций включает комплекс стандартов, сводов правил и методических документов, регламентирующих как лабораторные испытания материалов [5], так и расчёт конструкций, работающих под действием многократно повторяющихся нагрузок [6].

Одним из ключевых документов, регламентирующих лабораторные методы оценки усталостной прочности, является ГОСТ 24545-2021 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость» [5]. В стандарте определены требования к подготовке образцов, режимам циклического нагружения при сжатии, а также к обработке результатов испытаний. Документ устанавливает порядок определения предела выносливости бетона по числу циклов нагружения до разрушения и служит базой для формирования расчётных зависимостей при оценке долговечности конструкций. В результате проведения испытания по ГОСТ 24545-2021 можно установить соответствие требуемому пределу выносливости или построить линию регрессии, отражающую зависимость между уровнем напряжений и числом циклов нагружения до разрушения.

В соответствии с п. 3.3 ГОСТ 24545-2021 база испытаний N – это *наибольшая продолжительность испытаний на выносливость в циклах повторения нагрузки*,

гарантирующая, что материал не разрушится при неопределенно большом количестве циклов нагружения.[5]. Согласно требованиям данного стандарта, для бетона база испытаний принимается $N=2 \times 10^6$, если не установлено другое требование.

Суть испытания заключается в определении уровня нагружения η определяемому по формуле 1, при котором не будет происходить разрушение образца в течении установленной базы испытаний N и коэффициента асимметрии $\rho_6 = 0,1$ который определяется по формуле 2.

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}}{R_b}; \quad (1)$$

$$\rho_6 = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (2)$$

где: $\sigma_{\min}$; $\sigma_{\max}$ — минимальное и максимальное напряжение цикла, МПа;

R_b – призмная прочность бетона, МПа.

В соответствии с п. 7.2 ГОСТ 24545-2021 нагружение образцов соответствует уровням нагружения η 0,9; 0,8; 0,7; 0,6. Если среднее значение количества циклов одной серии, состоящей из трех образцов, меньше 2×10^6 циклов, заданным нормативным документом, то в соответствии с пунктом 8.2. делают заключение о несоответствии прочности бетона требованиям к его выносливости.

Следует отметить, что несмотря на наличие регламентированной методики экспериментального определения выносливости бетона, в действующих сводах правил отсутствует прямое задание предела выносливости бетона как расчётного параметра. В нормативных документах для транспортных сооружений усталостная долговечность бетона учитывается косвенно – через снижение расчётных сопротивлений и введение коэффициентов условий работы. При этом фактический уровень напряжений по отношению к прочности бетона, соответствующий таким нормативным допущениям, в явном виде не задаётся.

Данный подход реализован, в частности, в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [6], где в п. 7.26 расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , определяется по формуле:

$$R_{bf} = m_{b1} \times R_b = 0,6 \times \beta_b \times \varepsilon_b \times R_b, \quad (3)$$

где: m_{b1} – коэффициент условия работы, согласно СП....для циклического нагружения ;

R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию при расчетах по предельным состояниям первой группы принимаемы по таблице 7.6. СП 35;

β_b – коэффициент, учитывающий рост прочности бетона во времени и принимаемый по таблице 7.8. СП 35;

ε_b – коэффициент, зависящий от асимметрии цикла определяемый по формуле (2) повторяющихся напряжений и принимаемый по таблице 7.9. СП 35.

Для уточнения фактического уровня выносливости бетона по требованиям СП 35 был выполнен расчёт, направленный на количественную оценку уровня напряжений, который допускается нормативным документом при многократно повторяющихся нагрузках.

Определение нормативных уровней выносливости бетона по требованиям СП 35.13330.2011

Для количественной оценки нормативного уровня нагружения бетона выполнено сопоставление расчётного сопротивления R_{bf} , определяемого по требованиям СП 35, с призмной прочностью бетона. В качестве базового показателя прочности использована нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , принимаемая по таблице 6.7 СП 63.13330.2018 [7] где приведены следующие значения соответствующие классу прочности бетона (таблица 1).

Таблица 1 – Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} по СП 63

№ п.п.	Класс прочности бетона при сжатии	Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , МПа
1.	B20	15
2.	B25	18,5
3.	B30	22
4.	B35	25,5
5.	B40	29
6.	B45	32
7.	B50	36
8.	B55	39,5
9.	B60	43

Таким образом, уровень нагружения η характеризует отношение нормативно допускаемого напряжённого состояния бетона при многократно повторяющихся нагрузках R_{bf} к его нормативной прочности при осевом сжатии R_{bn} и определялся по формуле:

$$\eta = \frac{R_{bf}}{R_{bn}}, \quad (4)$$

Расчёты выполнены для бетонов классов от B20 до B60 при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_6 = 0,1$, что соответствует значениям коэффициента $\varepsilon_b = 1$, принимаемым по таблице 7.9 СП 35.

В таблице 2 приведены значения расчётного сопротивления бетона R_{bf} , определённые по требованиям СП 35 для различных классов прочности бетона при сжатии.

Таблица 2 – Значение R_{bf} , в зависимости от класса прочности бетона

№ п.п.	Класс прочности бетона при сжатии	Расчётное сопротивление бетона сжатию R_b , МПа	Коэффициент β_b	Расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , МПа
1.	B20	10,5	1,34	8,4
2.	B25	13,0	1,34	10,5
3.	B30	15,5	1,31	12,2
4.	B35	17,5	1,28	13,4
5.	B40	20,0	1,26	15,1
6.	B45	22,0	1,24	16,4
7.	B50	25,0	1,22	18,3
8.	B55	27,5	1,21	20,0
9.	B60	30,0	1,2	21,6

На основе данных, приведённых в таблицах 1 и 2, были определены нормативные уровни нагружения бетона η для различных классов прочности при многократно повторяющихся нагрузках. Полученные значения отражают фактический уровень напряжений, который допускается требованиями СП 35 при расчёте железобетонных конструкций транспортных сооружений на выносливость.

В таблице 3 приведено сопоставление нормативной прочности бетона при осевом сжатии R_{bn} , расчётного сопротивления бетона R_{bf} и соответствующих уровней нагружения η .

Таблица 3 – Сопоставление расчётного сопротивления R_{bf} по СП 35 с нормативной прочностью бетона при осевом сжатии R_{bn} .

Класс прочности бетона	Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , МПа	Расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , МПа	Уровень нагружения η
B20	15	8,4	0,53
B25	18,5	10,5	0,52
B30	22	12,2	0,51
B35	25,5	13,4	0,48
B40	29	15,1	0,47
B45	32	16,4	0,45
B50	36	18,3	0,46
B55	39,5	20,0	0,45
B60	43	21,6	0,45

Сопоставление нормативных уровней нагружения бетона η , определённых по требованиям СП 35, с данными экспериментальных [8-10] и расчётных исследований показывает, что нормативный подход не задаёт единого фиксированного уровня выносливости бетона как материала, а формирует допустимый эксплуатационный уровень напряжений, зависящий от класса прочности бетона.

Как следует из данных таблицы 3, для бетонов низких и средних классов прочности (B20–B25) нормативные значения уровня нагружения η находятся в диапазоне 0,50–0,53, что соответствует верхней части диапазона усталостной выносливости бетона, приводимой в литературе.

Так, в классической работе Probst E. [8] показано, что выносливость бетона при циклическом сжатии варьируется в диапазоне $\eta = 0,47–0,60$ от статической прочности. О. Я. Берг [9], анализируя физические основы прочности бетона и железобетона, приводит более широкий интервал значений выносливости — от 0,30 до 0,75, что отражает существенное влияние состава бетона, условий нагружения и критериев разрушения. В более современных исследованиях [10] расчётные значения предела выносливости бетона, как правило, находятся в более узком диапазоне $\eta = 0,47–0,55$.

В то же время для бетонов повышенных классов прочности (B40–B60) нормативный уровень нагружения η последовательно снижается до значений порядка 0,45–0,47, что соответствует нижней границе диапазона усталостной выносливости, приводимой в экспериментальных и расчётных работах. Это свидетельствует о том, что с увеличением класса прочности бетона нормативная методика СП 35 не приводит к пропорциональному повышению допустимого уровня циклических напряжений, а, напротив, формирует более консервативные расчётные предпосылки.

Особое значение выявленные особенности нормативной оценки выносливости приобретают в связи с расширением области применения лёгких высокопрочных бетонов (ЛВБ) в транспортном и инфраструктурном строительстве. Использование ЛВБ позволяет снизить собственный вес конструкций и уровень эксплуатационных нагрузок, однако их работа при многократно повторяющихся нагрузках в настоящее время изучена существенно в меньшей степени по сравнению с традиционными тяжёлыми бетонами.

В работе Р. Л. Маилян [11] отмечается, что предел выносливости лёгких бетонов ниже, чем у тяжёлых, на 5–20 %, однако автор не приводит детальных сведений о методике испытаний, уровне нагрузок и коэффициенте асимметрии циклов нагружения.

В работе Gray W. E. [13] исследовались цилиндрические образцы лёгкого бетона с прочностью при сжатии 24 МПа и 41 МПа (диаметр 7,5 см, высота 15,5 см). Нагружение осуществлялось при уровнях $\eta = 0,4\text{--}0,8$ с шагом 0,1 и частоте 16 Гц. По результатам испытаний установлено, что предел выносливости лёгкого бетона соответствует уровню $\eta \approx 0,6$, причём повышение прочности практически не влияет на этот показатель.

В работе Zhang M. и др. [12] экспериментально определены характеристики изгибной усталости ЛВБ при различных уровнях напряжений. Авторы выявили закономерную зависимость между числом циклов до разрушения и относительным уровнем нагрузки и отметили, что выносливость ЛВБ при изгибе составляет около 0,6 от статической прочности, что хорошо согласуется с результатами, полученными для тяжёлых бетонов.

Анализ опубликованных исследований показывает, что экспериментальные данные по усталостной выносливости ЛВБ носят фрагментарный характер и, как правило, получены при различных схемах нагружения, формах образцов и критериях разрушения. Это затрудняет их прямое сопоставление с нормативными расчётными уровнями, формируемыми требованиями СП 35, а также не позволяет однозначно оценить запас выносливости ЛВБ при эксплуатации транспортных сооружений.

При этом действующие нормативные документы не содержат дифференцированных расчётных положений для лёгких высокопрочных бетонов и фактически распространяют на них те же аппроксимационные подходы, что и для тяжёлых бетонов. В условиях ограниченности экспериментальных данных по выносливости ЛВБ это создаёт дополнительную неопределённость при назначении расчётных уровней нагружения и требует дальнейшего обоснования на основе целенаправленных экспериментальных исследований.

3. Результаты исследования и их анализ

В статье рассмотрены действующие нормативные методы оценки выносливости бетона, применяемые при проектировании и расчёте бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. Анализ выполнен на основе сопоставления требований стандартов, регламентирующих лабораторные испытания бетона на выносливость, и расчётных подходов, реализованных в отраслевых нормативных документах.

Показано, что ГОСТ 24545–2021 формирует экспериментальную основу для определения выносливости бетона, связывая предельный уровень нагружения с числом циклов до разрушения. Вместе с тем результаты испытаний, получаемые в соответствии с данным стандартом, в настоящее время не имеют прямого продолжения в расчётных методиках, используемых при проектировании бетонных и железобетонных конструкций.

Установлено, что в нормативных документах, регламентирующих расчёт мостовых сооружений (СП 35.13330.2011), учёт выносливости бетона осуществляется косвенно – за счёт снижения расчётных сопротивлений и введения коэффициентов условий работы. Такой подход приводит к формированию нормативного диапазона уровней нагружения $\eta = 0,45\text{--}0,53$ по отношению к призмочной прочности бетона, который фактически принимается в качестве допустимого эксплуатационного уровня напряжений при многократно повторяющихся нагрузках.

Сопоставление рассмотренных нормативных подходов показало, что при различии формальных методов учёта выносливости их объединяет отсутствие прямой связи с экспериментально определяемыми усталостными характеристиками бетона, такими как число циклов до разрушения, амплитуда напряжений и асимметрия цикла. Нормативная оценка выносливости в настоящее время основывается преимущественно на косвенных понижающих допущениях, величины которых не калибруются по данным усталостных испытаний.

Особую актуальность выявленные ограничения приобретают в связи с расширением области применения лёгких высокопрочных бетонов (ЛВБ) в транспортном и инфраструктурном строительстве. Использование ЛВБ позволяет существенно снизить массу конструкций и эксплуатационные нагрузки, однако действующие нормативные методы

оценки выносливости не учитывают особенности данных материалов и не содержат специализированных положений, регламентирующих их работу при многократно повторяющихся нагрузках.

4. Заключение

1. Действующие нормативные методы оценки выносливости бетона носят отраслевой и аппроксимационный характер и не обеспечивают унифицированного подхода к учёту усталостной долговечности современных бетонов, включая лёгкие высокопрочные составы.

2. Отсутствует прямая связь между экспериментально определяемыми усталостными характеристиками бетона (число циклов до разрушения, амплитуда напряжений, асимметрия цикла) и расчётными методиками, регламентированными отраслевыми нормативными документами.

3. Существующий косвенный учёт выносливости через снижение расчётных сопротивлений и введение коэффициентов условий работы не калибруется по данным усталостных испытаний, что ограничивает достоверность оценки долговечности конструкций при циклических нагрузках.

4. Выявленные ограничения указывают на целесообразность дальнейшего развития нормативно-методической базы с учётом экспериментальных данных по выносливости бетона, особенно применительно к сооружениям транспортного назначения, эксплуатируемым в условиях интенсивных циклических нагрузок, а также к конструкциям из лёгких высокопрочных бетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевозки грузов всеми видами транспорта в России увеличиваются [Электронный ресурс] // ТАСС. Мнения. — Режим доступа: <https://tass.ru/opinions/25386075> (дата обращения: 21.10.2025).
2. Транспорт России: информационно-статистический бюллетень. — 2023 г. — М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2024. — 42с.
3. Министерство транспорта Российской Федерации. В 2024 году благодаря нацпроекту «Безопасные качественные дороги» строят и обновляют 58,7 тыс. пог. м мостов и путепроводов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mintrans.gov.ru/press-center/news/11399> (дата обращения: 21.10.2025).
4. В России около 4 тыс. автомобильных мостов находятся в аварийном либо предаварийном состоянии [Электронный ресурс] // РЖД-Партнёр. — 2024. — Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/auto/news/v-rossii-okolo-4-tys-avtomobilnykh-mostov-nakhodyatsya-v-avariynom-libo-predavariynom-sostoyanii/> (дата обращения: 21.10.2025).
5. ГОСТ 24545-2021. Бетоны. Методы испытаний на выносливость [Электронный ресурс]. — Введ. 2022-03-01. — М.: Стандартинформ, 2022. — 24 с. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182179> (дата обращения: 22.10.2025).
6. СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Свод правил. Расчёт и строительство». — Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 2011. — 344 с.
7. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». — Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 2018. — 416 с.
8. Probst E. The Influence of Rapidly Alternating Loading on Concrete and Reinforced Concrete // The Structural Engineer. — 1931. — Vol. 9, Issue 10: p. 326–340; Issue 12: p. 410–429.
9. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О. Я. Берг, д-р техн. наук проф. - Москва : Госстройиздат, 1961. - 96 с. : ил.; 22 см.
10. Мирсаяпов Илизар Т., Гарифуллин Д. Р. Инженерные методы расчета деформаций, модуля упругости и предела выносливости бетона при циклическом нагружении // Известия КазГАСУ. 2020. №3 (53). С. 15-26.
11. Р. Л. Маилян Проектирование и расчет конструкций из легких бетонов// Бетон и железобетон. — 1985. — № 7, апр. — С. 26–28.
12. Zhang M., Ma J., Wang Q., Shi C.. 2018 Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete // Construction and Building Materials 173 (2018). С. 90–100
13. Gray W. E. Mc lavghlin J.FAntrin. J. D. Study of the Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete // Joint Highway Research Project. November 1960 №20 C.

REFERENCES

1. Freight transportation by all modes of transport in Russia is increasing [Electronic resource] // TASS. Opinions. — Access mode: <https://tass.ru/opinions/25386075> (accessed: 10/21/2025).
2. Transport of Russia: information and statistical bulletin. — 2023. — Moscow: Ministry of Transport of the Russian Federation, 2024. — 42 p.
3. Ministry of Transport of the Russian Federation. In 2024, thanks to the national project "Safe Quality Roads", 58.7 thousand linear meters of bridges and overpasses are being built and renovated [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.mintrans.gov.ru/press-center/news/11399> (accessed: 10/21/2025).
4. About 4 thousand road bridges in Russia are in emergency or pre-emergency condition [Electronic resource] // RZD-Partner. — 2024. — Access mode: <https://www.rzd-partner.ru/auto/news/v-rossii-okolo-4-tys-avtomobilnykh-mostov-nakhodyatsya-v-avariynom-libo-predavariynom-sostoyanii/> (accessed: 10/21/2025).
5. GOST 24545-2021. Concretes. Test methods for fatigue endurance [Electronic resource]. — Effective 03/01/2022. — Moscow: Standartinform, 2022. — 24 p. — Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200182179> (accessed: 10/22/2025).
6. SP 35.13330.2011 "Bridges and pipes. Code of practice. Design and construction". — Moscow: JSC "TSNIIPromzdaniy", 2011. — 344 p.
7. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions". — Moscow: JSC "TSNIIPromzdaniy", 2018. — 416 p.
8. Probst E. The Influence of Rapidly Alternating Loading on Concrete and Reinforced Concrete. *The Structural Engineer*. 1931;9(10):326–340; (12):410–429.
9. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Gosstroyizdat; 1961. 96 p.
10. Mirsayapov Ilizar T., Garifullin D.R. Engineering methods for calculating deformations, modulus of elasticity and endurance limit of concrete under cyclic loading. *Izvestiya KazGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*. 2020;(3(53)):15-26.
11. Mailyan R.L. Design and calculation of lightweight concrete structures. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*. 1985;(7):26–28.
12. Zhang M., Ma J., Wang Q., Shi C. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;173:90–100.
13. Gray W.E., McLaughlin J.F., Antrim J.D. Study of the Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete. Joint Highway Research Project. November 1960;(20).

Информация об авторах:

Джагарян Игорь Григорьевич

Старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ)
E-mail: djagajon@gmail.com

Федоров Виктор Сергеевич,

Профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ)
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Information about authors:

Dzhagaryan Igor Gr.

Senior Lecturer, Department of "Building structures, buildings and constructions", Russian University of Transport, RUT (MIIT)
E-mail: djagajon@gmail.com

Fedorov Viktor S.

Professor, Department of "Building structures, buildings and constructions", Russian University of Transport, RUT (MIIT)
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.02.2026
Одобрена после рецензирования 13.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 08.02.2026
Approved after reviewing 13.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

А.Д. МЕРЗЛЯКОВА¹, А.С. ЧЕПУРНИКОВ², Б.М. ЯЗЫЕВ², В.С. ТЮРИНА²¹«Российский университет транспорта» РУТ(МИИТ), Москва, Россия²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЁТА ПОЛОГИХ ТРЁХСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ НАВЬЕ

Аннотация. Представлен аналитический метод расчёта трёхслойных пологих оболочек с лёгким заполнителем на основе решения Навье. Рассмотрены оболочки, шарнирно опёртые по прямоугольному контуру. На основе принятых кинематических гипотез и уравнений трёхмерной теории упругости выведена система разрешающих дифференциальных уравнений относительно функций прогиба, напряжений и усреднённых перемещений. Для решения этой системы предложен метод точного аналитического решения путём разложения неизвестных функций и нагрузки в двойные тригонометрические ряды, аналогичный классическому подходу Навье. Метод апробирован на примере оболочки в форме эллиптического параболоида под равномерной нагрузкой. Показана высокая сходимость рядов уже при небольшом числе членов. Результаты аналитического расчёта продемонстрировали хорошее согласование с данными, полученными численно методом конечных разностей. С использованием разработанного метода проведён параметрический анализ влияния модуля сдвига заполнителя на напряжённо-деформированное состояние конструкции. Установлено, что снижение модуля сдвига (при ползучести) приводит к перераспределению внутренних усилий: уменьшаются поперечные силы и изгибающие моменты, но возрастают продольные и сдвигающие усилия. В результате эквивалентные напряжения в верхней обшивке могут увеличиваться до 19%, что необходимо учитывать для обеспечения долговечности конструкций. Предложенный метод является эффективным инструментом для анализа напряженно-деформированного состояния трёхслойных оболочек.

Ключевые слова: трехслойные оболочки, пологие оболочки, легкий заполнитель, аналитическое решение, ползучесть заполнителя, функция напряжений, деформации сдвига.

A.D. MERZLIAKOVA¹, A.S. CHEPURNENKO², B.M. YAZYEV², V.S. TYURINA²¹ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING SHALLOW THREE-LAYER SHELLS BASED ON THE NAVIER SOLUTION

Abstract. The analytical method for calculating three-layer shallow shells with a lightweight core based on the Navier solution is presented. Shells with a rectangular contour are considered. Based on the adopted kinematic hypotheses and the equations of three-dimensional elasticity theory, a system of resolving differential equations for the deflection, stress, and averaged displacement functions is derived. To solve this system, a method for an exact analytical solution is proposed by expanding the unknown functions and the load in double trigonometric series, similar to the classical Navier approach. The method is tested using an elliptical paraboloid-shaped shell under a uniform load. High convergence of the series is demonstrated even for a small number of terms. The results of the analytical calculation demonstrated good agreement with the data obtained numerically using the finite difference method. Using the developed method, a parametric analysis of the filler shear modulus effect on the stress-strain state of the structure was carried out. It has been established that a decrease in the shear modulus (during creep) leads to a redistribution of internal forces: transverse forces and bending moments decrease, but longitudinal and shear forces increase. As a result, equivalent stresses in the upper skin can increase by up to 19%, which must be taken into account to ensure the durability of the structure. The proposed method is an effective tool for analyzing the stress-strain state of sandwich shells.

Keywords: three-layer shells, shallow shells, lightweight filler, analytical solution, filler creep, stress function, shear strain.

© Мерзлякова А.Д., Чепуриенко А.С., Языев Б.М., Тюрина В.С., 2026

1. Введение

Трёхслойные пологие оболочки с лёгким наполнителем широко применяются в современном строительстве и аэрокосмической индустрии благодаря высокой удельной жёсткости, тепло- и звукоизоляционным свойствам. Проектирование таких конструкций требует учёта специфических особенностей их работы, в первую очередь деформаций поперечного сдвига в среднем слое, что существенно усложняет аналитическое описание их напряжённо-деформированного состояния.

Обширный пласт исследований в области расчёта многослойных оболочек опирается на классические работы В.З. Власова [1], А.Л. Гольденвейзера [2] и С.П. Тимошенко [3], заложивших основы теории пологих оболочек. Значительный вклад в теорию трёхслойных конструкций внесли работы, предполагающие линейный закон распределения касательных напряжений в наполнителе [4–6]. Однако эти подходы, как правило, приводят к системам высокого порядка, разрешимым только численными методами.

За последние десятилетия численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР), стали доминирующими в анализе трёхслойных структур [7–10]. В работах Z.Ying [11], N. Jafari [12], N. Kumar [13] показана эффективность МКЭ для учёта геометрической нелинейности и ползучести полимерных наполнителей. Аналитические решения, когда они существуют, остаются востребованными для верификации численных моделей, понимания физической сущности явлений и параметрических исследований.

В контексте аналитических решений метод Навье для пластин и оболочек с шарнирным опиранием по контуру является классическим [3]. Его адаптация для учёта деформаций поперечного сдвига была рассмотрена в работе [14], а в работе [15] данный метод был применен в задаче ползучести однослойной оболочки. Тем не менее, анализ научной литературы показывает отсутствие замкнутого аналитического решения в виде двойных тригонометрических рядов (аналогичного решению Навье) для системы разрешающих уравнений трёхслойной полой оболочки с лёгким наполнителем, учитывающего как мембранные, так и изгибные усилия, а также деформации поперечного сдвига. Большинство существующих аналитических подходов, как правило, ограничиваются частными случаями, рассматривая, к примеру, только цилиндрический изгиб [16,17].

Особую актуальность приобретает учёт влияния ползучести (длительной релаксации) полимерного наполнителя на несущую способность конструкции, что освещалось в работах [18–21]. Однако эти исследования носят преимущественно экспериментальный или численный характер. Недостаточная изученность влияния изменения модуля сдвига наполнителя во времени на перераспределение всех компонент внутренних усилий (изгибающих моментов, поперечных, продольных и сдвигающих сил) в рамках единого аналитического подхода определяет научную новизну и практическую значимость данного исследования.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки эффективного и наглядного аналитического инструмента для расчёта и параметрического анализа трёхслойных пологих оболочек, позволяющего оценивать влияние сдвиговой податливости и её релаксации во времени на все компоненты напряжённо-деформированного состояния.

Цель исследования – разработка аналитического метода расчёта трёхслойных пологих оболочек с лёгким наполнителем на основе замкнутого решения системы разрешающих уравнений в форме двойных тригонометрических рядов и исследование на его основе влияния модуля сдвига наполнителя на НДС конструкции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. На основе принятых кинематических гипотез и уравнений трёхмерной теории упругости в криволинейных координатах вывести систему разрешающих дифференциальных уравнений относительно функций прогиба, напряжений и усреднённых перемещений для трёхслойной полой оболочки.

2. Предложить метод точного аналитического решения полученной системы для случая шарнирного опирания по контуру прямоугольной в плане оболочки путём разложения искомых функций и нагрузки в двойные тригонометрические ряды.

3. На примере оболочки в форме эллиптического параболоида под равномерной нагрузкой провести численную апробацию метода, исследовать сходимость рядов и выполнить верификацию путём сравнения с результатами численного моделирования.

4. Используя разработанный метод, провести параметрический анализ влияния модуля сдвига заполнителя (моделирующего кратковременное и длительное нагружение) на распределение прогибов, внутренних усилий и эквивалентных напряжений в несущих слоях.

2. Модели и методы

Рассмотрим бесконечно малый элемент трехслойной оболочки в криволинейной системе координат $(\alpha\beta z)$ (рис. 1). Толщина наружных несущих слоев принимается малой по сравнению с толщиной среднего слоя. Все слои считаются упругими и изотропными. При получении разрешающих уравнений пренебрегаем нормальными напряжениями σ_α^c и σ_β^c в среднем слое в силу низкого модуля упругости заполнителя по сравнению с обшивками, а также касательными напряжениями $\tau_{z\alpha}^c, \tau_{z\alpha}^n, \tau_{z\beta}^c, \tau_{z\beta}^n$ в обшивках. В рамках принятой модели вводится допущение о равенстве толщин несущих слоёв ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$). Кроме того, считается, что напряжение в пределах толщины каждой обшивки не изменяется (распределено равномерно).

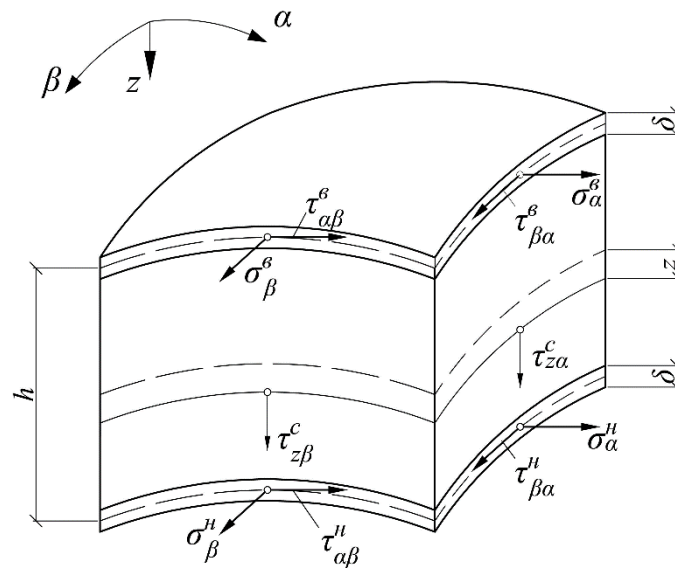


Рисунок 1 – Элемент трехслойной оболочки

Исходными для получения геометрических соотношений рассматриваемого элемента служат фундаментальные уравнения трёхмерной механики деформируемого тела в криволинейных координатах $\alpha\beta\gamma$:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha\alpha} &= \frac{1}{H_1} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial \beta} v + \frac{1}{H_1 H_3} \frac{\partial H_1}{\partial \gamma} w; \\ \varepsilon_{\beta\beta} &= \frac{1}{H_2} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_2}{\partial \gamma} w + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial \alpha} u; \\ \varepsilon_{\gamma\gamma} &= \frac{1}{H_3} \frac{\partial w}{\partial \gamma} + \frac{1}{H_3 H_1} \frac{\partial H_3}{\partial \alpha} u + \frac{1}{H_3 H_2} \frac{\partial H_3}{\partial \beta} v;\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned} 2\varepsilon_{\alpha\beta} &= \frac{H_1}{H_2} \frac{\partial}{\partial\beta} \left(\frac{1}{H_1} u \right) + \frac{H_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial\alpha} \left(\frac{1}{H_2} v \right); \\ 2\varepsilon_{\beta\gamma} &= \frac{H_2}{H_3} \frac{\partial}{\partial\gamma} \left(\frac{1}{H_2} v \right) + \frac{H_3}{H_2} \frac{\partial}{\partial\beta} \left(\frac{1}{H_3} w \right); \\ 2\varepsilon_{\gamma\alpha} &= \frac{H_3}{H_1} \frac{\partial}{\partial\alpha} \left(\frac{1}{H_3} w \right) + \frac{H_1}{H_3} \frac{\partial}{\partial\gamma} \left(\frac{1}{H_1} u \right), \end{aligned}$$

где u, v, w – перемещения по направлениям α, β, γ , ε_{ij} – составляющие тензора деформаций, H_1, H_2, H_3 – коэффициенты Ламе.

При замене криволинейной координаты γ прямолинейной координатой z коэффициент H_3 равен единице, а коэффициенты H_1 и H_2 выражаются через коэффициенты первой квадратичной формы A и B , а также главные кривизны срединной поверхности k_1 и k_2 в виде:

$$\begin{aligned} H_1 &= A(1 + k_1 z); \\ H_2 &= B(1 + k_2 z). \end{aligned} \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) приводит к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial\alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial\beta} v + k_1 w; \\ \varepsilon_\beta &= \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial\beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial\alpha} u + k_2 w; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; \\ 2\varepsilon_{\alpha\beta} &= \frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial\beta} \left(\frac{1}{A} u \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial\alpha} \left(\frac{1}{B} v \right); \\ 2\varepsilon_{\beta z} &= \frac{\partial v}{\partial z} - k_2 v + \frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial\beta}; \\ 2\varepsilon_{\alpha z} &= \frac{\partial u}{\partial z} - k_1 u + \frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Вместо парных индексов для линейных деформаций здесь и далее будет использоваться один индекс. Деформации несущих слоев на основе уравнений (3) записываются в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha^{e(n)} &= \frac{1}{A} \frac{\partial u^{e(n)}}{\partial\alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial\beta} v^{e(n)} + k_1 w; \\ \varepsilon_\beta^{e(n)} &= \frac{1}{B} \frac{\partial v^{e(n)}}{\partial\beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial\alpha} u^{e(n)} + k_2 w; \\ 2\varepsilon_{\alpha\beta}^{e(n)} &= \frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial\beta} \left(\frac{1}{A} u^{e(n)} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial\alpha} \left(\frac{1}{B} v^{e(n)} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $u^{e(n)}$ и $v^{e(n)}$ – перемещения верхней (нижней) обшивки.

Характер распределения перемещений по толщине среднего слоя принимается линейным:

$$u^c = \frac{u^e + u^n}{2} + \frac{u^n - u^e}{h} z = \tilde{u} + \varphi z; \quad (5)$$

$$v^c = \frac{v^e + v^h}{2} + \frac{v^h - v^e}{h} z = \tilde{v} + \psi z.$$

Подстановка (5) в (3) приводит к равенствам:

$$\begin{aligned} 2\varepsilon_{\alpha z}^c &= \varphi - k_1(\tilde{u} + \varphi z) + \frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha}; \\ 2\varepsilon_{\beta z}^c &= \psi - k_2(\tilde{v} + \psi z) + \frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для упругих изотропных обшивок связь между напряжениями и деформациями записывается в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha}^{e(h)} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\alpha}^{e(h)} + \nu \varepsilon_{\beta}^{e(h)}); \\ \sigma_{\beta}^{e(h)} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\beta}^{e(h)} + \nu \varepsilon_{\alpha}^{e(h)}); \\ \tau_{\alpha\beta}^{e(h)} &= \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{\alpha\beta}^{e(h)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона несущих слоев.

Касательные напряжения в среднем слое определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau_{\alpha z}^c &= 2G\varepsilon_{\alpha z}^c = G \left(\varphi - k_1(\tilde{u} + \varphi z) + \frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha} \right); \\ \tau_{\beta z}^c &= 2G\varepsilon_{\beta z}^c = G \left(\psi - k_2(\tilde{v} + \psi z) + \frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где G – модуль сдвига среднего слоя.

С учетом принятых гипотез средний слой может воспринимать только поперечные силы Q_{α} и Q_{β} . Изгибающие моменты M_{α} и M_{β} , а также крутящий момент $M_{\alpha\beta}$ полностью воспринимаются обшивками. Внутренние усилия, воспринимаемые наружными слоями, записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{\alpha} &= \delta(\sigma_{\alpha}^h - \sigma_{\alpha}^e) \frac{h}{2} = D \left(\frac{1}{A} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \psi + \nu \left(\frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \varphi \right) \right); \\ M_{\beta} &= \delta(\sigma_{\beta}^h - \sigma_{\beta}^e) \frac{h}{2} = D \left(\frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \varphi + \nu \left(\frac{1}{A} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \psi \right) \right); \\ M_{\alpha\beta} &= \delta(\tau_{\alpha\beta}^h - \tau_{\alpha\beta}^e) \frac{h}{2} = \frac{D(1-\nu)}{2} \left[\frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\varphi}{A} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\psi}{B} \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $D = \frac{E\delta h^2}{2(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость трехслойной оболочки.

Продольные силы N_{α} и N_{β} , а также сдвигающая сила $N_{\alpha\beta}$ также воспринимаются только обшивками и вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} N_{\alpha} &= \delta(\sigma_{\alpha}^h + \sigma_{\alpha}^e) = \\ &= \frac{2E\delta}{1-\nu^2} \left[\frac{1}{A} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \tilde{v} + \frac{\nu}{B} \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \beta} + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \tilde{u} \right) + (k_1 + \nu k_2) w \right]; \\ N_{\beta} &= \delta(\sigma_{\beta}^h + \sigma_{\beta}^e) = \end{aligned} \quad (10)$$

$$= \frac{2E\delta}{1-\nu^2} \left[\frac{1}{B} \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \beta} + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \tilde{u} \right) + \frac{\nu}{A} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \alpha} + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial \beta} \tilde{v} \right) + (k_2 + \nu k_1) w \right];$$

$$N_{\alpha\beta} = \delta(\tau_{\alpha\beta}^e + \tau_{\alpha\beta}^u) = \frac{E\delta}{1+\nu} \left[\frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\tilde{u}}{A} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\tilde{v}}{B} \right) \right].$$

Поперечные силы гипотезы с учетом гипотезы о полном их восприятии средним слоем запишутся в виде:

$$Q_\alpha = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{\alpha z}^c dz = Gh \left(\varphi - k_1 \tilde{u} + \frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha} \right);$$

$$Q_\beta = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{\beta z}^c dz = Gh \left(\psi - k_2 \tilde{v} + \frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta} \right).$$
(11)

При использовании гипотез теории пологих оболочек приведенные выше уравнения существенно упрощаются. Криволинейные координаты α и β принимаются приближенно равными Декартовым координатам x и y ($A=1$, $B=1$). Если поверхность оболочки задана в явном виде уравнением:

$$z = f(x, y),$$
(12)

то главные кривизны могут быть вычислены по формулам:

$$k_1 = k_x = -\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; k_2 = k_y = -\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$
(13)

В силу малости кривизн k_1 и k_2 для пологой оболочки можно пренебречь членами $k_1 \tilde{u}$ и $k_2 \tilde{v}$ в формулах (11) и записать их в виде:

$$Q_x = Gh \left(\varphi + \frac{\partial w}{\partial x} \right);$$

$$Q_y = Gh \left(\psi + \frac{\partial w}{\partial y} \right).$$
(14)

Формулы (9) и (10) при использовании гипотез теории пологих оболочек принимают вид:

$$M_x = D \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \nu \frac{\partial \psi}{\partial y} \right); M_y = D \left(\nu \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \right);$$

$$M_{xy} = \frac{D(1-\nu)}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \right);$$

$$N_x = \frac{2E\delta}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y + (k_x + \nu k_y) w);$$

$$N_y = \frac{2E\delta}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x + (k_y + \nu k_x) w);$$

$$N_{xy} = \frac{E\delta}{1+\nu} \gamma_{xy},$$
(15)

где $\varepsilon_x = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}$; $\varepsilon_y = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$; $\gamma_{xy} = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}$.

Для входящих в (15) усредненных деформаций ε_x , ε_y и γ_{xy} справедливо уравнение совместности:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (16)$$

Уравнения равновесия теории пологих оболочек имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= 0; \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x &= 0; \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y &= 0; \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - k_x N_x - k_y N_y + q &= 0, \end{aligned} \quad (17)$$

где q – поверхностная нагрузка.

Удовлетворить первым двум уравнениям системы (17) можно путем введения специальной функции Φ , часто называемой функцией напряжений, которая связана с внутренними усилиями формулами:

$$N_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}; \quad N_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}; \quad N_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}. \quad (18)$$

Зависимости, позволяющие определить величины ε_x , ε_y и γ_{xy} через усилия, следуют из уравнений (15):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{2E\delta} (N_x - \nu N_y) - k_x w = \frac{1}{2E\delta} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right) - k_x w; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{2E\delta} (N_y - \nu N_x) - k_y w = \frac{1}{2E\delta} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) - k_y w; \\ \gamma_{xy} &= \frac{1+\nu}{E\delta} N_{xy} = -\frac{1+\nu}{E\delta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (19)$$

В результате подстановки соотношений (19) в уравнение (16) получается первое разрешающее уравнение системы:

$$\frac{1}{2E\delta} \nabla^2 \nabla^2 \Phi - k_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (20)$$

Преобразуя последнее уравнение равновесия системы (17) путём подстановки в него соотношений (14) и учитывая равенства (18), приходим ко второму разрешающему уравнению:

$$Gh(F + \nabla^2 w) - k_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -q, \quad (21)$$

где $F = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y}$.

Далее сведём последние три уравнения в (17) к одному, исключив поперечные силы:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - k_x N_x - k_y N_y + q = 0. \quad (22)$$

Для получения третьего дифференциального уравнения достаточно подставить в (22) выражения для M_x , M_y и M_{xy} из (15):

$$D\nabla^2 F - k_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -q. \quad (23)$$

В итоге, расчёт трёхслойной полой оболочки с облегчённым заполнителем сводится к решению системы трёх линейных дифференциальных уравнений в частных производных (20), (21), (23) относительно неизвестных функций прогиба w , функции напряжений Φ и функции перемещений F .

В случае шарнирного закрепления прямоугольной оболочки по контуру (при условии опирания на диафрагмы, обладающими бесконечной жёсткостью в своей плоскости и нулевой жёсткостью из неё) существует возможность построения точного аналитического решения. Для этого применяется метод разложения в двойные тригонометрические ряды, аналогичный классическому решению Навье для пластин.

Функции Φ, F, w представляются в виде:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ w(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ F(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} F_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \end{aligned} \quad (24)$$

где a и b – размеры оболочки в плане.

Принятые функции $w(x, y)$ и $\Phi(x, y)$ обеспечивают равенство нулю на контуре прогибов и продольных сил N_x, N_y , что соответствует рассматриваемому закреплению.

Поверхностная нагрузка q также раскладывается в двойной ряд Фурье по синусам:

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (25)$$

Коэффициенты разложения q_{mn} вычисляются через двойной интеграл:

$$q_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy. \quad (26)$$

В частном случае равномерно распределенной по площади нагрузки ($q = \text{const}$) коэффициенты q_{mn} определяются по формуле:

$$q_{mn} = \begin{cases} \frac{16q}{mn\pi^2}, & \text{если } m \text{ и } n - \text{нечетные} \\ 0, & \text{если } m \text{ или } n - \text{четное.} \end{cases} \quad (27)$$

Решение рассмотрим на примере оболочки в форме эллиптического параболоида (рис. 2).

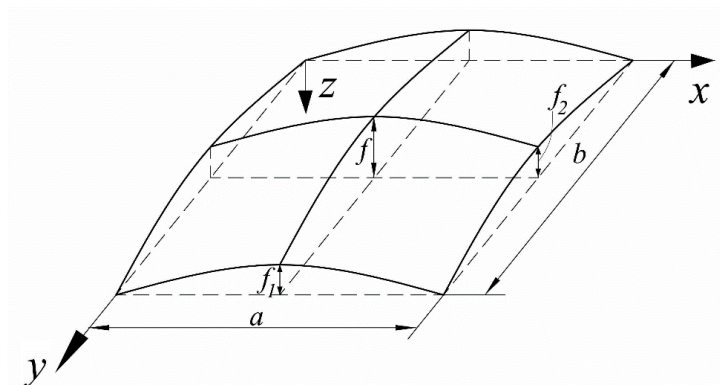


Рисунок 2 – Геометрия рассматриваемой оболочки

Уравнение поверхности для рассматриваемой оболочки имеет вид:

$$z = f \left\{ \frac{f_1}{f} \left(2 \frac{x}{a} - 1 \right)^2 + \frac{f_2}{f} \left(2 \frac{y}{b} - 1 \right)^2 - 1 \right\}, \quad (28)$$

где $f = f_1 + f_2$.

Формулы для главных кривизн оболочки имеют вид:

$$k_x = -\frac{8f_1}{a^2}; k_y = -\frac{8f_2}{b^2}. \quad (29)$$

Подставив (29) в (20), (21), (23), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2E\delta} \nabla^2 \nabla^2 \Phi + \frac{8f_1}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{8f_2}{b^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0; \\ Gh(F + \nabla^2 w) + \frac{8f_1}{a^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{8f_2}{b^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} &= -q; \\ D\nabla^2 F + \frac{8f_1}{a^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{8f_2}{b^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} &= -q. \end{aligned} \quad (30)$$

Подстановка разложений (24) и (25) в (30) приводит к системе из трех линейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными для каждой тройки коэффициентов Φ_{mn} , w_{mn} , F_{mn} :

$$\begin{aligned} \frac{\pi^2}{2E\delta} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \Phi_{mn} - \frac{8}{a^2 b^2} (f_1 n^2 + f_2 m^2) w_{mn} &= 0; \\ Gh \left(-\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) w_{mn} + F_{mn} \right) - \frac{8\pi^2}{a^2 b^2} (f_1 n^2 + f_2 m^2) \Phi_{mn} &= -q_{mn}; \\ \pi^2 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) F_{mn} + \frac{8\pi^2}{a^2 b^2} (f_1 n^2 + f_2 m^2) \Phi_{mn} &= q_{mn}. \end{aligned} \quad (31)$$

Определив из (31) коэффициенты Φ_{mn} , w_{mn} , F_{mn} , далее можно найти прогибы оболочки по второй формуле из (24), а также усилия N_x , N_y и N_{xy} по формулам:

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \Phi_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ N_y &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \Phi_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ N_{xy} &= - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{mn\pi^2}{ab} \Phi_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (32)$$

Уравнения (20), (21), (23) не являются достаточными для нахождения величин M_x , M_y , M_{xy} , Q_x , Q_y . Чтобы восполнить этот недостаток, необходимо вывести два вспомогательных уравнения для функций φ и ψ . С этой целью подставим первые три выражения из (15) в третье и четвертое уравнения системы (17):

$$Q_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right); \quad (33)$$

$$Q_y = \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right).$$

Применим функцию перемещений F для исключения функции ψ из формулы для Q_x и функции φ из формулы для Q_y в (33):

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{D}{2} \left((1-\nu) \nabla^2 \varphi + (1+\nu) \frac{\partial F}{\partial x} \right); \\ Q_y &= \frac{D}{2} \left((1-\nu) \nabla^2 \psi + (1+\nu) \frac{\partial F}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (34)$$

Приравнивание правых частей выражений (34) и (14) дает:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi - \frac{2Gh}{D(1-\nu)} \varphi &= \frac{2Gh}{D(1-\nu)} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial F}{\partial x}; \\ \nabla^2 \psi - \frac{2Gh}{D(1-\nu)} \psi &= \frac{2Gh}{D(1-\nu)} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial F}{\partial y}. \end{aligned} \quad (35)$$

Дифференциальные уравнения (35) позволяют определить функции φ и ψ после нахождения функций w и F . Для решения уравнений (35) с использованием двойных рядов функции φ и ψ примем в виде:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ \psi(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (36)$$

Выбранные функции обеспечивают равенство нулю на контуре изгибающих моментов M_x и M_y , что соответствует шарнирному опиранию. Подставив (36) в (35), получим следующие формулы коэффициентов φ_{mn} и ψ_{mn} :

$$\begin{aligned} \varphi_{mn} &= \frac{m\pi \left((1+\nu) F_{mn} - \frac{2Gh}{D} w_{mn} \right)}{a \left(\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) (1-\nu) + \frac{2Gh}{D} \right)}; \\ \psi_{mn} &= \frac{n\pi \left((1+\nu) F_{mn} - \frac{2Gh}{D} w_{mn} \right)}{b \left(\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) (1-\nu) + \frac{2Gh}{D} \right)}. \end{aligned} \quad (37)$$

3. Результаты исследования и их анализ

Для апробации полученного замкнутого решения была рассмотрена задача, которая ранее была решена в работе [22]. В указанной работе расчет выполнялся численно методом конечных разностей (МКР) с учетом ползучести среднего слоя при следующих исходных данных: размеры оболочки в плане $a = b = 3$ м, величина равномерно распределенной по площади нагрузки $q = 2$ кПа, толщина оболочки $h = 8$ см, толщина обшивок $t = 1$ мм. Обшивки стальные с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Средний слой – пенополиуретан с кратковременным модулем сдвига $G = 4,85$ МПа и длительным модулем сдвига $G_{dl} = 3,17$ МПа. Показатель пологости оболочки $f/a = 1/15$.

На рис. 3 приведены значения прогиба в центральной точке оболочки ($x = a/2, y = b/2$), полученные при различном числе членов ряда k (m и n пробегает нечетные значения от 1 до $2k-1$).

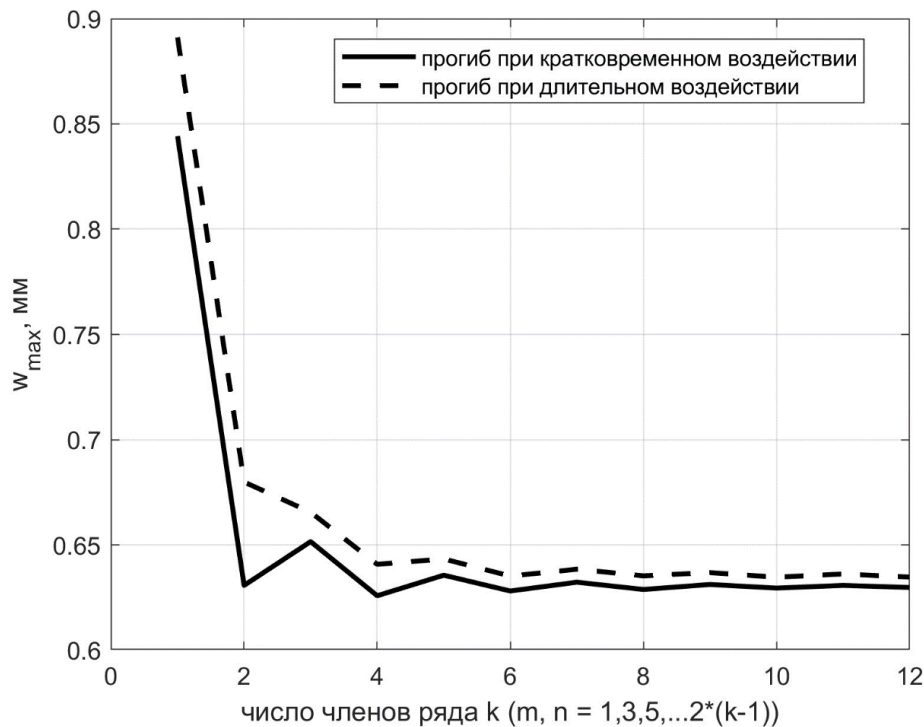


Рисунок 3 – Зависимость максимального прогиба от числа членов ряда

Из рис. 3 видна хорошая сходимость решения. При $k = 3$ значение прогиба для случая длительного действия нагрузки составляет 0,666 мм, что менее чем на 5% отличается от решения методом конечных разностей, полученного в работе [22] ($w_{max}^{МКР} = 0,635$ мм). При $k = 4$ расхождение с МКР составляет менее 1%. Также рис. 3 показывает, что ползучесть среднего слоя не оказывает заметного влияния на максимальный прогиб. При $k = 12$ значения стрелы прогиба при кратковременном и длительном действии нагрузки отличаются на 0,8%. Этот результат согласуется с решениями, полученными ранее в работах [22-24].

Вместе с тем, полученный результат о незначительном влиянии ползучести заполнителя на прогиб справедлив только для центральной точки. На рис. 4 показано сравнение эпюр прогибов по линии симметрии $y = b/2$ при кратковременном и длительном действии нагрузки. При удалении от центральной точки влияние деформаций поперечного сдвига заполнителя на прогиб становится более выраженным, что приводит к росту прогиба при снижении модуля сдвига заполнителя. Это связано с характером распределения поперечных сил, который представлен на рис. 5 на примере поперечной силы Q_x . В центральной точке поперечные силы равны нулю и нелинейно возрастают при приближении к краям. При снижении модуля сдвига заполнителя происходит релаксация касательных напряжений в среднем слое, что приводит к уменьшению поперечных сил, как видно из рис. 5.

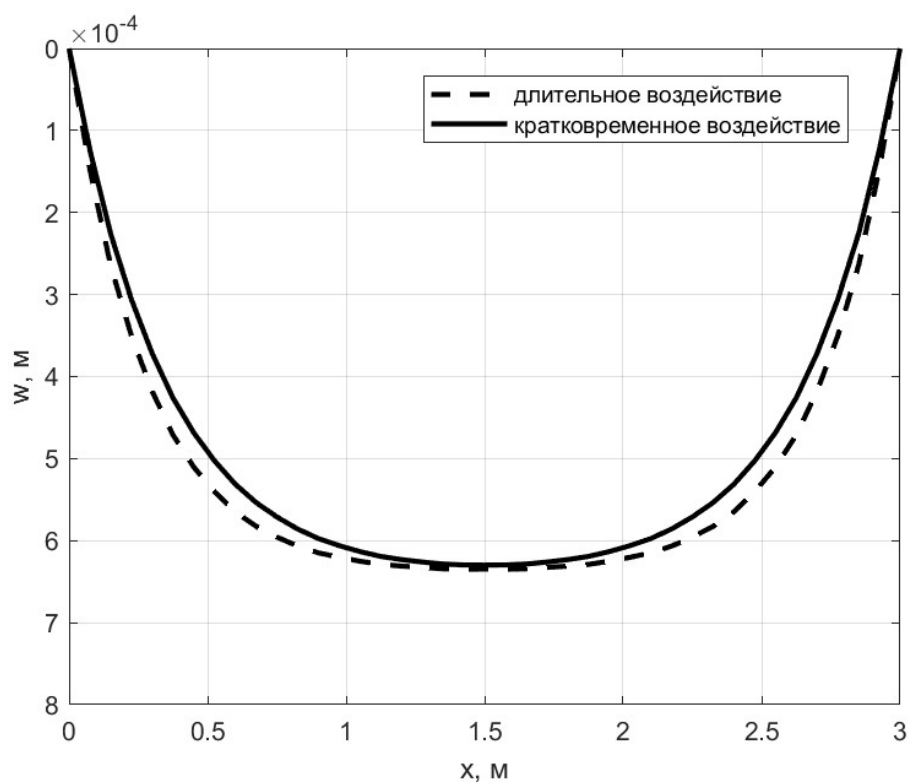


Рисунок 4 – Сравнение эпюр прогиба по оси симметрии $y = b/2$ при кратковременном и длительном воздействии

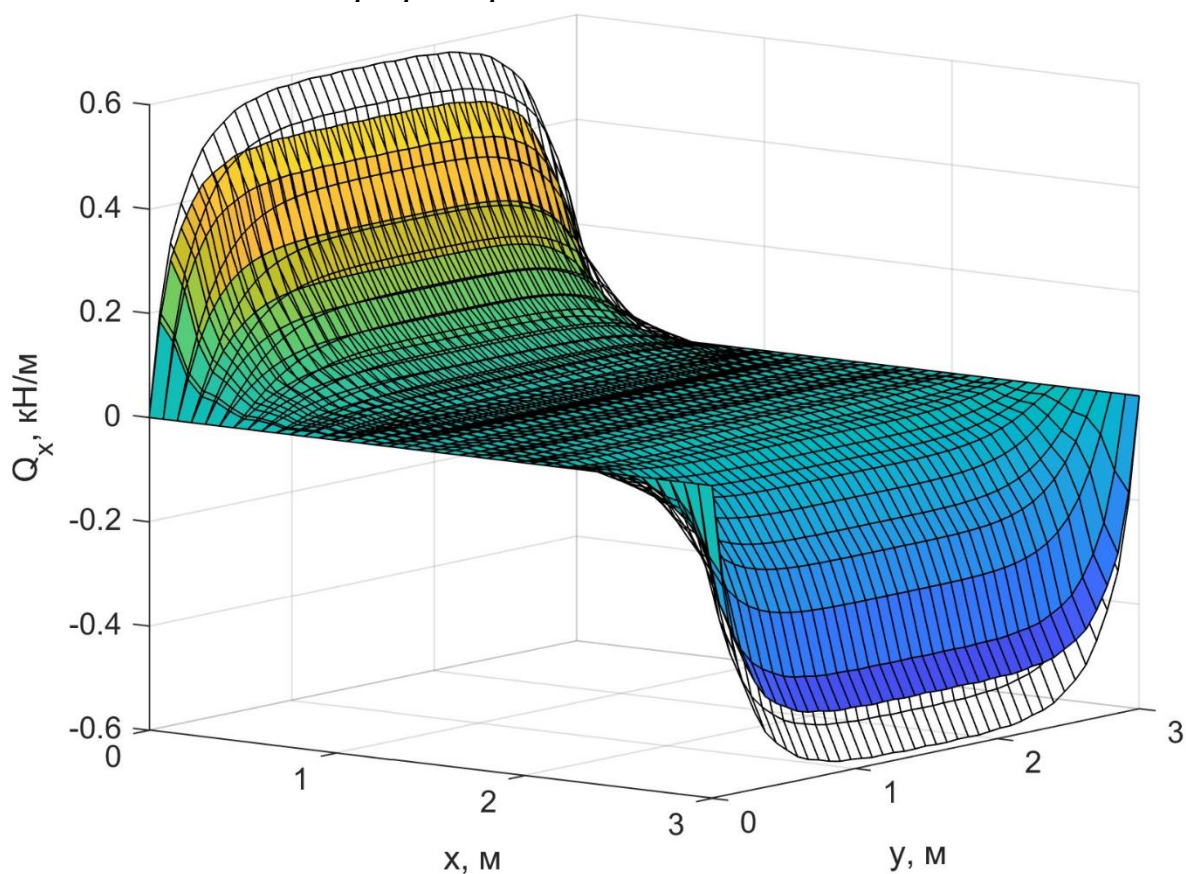


Рисунок 5 – Сравнение распределения поперечных сил Q_x при кратковременном воздействии (сетчатая поверхность) и длительном воздействии (закрашенная поверхность)

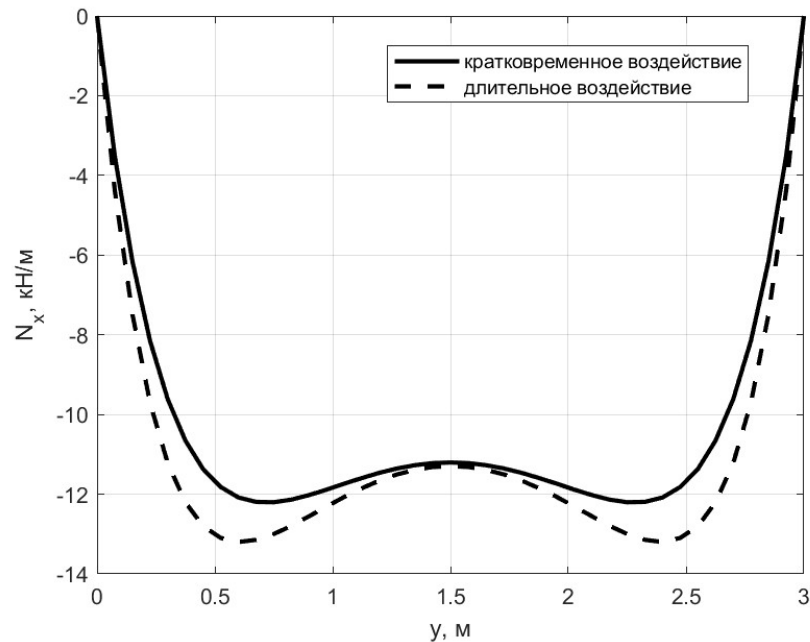


Рисунок 6 – Сравнение эпюр N_x в сечении $x = a/2$ при кратковременном и длительном воздействии

Следствием релаксации касательных напряжений в среднем слое является рост по абсолютному значению продольных сил N_x (рис. 6), N_y , а также сдвигающих сил N_{xy} (рис. 7). Снижение поперечных сил при уменьшении модуля сдвига заполнителя приводит к снижению абсолютных значений изгибающих и крутящих моментов (рис. 8-9), что напрямую следует из третьего и четвертого уравнения равновесия в (17).

Из рис. 6-9 нельзя сделать однозначный вывод о влиянии ползучести среднего слоя на напряженно-деформированное состояние обшивок, так как изгибающие и крутящие моменты в процессе ползучести убывают, а продольные и сдвигающие силы возрастают. Для проведения такого анализа вычислялись эквивалентные напряжения по Мизесу с использованием формулы:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}. \quad (38)$$

Нормальные и касательные напряжения в обшивках вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_x^H &= \frac{N_x}{2\delta} + \frac{M_x}{h\delta}; & \sigma_x^e &= \frac{N_x}{2\delta} - \frac{M_x}{h\delta}; \\ \sigma_y^H &= \frac{N_y}{2\delta} + \frac{M_y}{h\delta}; & \sigma_y^e &= \frac{N_y}{2\delta} - \frac{M_y}{h\delta}; \\ \tau_{xy}^H &= \frac{N_{xy}}{2\delta} + \frac{M_{xy}}{h\delta}; & \tau_{xy}^e &= \frac{N_{xy}}{2\delta} - \frac{M_{xy}}{h\delta}. \end{aligned} \quad (39)$$

Максимум эквивалентных напряжений по Мизесу для верхней обшивки достигается в угловых точках и составляет 15,21 МПа при кратковременном воздействии и 18,15 МПа при длительном воздействии. Для нижней обшивки опасными также являются угловые точки. Максимумы напряжений составляют 21,07 МПа при кратковременном и 22,74 МПа при длительном воздействии. Таким образом, ползучесть заполнителя приводит к существенному росту максимальных эквивалентных напряжений в верхней обшивке (на 19%).

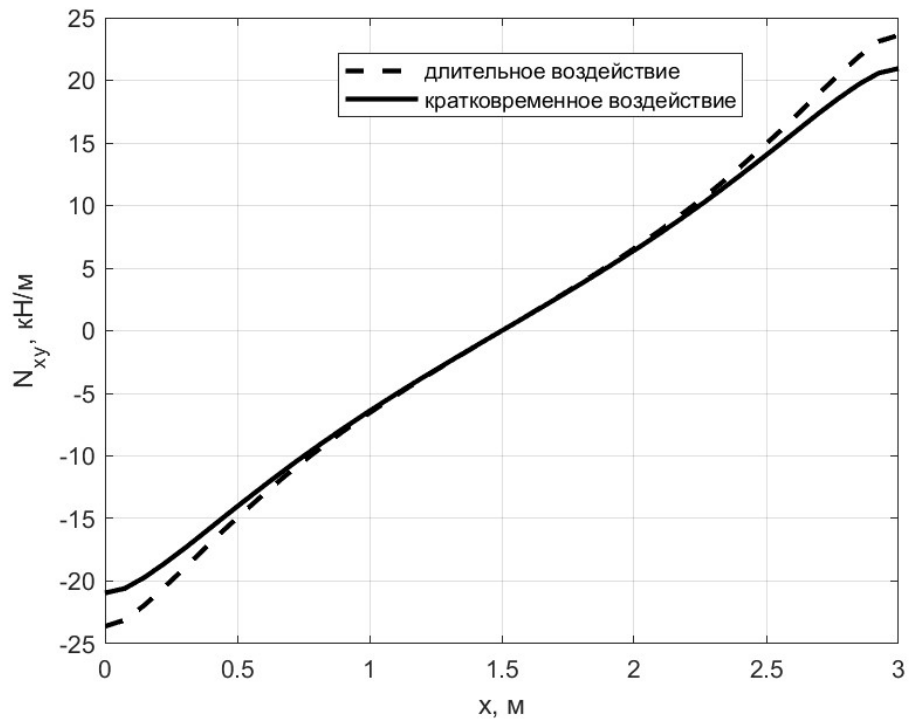


Рисунок 7 – Сравнение эпюр N_{xy} в сечении $y = 0$ при кратковременном и длительном воздействии

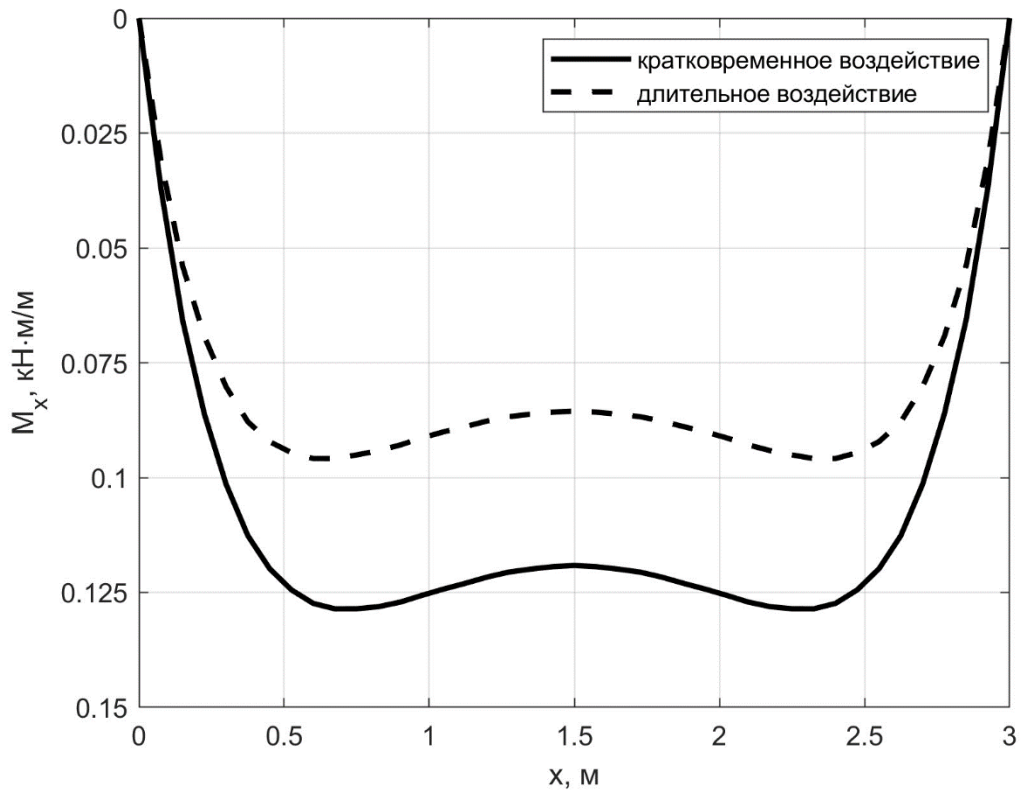


Рисунок 8 – Сравнение эпюр M_x в сечении $y = b/2$ при кратковременном и длительном воздействии

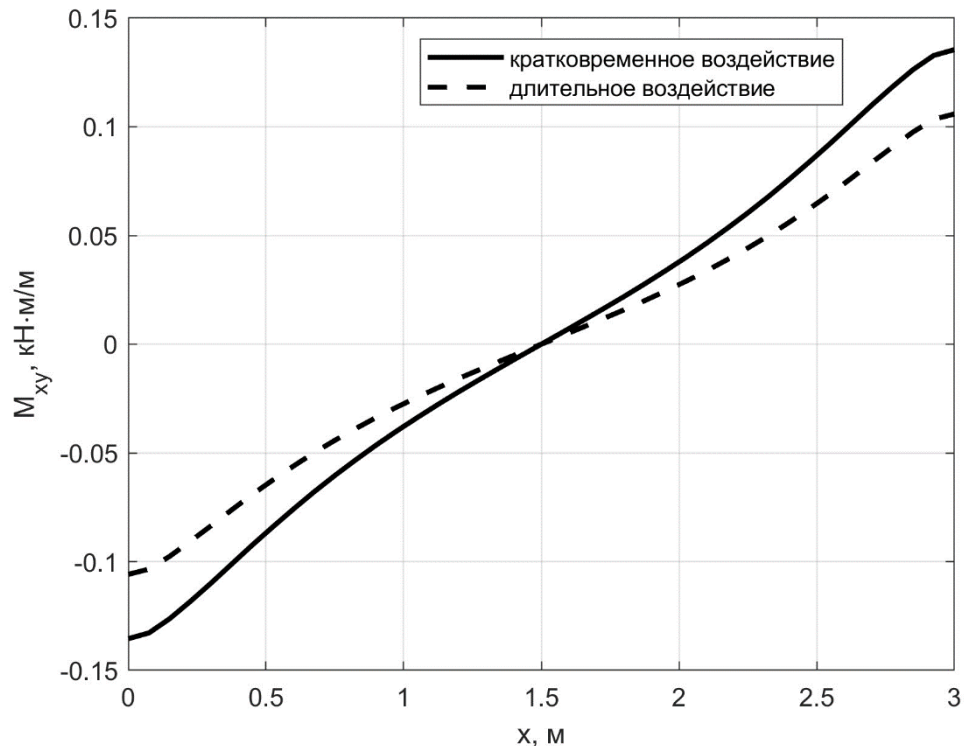


Рисунок 9 – Сравнение эпюр M_{xy} в сечении $y = 0$ при кратковременном и длительном воздействии

4. Заключение

1. В работе представлена математическая модель и аналитический метод расчёта трёхслойных пологих оболочек с лёгким заполнителем в рамках гипотез теории пологих оболочек. На основе кинематических и статических соотношений получена система трёх разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных относительно функций прогиба, напряжений и усреднённых перемещений. Для случая шарнирного закрепления прямоугольной оболочки по контуру предложено замкнутое решение в виде двойных тригонометрических рядов, аналогичное решению Навье для пластин.

2. На примере оболочки в форме эллиптического параболоида показана высокая сходимость рядов уже при небольшом числе членов ($k = 3-4$), что подтверждает эффективность предложенного подхода. Сравнение с численными результатами, полученными методом конечных разностей, демонстрирует хорошее согласование (расхождение менее 1%).

3. Исследовано влияние модуля сдвига среднего слоя на напряжённо-деформированное состояние оболочки. Установлено, что снижение модуля сдвига заполнителя, которое может иметь место в процессе ползучести при длительных воздействиях, практически не влияет на максимальный прогиб в центре оболочки, однако приводит к перераспределению внутренних усилий. Происходит снижение поперечных сил и изгибающих моментов при одновременном росте продольных и сдвигающих усилий. В результате эквивалентные напряжения по Мизесу в нижней обшивке могут возрастать до 15%, что необходимо учитывать при проектировании долговечных конструкций.

4. Предложенная методика позволяет эффективно анализировать поведение трёхслойных пологих оболочек под действием статических нагрузок, учитывая деформации поперечного сдвига заполнителя. Результаты работы могут быть использованы при проектировании лёгких строительных конструкций, а также служить основой для дальнейших исследований, включая учёт нелинейных эффектов и динамических воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.З. Избранные труды: [в 3 т.] / Акад. наук СССР. Тонкостенные пространственные системы. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1964. 472 с.
2. Goldenveizer A.L. Theory of elastic thin shells //Naval Engineers Journal. 1962. Т. 74. №. 3. – С. 582. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1962.tb04855.x>
3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.:Наука, 1966. 636 с.
4. Plantema F.J. Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells. New York: John Wiley & Sons, 1966. 280 с.
5. Алфутов Н. А. Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
6. Carrera E. Theories and finite elements for multilayered plates and shells: a unified compact formulation with numerical assessment and benchmarking //Archives of Computational Methods in Engineering. 2003. Т. 10. №. 3. С. 215-296. <https://doi.org/10.1007/BF02736224>
7. Reddy J. N. Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. CRC press, 2003. 830 с.
8. Zenkour A. M. A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 1—Deflection and stresses //International journal of solids and structures. 2005. Т. 42. №. 18-19. С. 5224-5242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.015>
9. Kattimani M. A., Hussain S. M., Khasge P., Mohrir S., Suman S., Masum, H. Utilizing finite element analysis to evaluate the monitoring of sandwich beam conditions //Brazilian Journal of Development. 2024. Т. 10. №. 4. С. e68942. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n4-032>
10. Бакулин В. Н. Эффективная трехмерная оболочечная модель для послойного исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных нерегулярных цилиндрических оболочек //Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2024. №. 3. С. 64-70. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9368-1-65-3-10>
11. Ying Z. G., Ruan Z. G., Ni Y. Q. Parametrically excited instability of periodic visco-elastomer sandwich plate with supported masses under quadrilateral longitudinal harmonic excitations //International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2023. Т. 23. №. 05. С. 2350050. <https://doi.org/10.1142/S0219455423500505>
12. Jafari N., Azhari M. Creep instability analysis of viscoelastic sandwich shell panels //Mechanics of Time-Dependent Materials. 2024. Т. 28. №. 1. С. 65-79. <https://doi.org/10.1007/s11043-024-09673-9>
13. Kumar N., Panda S. Analysis of static and dynamic stability of an axially loaded sandwich beam with 2–2 or 1–3 viscoelastic composite core layer //Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2025. Т. 47. №. 11. С. 561. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05882-6>
14. Гатиев М. Ш., Аюбов Н. А., Ключев С. В., Литвинов, С. В. Влияние деформаций сдвига на напряженно-деформированное состояние железобетонных плит // Системные технологии. 2023. Т. 49. № 4. С. 100-108. https://doi.org/10.55287/22275398_2023_4_100
15. Магомедов М.А., Кузнецов В.В., Языев, Б.М., Литвинов С.В. Численно-аналитический метод в решении задачи ползучести пологой оболочки //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025. Т. 52. №. 2. С. 190-200. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-190-200>
16. Schoeffer J. A verified analytical sandwich beam model for soft and hard cores: comparison to existing analytical models and finite element calculations //Acta Mechanica. 2023. Т. 234. №. 6. С. 2543. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03497-3>
17. Njim E. K., Bakhy S. H., Al-Waily M. Analytical and numerical flexural properties of polymeric porous functionally graded (PFGM) sandwich beams //Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2022. Т. 110. №. 1. С. 5-15. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7026>
18. Sala B. et al. Creep behaviour of eco-friendly sandwich composite materials under hygrothermal conditions //Composites Part B: Engineering. 2022. Т. 247. С. 110291. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110291>
19. Silva T., Correia L., Dehshirizadeh M., Sena-Cruz J. Flexural creep response of hybrid GFRP–FRC sandwich panels //Materials. 2022. Т. 15. №. 7. С. 2536. <https://doi.org/10.3390/ma15072536>
20. Li W., Xia R., Li X., Huo M., Xu J. Life evaluation of sandwich panels based on coupled creep and fatigue damage evolution //International Journal of Fatigue. 2022. Т. 159. С. 106819. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106819>
21. Sala B., Gabrion X., Jeannin T., Trivaudey F., Guicheret-Retel V., Scarpa F., Placet V. Effect of hygrothermal ageing on the shear creep behaviour of eco-friendly sandwich cores //Composites Part B: Engineering. 2022. Т. 231. С. 109572. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109572>
22. Chepurnenko A. S. Stress-strain state of three-layered shallow shells under conditions of nonlinear creep //Magazine of Civil Engineering. 2017. №. 8 (76). С. 156-168. <https://doi.org/10.18720/MCE.76.14>

23. Андреев В. И., Языев Б. М., Чепурненко А. С., Литвинов С.В. Расчет трехслойной пологой оболочки с учетом ползучести среднего слоя //Вестник МГСУ. 2015. №. 7. С. 17-24.
24. Chepurnenko A., Mailyan L., Jazyev B. Calculation of the three-layer shell taking into account creep //Procedia Engineering. 2016. Т. 165. С. 990-994. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.810>

REFERENCES

1. Vlasov V.Z. Selected works: [in 3 vols.] Thin-walled spatial systems. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1964. 472 p.
2. Goldenveizer A.L. Theory of elastic thin shells. *Naval Engineers Journal*. 1962;74(3):582. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1962.tb04855.x>
3. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Plates and shells. Moscow: Nauka; 1966. 636 p.
4. Plantema F.J. Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells. New York: John Wiley & Sons; 1966. 280 p.
5. Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov B.G. Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 264 p.
6. Carrera E. Theories and finite elements for multilayered plates and shells: a unified compact formulation with numerical assessment and benchmarking. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2003;10(3):215-296. <https://doi.org/10.1007/BF02736224>
7. Reddy J.N. Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. CRC Press; 2003. 830 p.
8. Zenkour A.M. A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 1—Deflection and stresses. *International Journal of Solids and Structures*. 2005;42(18-19):5224-5242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.015>
9. Kattimani M.A., Hussain S.M., Khasge P., Mohrir S., Suman S., Masum H. Utilizing finite element analysis to evaluate the monitoring of sandwich beam conditions. *Brazilian Journal of Development*. 2024;10(4):e68942. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n4-032>
10. Bakulin V.N. Effective three-dimensional shell model for layer-by-layer analysis of the stress-strain state of three-layer irregular cylindrical shells. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika [Moscow University Bulletin. Series 1. Mathematics. Mechanics]*. 2024;(3):64-70. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9368-1-65-3-10>
11. Ying Z.G., Ruan Z.G., Ni Y.Q. Parametrically excited instability of periodic visco-elastomer sandwich plate with supported masses under quadrilateral longitudinal harmonic excitations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2023;23(05):2350050. <https://doi.org/10.1142/S0219455423500505>
12. Jafari N., Azhari M. Creep instability analysis of viscoelastic sandwich shell panels. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2024;28(1):65-79. <https://doi.org/10.1007/s11043-024-09673-9>
13. Kumar N., Panda S. Analysis of static and dynamic stability of an axially loaded sandwich beam with 2–2 or 1–3 viscoelastic composite core layer. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025;47(11):561. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05882-6>
14. Gatiev M.Sh., Ayubov N.A., Klyuev S.V., Litvinov S.V. Influence of shear deformations on the stress-strain state of reinforced concrete slabs. *Sistemnye tekhnologii [System Technologies]*. 2023;49(4):100-108. https://doi.org/10.55287/22275398_2023_4_100
15. Magomedov M.A., Kuznetsov V.V., Yazyev B.M., Litvinov S.V. Numerical-analytical method for solving the creep problem of a shallow shell. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]*. 2025;52(2):190-200. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-190-200>
16. Schoeffer J. A verified analytical sandwich beam model for soft and hard cores: comparison to existing analytical models and finite element calculations. *Acta Mechanica*. 2023;234(6):2543. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03497-3>
17. Njim E.K., Bakhy S.H., Al-Waily M. Analytical and numerical flexural properties of polymeric porous functionally graded (PFGM) sandwich beams. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022;110(1):5-15. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7026>
18. Sala B., et al. Creep behaviour of eco-friendly sandwich composite materials under hygrothermal conditions. *Composites Part B: Engineering*. 2022;247:110291. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110291>
19. Silva T., Correia L., Dehshirizadeh M., Sena-Cruz J. Flexural creep response of hybrid GFRP–FRC sandwich panels. *Materials*. 2022;15(7):2536. <https://doi.org/10.3390/ma15072536>
20. Li W., Xia R., Li X., Huo M., Xu J. Life evaluation of sandwich panels based on coupled creep and fatigue damage evolution. *International Journal of Fatigue*. 2022;159:106819. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106819>

21. Sala B., Gabrion X., Jeannin T., Trivaudey F., Guicheret-Retel V., Scarpa F., Placet V. Effect of hygrothermal ageing on the shear creep behaviour of eco-friendly sandwich cores. *Composites Part B: Engineering*. 2022;231:109572. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109572>
22. Chepurnenko A.S. Stress-strain state of three-layered shallow shells under conditions of nonlinear creep. *Magazine of Civil Engineering*. 2017;(8(76)):156-168. <https://doi.org/10.18720/MCE.76.14>
23. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Calculation of a three-layer shallow shell considering creep of the middle layer. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015;(7):17-24.
24. Chepurnenko A., Mailyan L., Jazyev B. Calculation of the three-layer shell taking into account creep. *Procedia Engineering*. 2016;165:990-994. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.810>

Информация об авторах:

Мерзлякова Александра Дмитриевна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» РУТ(МИИТ), Москва, Россия
старший преподаватель кафедры «Системы автоматизированного проектирования»
E-mail: merzlyakova.aleksandra@inbox.ru

Чепурненко Антон Сергеевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия,
д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительная механика и теория сооружений»,
E-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Языев Батыр Меретович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия,
д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительная механика и теория сооружений»,
E-mail: ps62@yandex.ru

Тюрина Василина Сергеевна

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия,
канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительная механика и теория сооружений»,
E-mail: vasilina.93@mail.ru

Information about authors:

Merzlyakova Alexandra D.

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
Senior lecturer of the department of computer-aided design systems
E-mail: merzlyakova.aleksandra@inbox.ru

Chepurnenko Anton S.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of structural mechanics and theory of structures
E-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Yazyev Batyr M.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of structural mechanics and theory of structures
E-mail: ps62@yandex.ru

Tyurina Vasilina S.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
candidate in tech. sc., associate prof. of the dep. of structural mechanics and theory of structures
E-mail: vasilina.93@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.04.2026
Одобрена после рецензирования 12.04.2026
Принята к публикации 13.04.2026

The article was submitted 01.04.2026
Approved after reviewing 12.04.2026
Accepted for publication 13.04.2026

А.Н. НИКОЛЮКИН¹, В.М. АНТОНОВ¹, П.В. МОНАСТЫРЕВ¹, В.А. ЛИСОВСКИЙ¹¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация**ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ И НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ (ANFIS/ML) ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПОДБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ СВАЙ ПРИ ЗАДАННОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ**

Аннотация. Статья посвящена задаче подбора геометрических параметров забивной сваи — длины L и размера поперечного сечения s — по заданной несущей способности $F_{d,req}$. Предложена постановка, прямо согласованная с требованиями СП 24.13330.2021, включая учёт глубины заложения ростверка и локальных ограничений технологии. Разработан инженерный алгоритм на базе дискретного монотонного поиска по длине L с шагом ΔL и ранжированием альтернативных сечений s , при котором условие $F_d(L, s) \geq F_{d,req}$ достигается с контролируемым целевым запасом η . Для выбора рационального решения использованы многоцелевые критерии (стоимость/технологичность) и регламентирована трассируемость промежуточных проверок, что облегчает анализ расчётов. Показано, что алгоритм поддерживает анализ инженерно-геологических данных (физические характеристики грунтов, варьирование η , чувствительность к ΔL), а также допускает дальнейшее ускорение посредством ML-суррогатов или байесовских процедур робастной оптимизации. Представленная методика ориентирована на внедрение в проектную практику и обеспечивает воспроизводимый, экономически обоснованный подбор L и s «от требуемой несущей способности к решению». Развёрнутый анализ сходимости, чувствительности и сравнительные испытания с альтернативными процедурами будут представлены в последующей публикации.

Ключевые слова: свайный фундамент; обратная задача; несущая способность; дискретный монотонный поиск.

NIKOLYUKIN¹, V.M. ANTONOV¹, P.V. MONASTYREV¹, V.A. LISOVSKIY¹¹Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation**INTEGRATION OF NEURAL NETWORK AND FUZZY CONTROLLERS (ANFIS/ML) FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF SELECTING EFFECTIVE PILE DIMENSIONS FOR A GIVEN BEARING CAPACITY**

Abstract. The article addresses the problem of selecting geometric parameters for a driven pile foundation — length L and cross-section size s — given a required bearing capacity $F_{d,req}$. A formulation is proposed that directly aligns with SP 24.13330.2021 requirements, including consideration of raft depth and local technological constraints. An engineering algorithm based on discrete monotonic search over length L with step ΔL , combined with ranking alternative sections s , has been developed to ensure that the condition $F_d(L, s) \geq F_{d,req}$ is achieved with controlled target margin η . Rational solutions are selected using multi-objective criteria (cost/technology compliance), while intermediate verifications are traceable, facilitating calculation analysis. It is demonstrated that the algorithm supports the analysis of geotechnical data (soil parameters, variations in η , sensitivity to ΔL), as well as allows further acceleration through ML surrogates or Bayesian robust optimization procedures. The presented methodology is aimed at implementation into design practice and ensures reproducible, economically justified selection of L and s from “required bearing capacity to solution.” Detailed convergence analysis, sensitivity studies, and comparative tests with alternative procedures will be provided in subsequent publications.

Keywords: pile foundation; inverse problem; bearing capacity; discrete monotonic search.

1. Введение

При проектировании свайных фундаментов одной из ключевых задач является подбор геометрических параметров сваи – прежде всего длины L и поперечного сечения – чтобы обеспечить требуемую несущую способность по грунту с необходимым запасом надежности. Традиционные подходы основываются на нормативных методиках аналитического расчёта несущей способности (например, по СНиП/СП) либо на прямых полевых испытаниях свай статической или динамической нагрузкой. Однако прямая расчётная задача (определение F_d для заданных L и сечения) обычно решается итеративно “вручную”. В условиях неопределённости свойств грунтов такой подбор осложняется: геологические параметры (физические и прочностные характеристики грунтов) переменны и неточно определены, что вынуждает вводить коэффициенты надежности и приводит к консервативным, не всегда оптимальным решениям.

Одним из современных направлений, получивших развитие в геотехнике, является применение методов искусственного интеллекта для прогнозирования несущей способности свай [1-18]. В частности, адаптивные нейро-нечёткие системы (ANFIS) и другие алгоритмы машинного обучения уже демонстрируют высокую точность при оценке несущей способности по данным изысканий [1-6]. Преимущество таких подходов – способность обрабатывать неопределённые, разнородные данные и выявлять скрытые нелинейные зависимости, что актуально при сложных грунтовых условиях. Настоящая работа посвящена интеграции ANFIS-моделей в процедуру обратного расчёта свайного фундамента – то есть определения необходимых L и сечения сваи по заданной расчетной нагрузке – с учётом неопределённостей геологии. В статье последовательно рассмотрены: постановка задачи подбора размеров свай, используемая теоретическая модель расчёта несущей способности сваи, формализация ограничения и целевой функции, архитектура и обучающие данные нейросетевого модуля (ANFIS), схема интеграции ANFIS в итерационный подбор параметров сваи, а также анализ применимости и ограничений предлагаемого подхода.

2. Модели и методы

Аналитический метод расчёта несущей способности сваи трения

Расчёт несущей способности свай в российской нормативной базе регламентируется актуализированным СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» (обновленная редакция СНиП 2.02.03-85) [2]. Согласно СП, расчет выполняют по двум группам предельных состояний: по прочности материала сваи и по несущей способности основания. Настоящая работа фокусируется на расчёте несущей способности забивной сваи по грунту. В СП 24.13330.2021 приведён метод, основанный на аддитивной модели: суммировании сопротивления грунта под нижним концом сваи и по её боковой поверхности (Рисунок1). Такой метод восходит к классическим работам в геотехнике, а также аналогичен по идеологии зарубежным стандартам (например, метод α и β для адгезии и трения свай в API, метод Томлинсона, Р. Л. Нордлунда и т. п.).

Нормативный расчёт требует знания геологических условий на площадке (последовательность слоёв с их характеристиками и толщинами), геометрии сваи и условий погружения (рис.1). На основании этих данных по таблицам 7.2 и 7.3 СП определяются R и f_i . Далее вычисляется несущая способность F_d с учётом коэффициентов условий работы. Несмотря на кажущуюся простоту, данный процесс может быть трудоёмким при наличии многих слоёв или при параметрических исследованиях (например, оптимизация длины сваи при меняющейся нагрузке). Требуется многократное обращение к таблицам, интерполяция значений для конкретных глубин и показателей текучести I_L (в таблицах даны дискретные значения $I_L = 0-0,6$ для сопротивления под нижним концом и $I_L = 0,2 - 1$ на боковой поверхности). Именно поэтому представляет интерес автоматизация этого расчёта с помощью математической модели, способной на основе входных параметров (физических

характеристик слоёв, геометрии сваи) выдавать результат F_d напрямую. В следующем разделе рассмотрим выбор таких входных параметров и обоснование их влияния.

На **рисунке 1** приведена типовая схема работы сваи в многослойном грунтовом основании.

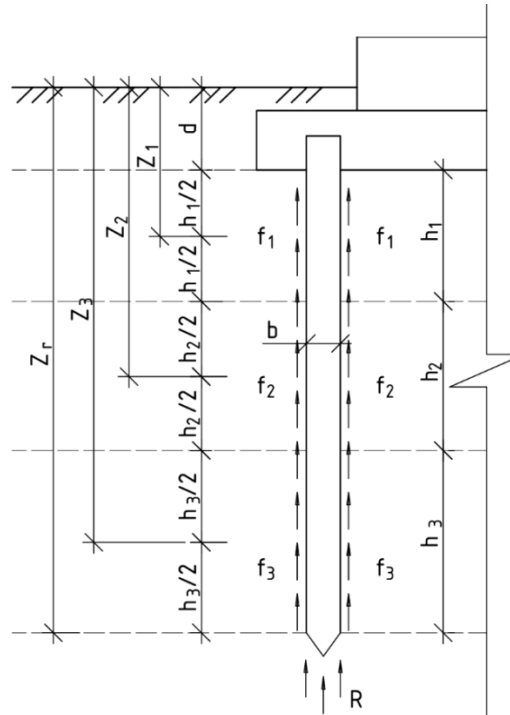


Рисунок 1 – Расчётная схема забивной сваи трения в многослойном грунтовом основании и основные геометрические параметры

Применение нейросетей для расчёта фундаментов.

Методы искусственного интеллекта всё шире используются для прогнозирования различных характеристик грунтов и расчетов фундаментов [3,1]. В частности, в исследованиях продемонстрирована успешность искусственных нейронных сетей (ИНС, англ. ANN) в задаче оценки несущей способности свай. Например, в работе Li S. (2025) разработана модель на основе обратного распространения ошибки (ВР-нейронная сеть) с оптимизацией гиперпараметров алгоритмами роя и эволюции, которая достигла очень высокой точности ($R^2 > 0.99$) при прогнозировании предельной несущей способности забивных свай [1]. Аналогично, другие авторы применяли глубокие нейронные сети и ансамблевые методы: так, в [1] упоминается подход Armaghani et al., где используется адаптивная нейро-нечёткая система (ANFIS) в сочетании с методом группового учёта данных (GMDH) и оптимизацией с помощью алгоритма эмпирической конкуренции для оценки несущей способности свай; Yong et al применил три алгоритма мягких вычислений (включая ANFIS и генетическое программирование) для прогноза несущей способности, а Alzabeebee et al. разработала модель на основе эволюционной полиномиальной регрессии для расчёта бокового трения на поверхности свай[1]. Данные исследования свидетельствуют, что нейросети и гибридные ИИ-модели способны моделировать сложные нелинейные зависимости между геотехническими параметрами и несущей способностью свай с точностью, достаточной для инженерных целей (ошибка прогнозов зачастую не превышает 5–10%). Более того, применяются современные методы для повышения надёжности и интерпретируемости таких моделей – например, анализ чувствительности входов с помощью методов SHAP (как в работе Li S. [1]), позволяющих выявить вклад каждого фактора (характеристик грунта, длины, диаметра сваи и т. д.) в итоговый прогноз несущей способности. Данные средства частично устраняют главный недостаток нейросетей

– их «чёрный ящик» – и делают возможным внедрение ИНС в практику проектирования, где важна объяснимость результатов для экспертизы и обоснования принятых решений.

Нечёткая логика и ANFIS в задачах геотехники.

Отдельное направление связано с использованием аппарата нечётких множеств и логического вывода Н. Mamdani или М. Sugeno. В геотехнике нечёткая логика применялась, например, для оценки условий «устойчивости оснований» по лингвистическим шкалам (классический пример – классификация состояния склонов как «устойчивый», «условно устойчивый», «неустойчивый» с использованием нечётких правил). В контексте свайных фундаментов интерес представляют адаптивные нейро-нечёткие системы (ANFIS), совмещающие нейросетевое обучение с нечёткой логикой. ANFIS по сути является архитектурой с пятью слоями нейронов, реализующей нечёткую систему типа М. Sugeno первого порядка [4]. Первый слой выполняет фазификацию входов (задаёт степени принадлежности значений входных параметров к нечётким термам через функции принадлежности, которые часто выбирают в виде гауссовых или колоколообразных); второй слой генерирует активность каждого правила (по одной нечёткой предпосылке от каждого входа на правило, например rule j : «Если I_L – низкий и L – большой, то F_d – ...»); третий слой нормирует эти степени активности правил; четвёртый – вычисляет вклад правила в выход (линейная функция от входов по методике М. Sugeno, например $F_{d,j} = a_j I_L + b_j L + c_j$ для правила j); наконец, пятый слой суммирует вклады всех правил, получая итоговый выход [4]. Параметры функций принадлежности и линейных зависимостей в правилах настраиваются по обучающей выборке с использованием комбинации градиентных методов и наименьших квадратов – таким образом ANFIS обучается на данных подобно нейросети, но итоговая модель имеет понятное представление. В литературе ANFIS зарекомендовал себя как эффективный инструмент моделирования в инженерии, в том числе для прогнозирования несущей способности свай. Так Gu et al. (2024) разработали ANFIS-модель, настроенную с помощью оптимизационного алгоритма СВО, для оценки несущей способности 472 экспериментально испытанных свай; получена высокая точность (на тестовой выборке $R^2 \approx 0.987$), превосходящая даже результаты многослойного персептрона [4]. Важно, что ANFIS позволяет получить правила вывода, которые можно проанализировать. В контексте свай это могли бы быть правила вида: «Если грунт очень плотный и длина сваи большая, то несущая способность – высокая», и т. п. Впрочем, при большом числе входов и правил, их интерпретация затрудняется, поэтому на практике стараются ограничивать количество нечётких термов на вход (обычно 2–3 терма на переменную, что даёт число правил равным произведению чисел термов). Так например в нашем случае для глинистых грунтов два основных входа – показатель текучести I_L и глубина погружения сваи – что достаточно компактно для формирования понятных правил (например: « I_L малый, L большой $\rightarrow F_d$ высокий»), что ещё одна причина комбинировать нейросетевой и нечёткий подходы.

Существующие разработки: стоит отметить, что в России также ведутся работы в направлении применения ИИ к свайным фундаментам. В Новосибирске выполнен анализ использования ИИ на различных этапах строительства, отмечена эффективность ИИ при расчёте оснований и фундаментов [3]. В Перми создана программная система CPTPileANN, помогающая по данным изысканий (в том числе статическим зондированиям СРТ) оценивать необходимую глубину заложения фундамента и несущую способность свай, а также прогнозировать осадку основания [5]. Данная система обучалась на большом объёме архивных данных по испытаниям свай в глинистых грунтах и реализована как прикладное ПО, уже получившее свидетельство регистрации программы для ЭВМ [5]. Таким образом, и в научной, и в практической среде наблюдается потребность в интеллектуальных инструментах, дополняющих нормативные методы. Однако анализ литературы показал, что большинство существующих моделей ориентируются либо на экспериментальные данные, либо на зарубежные стандарты, и зачастую являются сугубо «чёрными ящиками». Необходимы исследования, интегрирующие нормативные подходы и ИИ, чтобы результат

моделирования был совместим с требованиями строительных норм и воспринимался инженерами. Настоящая работа заполняет этот пробел, предлагая методику обучения ИИ-модели на основе генерированных по нормам данных. Такой подход обеспечивает воспроизводимость (model reproducibility) – то есть независимая проверка дает те же результаты, что и исходные формулы СП, в пределах допустимой погрешности аппроксимации. Одновременно, благодаря использованию нечёткого вывода, улучшается интерпретируемость модели: можно проследить, как изменение входных факторов (например, свойств грунта) влияет на прогноз, в терминах близких к инженерным («улучшение категории грунта ведёт к повышению несущей способности», и т. п.).

Обоснование входных и выходных параметров гибридной модели (ML и Fuzzy)

Цель – обосновать состав входных и выходных переменных гибридной модели, предназначенной для прогноза и уточнения длины сваи L и проверки/обеспечения расчётной несущей способности F_d в соответствии с нормативной методикой (СП 24.13330.2021). Рассматривается статическая сжимающая нагрузка, стандартные условия работы сваи (таблица 1); иные режимы (выдёргивание, сейсмика, подтопление) оговариваются отдельно и требуют расширения входов и переобучения модели.

Номенклатура:

- F_d — расчётная несущая способность сваи (кН).
- $F_{d, req}$ — требуемая расчётная несущая способность (кН).
- L — длина сваи (м).
- L^* — рациональная длина после физического уточнения (м).
- L_{design} — проектная (округлённая) длина (м).
- b / D — размер стороны / диаметр сваи (м).
- $\gamma_c, \gamma_R, R, \gamma_R, f$ — коэффициенты условий работы (по СП 24.13330.2021).
- k_R, k_f — нечёткие поправки к сопротивлениям R и f .
- ΔL — нечёткая поправка стартовой длины (м).

Примечание о кодировании категорий. Типы грунтов в слоях ($Soil_i$) представляются one-hot кодированием (например, «песок», «супесь», «суглинок»), чтобы упростить обучение. Для числовых индикаторов состояния (I_L, I_p, e) применяется стандартизация (z-score) по обучающей выборке.

Таблица 1 — Входные параметры гибридной модели (ML + Fuzzy) для расчёта свайных фундаментов

№	Блок	Параметр	Обозн.	Ед.	Типичный диапазон	Обоснование / влияние
1	2	3	4	5	6	7
1	Геология	Число слоёв	layers	—	1–10	Определяет дискретизацию профиля и число контактов ствола.
2	Геология	Тип грунта слоя i	$Soil_i$	cat	песок/глина	Влияет на табличные R и f_i ; кодируется one-hot.
3	Геология	Показатель текучести	I_{L_i}	—	0–1	Корректирует f_i и/или коэффициенты условий работы.
4	Геология	Число пластичности	I_{p_i}	—	1–30	Классификация глин, связь с f_i .
5	Геология	Коэфф. пористости	e_i	—	0.3–1.0	Плотность сложения, влияет на f_i .
6	Геология	Мощность слоя	h_i	м	>0	Оценка площади контакта в слое; вклад в $\sum f_i h_i$.

Продолжение Таблицы 1

7	Геология/ планировка	Глубина заложения ростверка	d	м	0–4	Уточняет расчетные слои
8	Геометрия	Типоразмер (каталог)	section _name	—	150×150... 400×400	Выбор номенклатуры сечения свай.
9	Геометрия	Сторона квадрата / диаметр	b / D	м	0.3–0.40	Определяет A и u → вклад пяты и боковой поверхности.
10	Нагрузки	Требуемая несущая способность	F_d, req	кН	100–1200	Целевая величина обратной задачи.
11	Нормативы	Коэфф. условий работ (пяты)	$\gamma_{R,R}$	—	1,0-1,1	Масштабирует R·A.
12	Нормативы	Коэфф. Условий работ (бок)	$\gamma_{R,f'}$	—	0,5-1,0	Масштабирует u· $\Sigma f_i h_i$.
13	Нормативы	Условия работы свай	γ_c	—	≥1.0	Для $F_d, design$; фиксируется по сценарию.
14	Особенности алгоритма	$\Sigma (f \cdot h)$	$\Sigma f_i h_i$	кПа·м	50–500	Интегральный боковой вклад (ускоряет обучение).
15	Особенности алгоритма	«Якоря» F_d	$F_d \left(\frac{L_{min}}{L_{mid}} \right)$	кН	—	Контроль монотонности/калибровки.

Примечание: пункты 14–15 — вторичные (производные) признаки и используются для стабилизации обучения/калибровки; они не требуются при эксплуатации модели, если на вход подаётся полный послойный профиль.

Состав переменных ориентирован на забивные и вдавливаемые сваи под действием вертикальных сжимающих нагрузок. Для расчёта на выдёргивание/сеймику, для свай-оболочек/винтовых/свай требуется расширение входных параметров и переобучение модели под соответствующие режимы.

Отметим, что в некоторых ситуациях на несущую способность могут влиять уровень грунтовых вод, характер заделки свай в ростверк (жёсткая заделка или шарнирное опирание), характер нагрузки (статическая/знакопеременная). В рамках норм СП 24.13330.2021 эти эффекты учитываются через коэффициенты или указания (например, вводится особый коэффициент γ_c по п. 7.2.7 СП). Чтобы не усложнять модель, мы ограничились случаем статической сжимающей нагрузки.

Целевыми переменными модели является искомая длина и сечение свай при заданной несущей способности свай F_d (таблица 2).

Таблица 2 — Выходные параметры и артефакты вычислительного контура

№	Блок	Параметр	Обозн.	Ед.	Диапазон	Назначение
1	ML	Прогноз длины	L_{ML}	м	3–15	Быстрый регрессионный прогноз.
2	ML	Лог-длина (внутр.)	ln L	—	—	Стабилизация обучения.
3	ML	Изотонно-калибр. длина	L_{iso}	м	3–15	Обеспечение монотонности.
4	Fuzzy	Стартовая длина	L_0	м	1–12	Точка старта уточнения.
5	Fuzzy	Поправка длины	ΔL	м	–2...+4	Коррекция по правилам Сугено.
6	Fuzzy	Поправки сопротивлений	$\tilde{k}_R, \tilde{k}_f$	—	0.8–1.2	Тонкая настройка R, f.
7	Physics	Итог после уточнения	L^*	м	3–18	Минимальное L: $F_{d(L^*)} \geq F_{d, req}$.
8	Project	Проектная длина	L_{design}	м	шаг ΔL	Округление вверх и повторная проверка F_d .
9	Physics	Несущая при L^*	$F_{d(L^*)}$	кН	100–1200	Верификация физической моделью.

Продолжение Таблицы 2

10	Physics	Доли вклада	$\beta(L^*), 1 - \beta$	—	0–1	Пята/бок: диагностика.
11	Conform.	Коэфф. обеспеченности	$\eta = \frac{F_d}{F_{d, req}}$	—	0.95–1.15	Целевой запас и контроль.
12	Conform.	Число итераций	n_{iter}	—	3–10	Сходимость уточнения.
13	QA	Ошибка ML до уточн.	ε_{ML}	%	0–10	Диагностика смещения.
14	Decision	Приоритет сечений	$S_{150}, S_{200}, S_{250}, S_{300}, S_{350}, S_{400}$	—	0–1	«Баллы» выбора типоразмеров.
15	Trace	Протокол расчёта	Protocol	—	—	Трассируемость: $\tilde{k}_R, \tilde{k}_f, \Delta L, L^*, \eta$.

Следует подчеркнуть, что все данные для обучения генерировались согласно СП – таким образом, мы заведомо не выходим за пределы применимости нормативной схемы, что гарантирует отсутствие ситуаций, где модель могла бы сделать «физически некорректный» прогноз: например, отрицательную несущую способность или нелогичную зависимость (убывание F_d с ростом длины сваи при заданных сечениях L). Нейросеть и ANFIS обучались на монотонных и гладких зависимостях входных параметров, поэтому от них ожидается сохранение этой монотонности.

Связь с нормами (валидация): для убедительности, набор контрольных случаев был рассчитан независимо по СП и сравнён с предсказаниями модели. Данные случаи – задачи с различными слоями и параметрами. Таким образом, входы и выходы модели полностью сопоставимы с исходным нормативным процессом, и оценка её точности проводится в сравнении с «истиной» по СП 24.13330.2021.

Пояснения к постановке обратной задачи подбора длины и сечения сваи

Постановка и обозначения. Целью является определение пары (L, s) , обеспечивающей выполнение условия $F_d(L, s) \geq F_{d, req}$ при заданных ограничениях технологии и номенклатуры $\mathcal{S}$. Вводятся обозначения: $F_d(L, s)$ — расчётная несущая способность; $F_{d, req}$ — требуемое значение; ΔL — дискретный шаг подбора длины; η — целевой запас.

Обратная задача формулируется на базе нормативной «прямой» модели $F_d(L, s)$, которая учитывает геометрию сваи, слойную структуру основания и коэффициенты надёжности/условий работы. Входные данные: геологический разрез (физические характеристики по слоям, глубины границ слоёв); перечень допустимых сечений S (например, 300×300, 350×350, 400×400 мм) с технологическими пределами длины $[L_{min}^{(s)}, L_{max}^{(s)}]$; требуемая несущая способность $F_{d, req}$. Цель — подобрать пару (L, s) , при которой выполняется $F_d(L, s) \geq F_{d, req}$ и оптимизируется проектный критерий (длина, сечения/стоимость).

В базовой постановке ищется минимальная по критерию длина/стоимость конфигурация (L, s) , удовлетворяющая требованию несущей способности:

$$\min_{L, s} C(L, s) \text{ при } F_d(L, s) \geq F_{d, req} \quad L_{min}^{(s)} \leq L \leq L_{max}^{(s)} \quad (1)$$

Дорожная карта. Ниже последовательно представлены: (i) список обозначений; (ii) критерии и ограничения; (iii) алгоритм решения; (iv) протокол проверок и трассируемости.

Список обозначений (номенклатура):

$F_d(L, s)$ — расчётная несущая способность сваи при длине L и сечении s ;

$F_{d, req}$ — требуемая расчётная несущая способность;

η — целевой нормативный запас по несущей способности ($\eta \in [1,00; 1,15]$, по заданию проекта/неопределённости);

L — длина сваи; L^* — найденная рациональная длина (до округления); L_{design} — принятой к проектированию длина с учётом правила округления;

$s \in \mathcal{S}$ — типоразмер (сечение) сваи из допустимой номенклатуры;

$\Delta L > 0$ — дискретный шаг поиска по длине (нормативно/технологически обоснованный);

$C(L, s)$ — целевая функция эффективности (стоимость/масса/трудоемкость), если применяется;

$[L_{\min}(s), L_{\max}(s)]$ — допустимый диапазон длин для типоразмера s ;

$\mathcal{G}$ — совокупность фиксируемых параметров геологического разреза и коэффициентов норм;

$\mathcal{F}$ — протокол нормативных проверок и используемых коэффициентов.

Критерии и ограничения.

Решение признаётся допустимым, если выполняется $F_d(L, s) \geq \eta F_{d, \text{req}}$ при $L_{\min}(s) \leq L \leq L_{\max}(s)$, $s \in \mathcal{S}$. При наличии критерия эффективности используется функция $C(L, s)$ (например, стоимость), минимизируемая на множестве допустимых решений

Пара (L, s) признаётся допустимой, если

$$F_d(L, s; \mathcal{G}) \geq \eta F_{d, \text{req}}, \quad L \in [L_{\min}(s), L_{\max}(s)] \cap \{L_0 + k \Delta L: k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}, s \in \mathcal{S}. \quad (2)$$

Оптимальность (при наличии критерия). Среди допустимых пар выбирается

$$(L^*, s^*) = \arg \min_{(L, s) \text{ допустимы}} C(L, s) \quad (3)$$

либо применяется лексикографический порядок (минимальная длина, затем стоимость и т. п.). Принятая к проектированию длина L_{design} формируется из L^* правилом округления (см. ниже) с обязательной повторной проверкой условия $F_d \geq \eta F_{d, \text{req}}$.

На рабочем интервале длины, при отсутствии отрицательного трения по стволу на всём протяжении, функция $F_d(L, s)$ по L неубывающая; это позволяет применять монотонные (дихотомические) процедуры поиска.

Алгоритм решения. Для каждого $s \in \mathcal{S}$ выполняется монотонный поиск по L на сетке шага ΔL до достижения условия $F_d \geq \eta F_{d, \text{req}}$ или фиксации неразрешимости на интервале. Итоговое (L^*, s^*) выбирается по минимуму $C(L, s)$ среди допустимых пар.

Входные условия

$$\mathcal{S}, F_{d, \text{req}}, \eta, \Delta L, [L_{\min}(s), L_{\max}(s)], \mathcal{G}. \quad (3)$$

Выходные условия: (L_{design}, s^*) и протокол $\mathcal{F}$, либо диагностическое сообщение «неразрешимо на интервале».

Предварительный ранжир типов s (опц.): упорядочить $\mathcal{S}$ по возрастанию базовой эффективности (например, удельной стоимости), чтобы ускорить поиск.

Проверка разрешимости по верхней границе. Для каждого $s \in \mathcal{S}$: если $F_d(L_{\max}(s), s) < \eta F_{d, \text{req}}$, тип s помечается как неразрешимый на своём интервале; перейти к следующему s .

Бинарный поиск по L . Положить $L_{\text{lo}} = L_{\min}(s)$, $L_{\text{hi}} = L_{\max}(s)$. Пока:

$$L_{\text{hi}} - L_{\text{lo}} > \Delta L \quad (4)$$

$$L_{\text{mid}} = \left\lceil \frac{L_{\text{lo}} + L_{\text{hi}}}{2} \right\rceil \Delta L \quad (5)$$

(проекция на дискретную сетку);

Если $F_d(L_{\text{mid}}, s) \geq \eta F_{d, \text{req}}$, положить $L_{\text{hi}} = L_{\text{mid}}$; иначе $L_{\text{lo}} = L_{\text{mid}}$.

Выбор по длине. Принять $L^*(s) = L_{\text{hi}}$, как кратчайшую длину на сетке, удовлетворяющую целевому запасу.

Правило округления. Установить $L_{\text{design}}(s) = \mathcal{R}(L^*(s))$, где $\mathcal{R}(\cdot)$ — регламентированное правило (обычно «вверх до ближайшего стандартного значения/кратности»); повторно проверить $F_d(L_{\text{design}}(s), s) \geq \eta F_{d, \text{req}}$. При нарушении — увеличить $L_{\text{design}}(s)$ на один шаг сетки.

Выбор по критерию. Среди всех допустимых $\{(L_{\text{design}}(s), s)\}$ выбрать (L_{design}, s^*) по минимуму C (или по лексикографическому правилу).

Оценка сложности. Для фиксированного s : $N_{\text{ит}} \leq \lceil \log_2 \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\Delta L} \rceil$; по всем s : $O(|\mathcal{S}| \log \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\Delta L})$.

Критерии остановки:

(а) $L_{\text{hi}} - L_{\text{lo}} \leq \Delta L$;

(б) опционно. $|F_d(L_{\text{mid}}, s) - \eta F_{d,\text{req}}| / (\eta F_{d,\text{req}}) \leq \varepsilon$ для заданной ε .

Диагностика неразрешимости: если для данного s $F_d(L_{\max}(s), s) < \eta F_{d,\text{req}}$, тип s исключается; если $\forall s \in \mathcal{S}$ исключены — задача неразрешима на заданных интервалах/при данном η .

Проверки и трассируемость (протокол $\mathcal{F}$)

Для выбранной пары (L_{design}, s^*) фиксируются и включаются в отчёт:

Итоговый баланс несущей способности: F_d , вклад пяты/боковой поверхности (в процентах/кН).

Коэффициенты и допущения: применённые нормативные коэффициенты, параметры геологии $\mathcal{G}$, учёт/отсутствие отрицательного трения, наличие насыпей/выемок, глубина заложения и др.

Дискретизация и округление: значение ΔL , правило $\mathcal{R}(\cdot)$, шаг(и) корректировки после проверки.

Проверка запаса: факт выполнения $F_d \geq \eta F_{d,\text{req}}$ после округления; при наличии — диапазоны чувствительности (варианты /коэффициентов).

Критерий эффективности: значение $C(L_{\text{design}}, s^*)$ и краткая аргументация выбора (если критерий применялся).

Генерация синтетических данных

Как отмечалось, для обучения ИИ-модели была необходима репрезентативная выборка входных параметров и результатов расчёта по СП. Вместо проведения множества ручных расчётов, был написан программный скрипт (на языке Python с использованием библиотеки Pandas и др.), автоматизирующий вычисления по формулам СП 24.13330.2021. Этот скрипт [19]:

1. Перебирает набор параметров: с помощью двойного цикла генерируются комбинации вектора входных параметров X . В одном варианте — глубина погружения сваи. Шаг изменения X принят мелким, чтобы покрыть гладко весь диапазон, были добавлены и промежуточные случайные значения, чтобы предотвратить переобучение сети на регулярной сетке (в итоге ~25000 строк данных). Такой приём — добавление небольшого разброса — улучшает обобщающую способность модели.

2. Вычисляет Y : для каждой комбинации вызываются процедуры, эмулирующие таблицы 7.2 и 7.3 СП 24.13330.2021. Они реализованы в виде функций, которые по заданным входным параметрам возвращают нужное значение, используя билинейную интерполяцию по сетке табличных значений.

3. Формирует таблицу данных: результаты записываются в структуру. Далее эти таблицы использовались при обучении моделей. Разумеется, возможен и другой подход — генерировать данные на лету во время обучения, но нами был выбран этап явной предварительной генерации, чтобы убедиться визуально и статистически в корректности данных.

Важно, что таким образом сформированная выборка не содержит шума и является по сути функцией (каждой паре входов соответствует строго определённый выход по таблицам). Целевая функция непрерывна и гладка по входам (интерполяция таблиц дала сглаживание дискретных скачков). В то же время, с точки зрения обобщения, модель будет ограничена этими зависимостями.

Архитектура и обучение нейросетевой модели при формировании выборки для обучения аналитической модели

Для аппроксимации зависимостей $F_{d,req}$ была выбрана классическая архитектура многослойного перцептрона (MLP) с несколькими входами, одним выходом и скрытыми слоями. Число скрытых слоёв и нейронов подбиралось экспериментально. Такая архитектура оказалась достаточной для достижения $R^2 > 0.9$ на обучающих данных, более сложные сети не дали существенного прироста точности (погрешность и так на уровне менее 1%), что подтверждено в статье [19]. Обучение проводилось с помощью оптимизации типа Levenberg–Marquardt (реализовано через библиотеку SciPy, функция `least_squares`), минимизируя целевую функцию – сумму квадратов Huber-остатков. Использование Huber loss вместо стандартной MSE объясняется желанием слегка уменьшить влияние потенциальных «изломов» в таблицах – однако, учитывая сглаженность наших данных, результат практически не отличался бы и при MSE. Тем не менее, Huber делает процесс устойчивее и предотвращает ситуации, если бы некоторые точки имели непропорционально большой локальный градиент. В реализации SciPy `least_squares` Huber достигается указанием аргумента `loss='huber'` и параметра δ (порог, после которого квадратичная функция переходит в линейную). Брали $\delta = 1$, что в масштабах значений означало, что остатки в кПа меньше 1 вносят квадратичный вклад, больше – линейный. Поскольку итоговые ошибки у нас десятки доли кПа, фактически алгоритм работал в квадратичном режиме.

Интеграция physics-step: расчет требуемой длины сваи

Physics-step алгоритм: предполагается, что при увеличении длины сваи её несущая способность монотонно возрастает (это в целом так, хотя с затухающей прибавкой: каждый следующий метр даёт всё меньший прирост, особенно если нижний конец входит в очень прочный слой). Тогда функцию $g(L) = F_d(L) - F_{req}$ можно считать монотонной: при маленьких L она отрицательна (несущая меньше требуемой), при больших L – положительна (несущая избыточна). Значит, существует единственный корень L уравнения $g(L) = 0$, соответствующий $F_d = F_{req}$. Применяли стандартный дихотомический поиск на интервале допустимых длин $[L_{min}, L_{max}]$. За L_{min} можно взять, например, 1 м, за L_{max} – разумный максимум. Алгоритм на каждой итерации берёт середину интервала L_{mid} , вычисляет F_d , сравнивает с F_{req} ; если $F_d < F_{req}$, значит длина и сечения недостаточна – сдвигаем L_{min} к L_{mid} , иначе – избыточна, сдвигаем L_{max} к L_{mid} . Итерации продолжаются, пока интервал не станет достаточно мал (например, погрешность по L меньше 0.1 м или F_d совпадет с требуемым с нужной точностью). В нашем коде использовался критерий по F_d : останавливаемся, когда относительная разница $(F_d - F_{req})/F_{req} < 0.001$ (0.1%). Как правило, хватало 10–15 итераций для сходимости, что занимает доли секунды.

Внедрение physics-step прямо встроено в разработанное ПО: пользователь может задать F_{req} , и программа, используя обученную модель, выдаст рекомендуемую длину, что реализовано и в вышеупомянутом интерфейсе (будет показано в последующих работах), где есть поле ввода требуемой нагрузки и кнопка «Рассчитать F_d » – фактически при изменении L выполняется подобный подбор до тех пор, пока F_d не равняется требуемому.

Алгоритм поиска не зависит от того, используется нейросеть или ANFIS – важно лишь, что функция $F_d(L, s)$ доступна для вычисления.

На вход подаются характеристики грунта и желаемая нагрузка, на выходе модель даёт либо несущую способность для заданной длины сваи и сечения, либо требуемую длину и сечение для заданной нагрузки.

3. Результаты исследования и их анализ

В работе сформулирована обратная задача подбора длины и сечения сваи при требуемой расчётной несущей способности с учётом технологических ограничений и проверок по СП 24.13330.2021, что позволяет системно связывать целевой уровень несущей

способности с геотехническими и конструктивными параметрами. Предложен алгоритм решения на базе монотонного поиска по длине на дискретной сетке и перебора или ранжирования сечений с нормативным пересчётом несущей способности; за счёт монотонного возрастания несущей способности с увеличением длины сваи обеспечивается гарантированная достижимость условия, при котором расчётная несущая способность не ниже требуемой, при контролируемом шаге изменения длины. Введены критерии выбора рационального решения: минимизация стоимости при требуемой несущей способности, ограничения по технологичности, включая диапазоны длины, наличие типоразмеров, условия заделки оголовка и пяты, что переводит задачу из разряда интуитивного подбора в формализованную многоцелевую процедуру. Обоснована необходимость учёта неопределённостей инженерно-геологических данных, проявляющаяся в чувствительности решения к вариациям прочностных и деформационных характеристик грунтов; рекомендовано использовать целевой запас и выполнять интервальные проверки параметров грунтового разреза.

Показано, что предложенный подход, будучи реализованным в виде расчётной процедуры, легко интегрируется в проектный процесс: он совместим с типовыми нормативными расчётами несущей способности по длине и сечению, допускает расширение до многоцелевой оптимизации по стоимости, массе и монтажепригодности и остаётся прозрачным для экспертизы. Практическая применимость алгоритма подтверждена модельными примерами: формализуя правило подбора, удаётся избежать чрезмерных запасов по длине или сечению при обеспечении нормативной надёжности. Сформулированы ограничения применимости текущей версии: алгоритм разработан для висячей сваи, работающей на вертикальную сжимающую нагрузку; групповые эффекты, совместная работа ростверка и сваи, горизонтальные нагрузки, сейсмические воздействия, морозное пучение и реологические эффекты требуют расширения модели и отдельной калибровки. Для повышения инженерной воспроизводимости предложены рекомендации по настройкам: разумный шаг изменения длины от 0,1 до 1,0 метра, целевой запас от 1,05 до 1,15 в зависимости от неопределённости инженерных изысканий, а также системная верификация промежуточных проверок, включая проверку оголовка и пяты, учёт отрицательного трения и влияние насыпей и выемок.

4. Заключение

1. В работе сформулирована обратная задача подбора длины L и сечения сваи s при требуемой расчётной несущей способности $F_{d,req}$ с учётом технологических ограничений и проверок, выполняемых в соответствии с требованиями СП 24.13330.2021. Такая постановка позволяет системно связывать целевой уровень несущей способности с геотехническими и конструктивными параметрами.

2. Предложен алгоритм решения на базе монотонного поиска по L на дискретной сетке и перебора (или ранжирования) альтернативных сечений s с нормативным пересчётом $F_d(L, s)$. За счёт монотонности F_d по длине сваи обеспечивается гарантированная достижимость условия $F_d \geq F_{d,req}$ при контролируемом шаге ΔL .

3. Введены критерии выбора рационального решения: минимизация стоимости при требуемой несущей способности; ограничение по технологичности (диапазоны длины, наличие типоразмеров, заделка оголовка/пяты и пр.), что переводит задачу из разряда интуитивного подбора в формализованную многоцелевую процедуру.

4. Обоснована необходимость учёта неопределённостей инженерно-геологических данных, что проявляется в чувствительности решения к вариациям прочностных и деформационных характеристик грунтов. Рекомендовано использовать целевой запас η и интервальные проверки параметров грунтового разреза.

5. Показано, что предложенный подход, будучи реализованным в виде расчётной процедуры, легко интегрируется в проектный процесс: он совместим с типовыми нормативными расчётами $F_d(L, s)$, допускает расширение до многоцелевой оптимизации (стоимость/масса/монтажность) и прозрачен для экспертизы.

6. Отмечено, что практическая применимость алгоритма подтверждается модельными примерами: формализуя правило подбора, удаётся избежать чрезмерных запасов по длине/сечению при обеспечении нормативной надёжности.

7. Сформулированы ограничения применимости текущей версии: алгоритм разработан для висячей сваи, работающей на вертикальную сжимающую нагрузку; групповые эффекты, совместная работа ростверка и сваи, горизонтальные нагрузки, сейсмика, морозное пучение и реологические эффекты требуют расширения модели и отдельной калибровки.

8. Для повышения инженерной воспроизводимости предложены рекомендации по настройкам: разумный шаг по длине $\Delta L = 0,1 - 1,0$ м; целевой запас $\eta \approx 1,05 - 1,15$ в зависимости от неопределённости изысканий; системная верификация промежуточных проверок (оголовок/пята, отрицательное трение, влияние насыпей/выемок).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li S., Hai M., Zhang Q., Zhou B., Wang M., Zhao Z. Study on an interpretable prediction model for pile bearing capacity based on SHAP and BP neural networks // *Scientific Reports*. — 2025. — Vol. 15. — Art. 28134. — DOI: 10.1038/s41598-025-13616-w.
2. Свод правил СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. — М. : Российский институт стандартизации, 2022. — 82 с.
3. Системы искусственного интеллекта в строительстве / В. Б. Гущина, С. К. Попова, С. А. Раков [и др.] // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. — 2024. — № 1. — С. 177-182. — DOI 10.33764/2687-041X-2024-1-177-182. — EDN TJAXLJ.
4. Gu W., Liao J., Cheng S. Bearing capacity prediction of the concrete pile using tuned ANFIS system // *Journal of Engineering and Applied Science*. — 2024. — Vol. 71, No. 1. — DOI: 10.1186/s44147-024-00369-y.
5. Офрихтер, Я. В. Балансировка обучающей выборки при обучении искусственных нейронных сетей для решения геотехнических задач / Я. В. Офрихтер, А. Б. Пономарев // *Construction and Geotechnics*. — 2023. — Т. 14, № 2. — С. 144-153. — DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.11. — EDN DYTGEV.
6. Офрихтер, Я. В. Оценка модуля деформации грунта по данным статического зондирования методами машинного обучения / Я. В. Офрихтер, А. Б. Пономарев // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. — 2025. — № 1. — С. 22-28. — EDN VURUUI.
7. Болдырев Г.Г. К вопросу использования информационных систем при изысканиях и проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений [Электронный ресурс] // *Геотехника и геотехнический мониторинг*. — 2020. — URL: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovani-osnovanij-fundamentov-zdaniy-i-sooruzhenij-42530.shtml> (дата обращения: 10.01.2023).
8. Болдырев, Г. Г. Информационные системы в строительстве / Г. Г. Болдырев, А. Ю. Кондратьев // *Жилищное строительство*. — 2019. — № 9. — С. 17-23. — DOI 10.31659/0044-4472-2019-9-17-23. — EDN MOFISO.
9. Rahman M. S., Wang J., Deng W., Carter J. P. A neural network model for the uplift capacity of suction caissons // *Computers and Geotechnics*, 2001, no. 4, pp. 269–287. DOI: 10.1016/S0266-352X(00)00033-1.
10. Yuan B., Choo C.S., Yeo L.Y., et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper // *Geomechanics and Geoengineering*. — 2025. — Т. 20, № 5. — С. 1128–1159. — DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029.
11. Geostru Editor. The observational method in geotechnical design // *Geostru Blog*. December 12, 2022. URL: <https://blog.geostru.eu/en/the-observational-method-in-geotechnical-design>
12. Vogel C. R. Computational Methods for Inverse Problems. — Philadelphia: SIAM, 2002. — DOI: 10.1137/1.9780898717570. URL: <https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898717570> (дата обращения: 18.10.2025).
13. Петряшев, С. О. Разработка и верификация комплексной модели системы «основание-водохранилище-плотина-здание станции» Саяно-Шушенской ГЭС, как основы для внедрения в систему мониторинга / С. О. Петряшев, А. М. Белостоцкий, Д. С. Дмитриев // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года*. — Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. — С. 248-250. — EDN CZZSFA.
14. Murlidhar B.R., Sinha R.K., Mohamad E.T., Sonkar R., Khorami M. (2020) The effects of particle swarm optimisation and genetic algorithm on ANN results in predicting pile bearing capacity. *Int J Hydromechanics* 3(1):69–87

15. Moradi G., Hassankhani E., Halabian A.M. (2022) Experimental and numerical analyses of buried box culverts in trenches using geofoam. *Proc Inst Civ Eng Eng* 175:311–322
16. Benemaran R.S., Esmaeili-Falak M. (2023) Predicting the Young's modulus of frozen sand using machine learning approaches: state-of-the-art review. *Geomech Eng* 34:507–527
17. Raja MNA, Shukla SK (2021) Predicting the settlement of geosynthetic-reinforced soil foundations using evolutionary artificial intelligence technique. *Geotext Geomembranes* 49:1280–1293
18. Применение методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей при прогнозировании несущей способности забивных свай / А. Н. Николюкин, В. М. Антонов, П. В. Монастырев, В. А. Лисовский // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4(65). – С. 115–129. – EDN DHEWAS.
19. Прогнозирование несущей способности забивных свай на основе нейронных сетей / А. Н. Николюкин, В. М. Антонов, П. В. Монастырев [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2025. – № 4(31). – С. 86–97. – DOI 10.51608/26867818_2025_4_86. – EDN JXHCIE.

REFERENCES

1. Li S., Hai M., Zhang Q., Zhou B., Wang M., Zhao Z. Study on an interpretable prediction model for pile bearing capacity based on SHAP and BP neural networks. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 28134. DOI: 10.1038/s41598-025-13616-w.
2. Svod pravil SP 24.13330.2021. Svainye fundamenty [Code of Practice SP 24.13330.2021. Pile Foundations]. Moscow: Russian Institute for Standardization, 2022. 82 p.
3. Gushchina V. B., Popova S. K., Rakov S. A., et al. Sistemy iskusstvennogo intellekta v stroitel'stve [Artificial intelligence systems in construction]. *Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnoshenii v Rossii: pravovoe i geoprostanstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya* [Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions], 2024, no. 1, pp. 177–182. DOI: 10.33764/2687-041X-2024-1-177-182. EDN TJAXLJ.
4. Gu W., Liao J., Cheng S. Bearing capacity prediction of the concrete pile using tuned ANFIS system. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, vol. 71, no. 1. DOI: 10.1186/s44147-024-00369-y.
5. Ofrikhter Ya. V., Ponomarev A. B. Balansirovka obuchayushchei vyborki pri obuchenii iskusstvennykh neironnykh setei dlya resheniya geotekhnicheskikh zadach [Balancing the training dataset when training artificial neural networks for solving geotechnical problems]. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 144–153. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.11. EDN DYTGEV.
6. Ofrikhter Ya. V., Ponomarev A. B. Otsenka modulya deformatsii grunta po dannym staticheskogo zondirovaniya metodami mashinnogo obucheniya [Evaluation of soil deformation modulus from static penetration test data using machine learning methods]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], 2025, no. 1, pp. 22–28. EDN VURUUJ.
7. Boldyrev G. G. K voprosu ispol'zovaniya informatsionnykh sistem pri izyskaniyakh i proektirovanii osnovanii fundamentov zdaniy i sooruzhenii [On the use of information systems in site investigations and design of building and structure foundations] [Electronic resource]. *Geotekhnika i geotekhnicheskii monitoring* [Geotechnics and Geotechnical Monitoring], 2020. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanii-fundamentov-zdaniy-i-sooruzhenij-42530.shtml> (accessed 10.01.2023).
8. Boldyrev G. G., Kondratyev A. Yu. Informatsionnye sistemy v stroitel'stve [Information systems in construction]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2019, no. 9, pp. 17–23. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-17-23. EDN MOFISO.
9. Rahman M. S., Wang J., Deng W., Carter J. P. A neural network model for the uplift capacity of suction caissons. *Computers and Geotechnics*, 2001, no. 4, pp. 269–287. DOI: 10.1016/S0266-352X(00)00033-1.
10. Yuan B., Choo C. S., Yeo L. Y., et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper. *Geomechanics and Geoengineering*, 2025, vol. 20, no. 5, pp. 1128–1159. DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029.
11. Geostru Editor. The observational method in geotechnical design. *GeoStru Blog*, 12 December 2022. URL: <https://blog.geostru.eu/en/the-observational-method-in-geotechnical-design> (accessed [keep your date if needed]).
12. Vogel C. R. Computational Methods for Inverse Problems. Philadelphia: SIAM, 2002. DOI: 10.1137/1.9780898717570. URL: <https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898717570> (accessed 18.10.2025).
13. Petryashev S. O., Belostotsky A. M., Dmitriev D. S. Razrabotka i verifikatsiya kompleksnoi modeli sistemy “osnovanie–vodokhranilishche–plotina–zdanie stantsii” Sayano-Shushenskoi GES, kak osnovy dlya vnedreniya v sistemu monitoringa [Development and verification of a comprehensive model of the “foundation–reservoir–dam–powerhouse building” system of the Sayano-Shushenskaya HPP as a basis for implementation in the monitoring system]. In: Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktov i sooruzhenii: Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma, Tambov, 17–21 maya 2023 goda [Topical Problems of Computer Modelling of Structures and Buildings: Abstracts of the 8th International Symposium, Tambov, 17–21 May 2023]. Tambov: IP Chesnokova A. V., 2023, pp. 248–250. EDN CZZSFA.
14. Murlidhar B. R., Sinha R. K., Mohamad E. T., Sonkar R., Khorami M. The effects of particle swarm optimisation and genetic algorithm on ANN results in predicting pile bearing capacity. *International Journal of Hydromechanics*, 2020, 3(1), pp. 69–87.

15. Moradi G., Hassankhani E., Halabian A. M. Experimental and numerical analyses of buried box culverts in trenches using geofoam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering*, 2022, 175, pp. 311–322.
16. Benemaran R. S., Esmaeili-Falak M. Predicting the Young's modulus of frozen sand using machine learning approaches: state-of-the-art review. *Geomechanics and Engineering*, 2023, 34, pp. 507–527.
17. Raja M. N. A., Shukla S. K. Predicting the settlement of geosynthetic-reinforced soil foundations using evolutionary artificial intelligence technique. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49, pp. 1280–1293.
18. Nikolyukin A. N., Antonov V. M., Monastyrev P. V., Lisovskiy V. A. *Primenenie metodov mashinnogo obucheniya i iskusstvennykh neironnykh setei pri prognozirovanii nesushchei sposobnosti zabivnykh svai* [Application of machine learning methods and artificial neural networks for predicting the bearing capacity of driven piles]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Construction], 2025, no. 4(65), pp. 115–129. EDN DHEWAS.
19. *Prognozirovaniye nesushchey sposobnosti zabivnykh svay na osnove neyronnykh setey* / A. N. Nikolyukin, V. M. Antonov, P. V. Monastyrev [i dr.] // *Ekspert: teoriya i praktika*. – 2025. – No. 4(31). – S. 86–97. – DOI 10.51608/26867818_2025_4_86. – EDN JXHCIE.

Информация об авторах:

Николюкин Алексей Николаевич

ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

E-mail: valax1@yadnex.ru

Антонов Василий Михайлович

ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

E-mail: antonov280562@mail.ru

Монастырёв Павел Владиславович

ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, доктор техн. наук, директор института АрхСиТ

E-mail: monastyrev68@mail.ru

Лисовский Владислав Александрович

ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, магистрант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

E-mail: Artas525@yandex.ru

Information about authors:

Nikolyukin Aleksey N.

FSBEI HE "Tambov State Technical University", Tambov, Russia, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Building Structures

E-mail: valax1@yadnex.ru

Antonov Vasily M.

FGBOU VO «Tambov State Technical University», Tambov, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Building and Structure Constructions»

E-mail: antonov280562@mail.ru

Monastyrev Pavel VI.

FGBOU VO «Tambov State Technical University», Tambov, Russia, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of ArchSiT

E-mail: monastyrev68@mail.ru

Lisovsky Vladislav Al.

FSBEI HE "Tambov State Technical University", Tambov, Russia, Master's Student at the Department of Building Structures

E-mail: Artas525@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 17.11.2025
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, Д.В. ТЯГУР²¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

Аннотация. Исследовано влияние пространственной неравномерности коррозионных повреждений арматуры на работоспособность изгибаемых железобетонных элементов. Экспериментально изучено распределение фактических площадей поперечных сечений арматурных стержней после коррозионного воздействия. Обработка результатов выполнена на основе трёхмерного сканирования с последующим статистическим анализом. Для количественной оценки локального ослабления сечения предложены коэффициент пространственной неоднородности коррозии и вероятностная модель его распределения, позволяющая определять расчётное минимальное сечение корродированной арматуры. Показано, что использование средней степени коррозионного повреждения приводит к завышению несущей способности изгибаемых железобетонных элементов. Учет локального характера коррозии изменяет траекторию деградации работоспособности и приводит к снижению живучести элемента. Предложенный подход позволяет перейти от оценки остаточной прочности в отдельный момент времени к интегральной оценке живучести, характеризующей степень сохранения работоспособности конструкции в процессе накопления повреждений.

Ключевые слова: изгибаемые железобетонные элементы, неравномерная коррозия, изгибная прочность, работоспособность, живучесть.

A.G. TAMRAZYAN¹, D.V. TYAGUR²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF SURVIVABILITY OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER NON-UNIFORM REINFORCEMENT CORROSION

Abstract. The influence of spatially non-uniform reinforcement corrosion on the performance and survivability of flexural reinforced concrete elements is investigated. The distribution of the actual cross-sectional areas of reinforcing bars after corrosion exposure is studied experimentally. The data are obtained using three-dimensional scanning followed by statistical analysis. To quantify local section weakening, a coefficient of corrosion non-uniformity is introduced, and a probabilistic distribution model is proposed, allowing the design minimum cross-section of corroded reinforcement to be determined. It is shown that using the average corrosion level leads to an overestimation of the load-bearing capacity of flexural reinforced concrete elements. Accounting for the localized nature of corrosion changes the degradation path of structural performance and leads to a reduction in survivability. The obtained relationships make it possible to move from evaluating residual strength at a single point in time to an integral assessment of survivability, reflecting the degree to which the structure retains its performance during damage accumulation.

Keywords: flexural reinforced concrete elements, non-uniform corrosion, flexural strength, load-bearing capacity, structural performance, survivability.

1. Введение

Длительная эксплуатация железобетонных конструкций в условиях воздействия агрессивной окружающей среды неизбежно сопровождается коррозионным повреждением арматуры. Для изгибаемых железобетонных элементов данный процесс является одним из основных факторов деградации их эксплуатационных характеристик, поскольку приводит к снижению эффективной площади поперечного сечения арматурных стержней [1,2].

Влияние коррозии, как правило, учитывается через снижение площади арматуры и соответствующее уменьшение изгибной прочности элемента. Такой подход удовлетворительно описывает поведение конструкции при равномерном износе арматурных стержней [3,4]. Однако экспериментальные исследования показывают, что фактический характер коррозионного повреждения, как правило, является локальным и сопровождается образованием участков резкого ослабления сечения [5–7]. В ряде случаев это вызывает изменение механизма разрушения изгибаемых железобетонных элементов. Вместо формирования пластического шарнира наблюдается внезапное хрупкое разрушение при уровнях коррозии, при которых несущая способность по нормальным сечениям с учетом равномерного снижения площади арматуры еще не исчерпана [8,9]. Таким образом, потеря работоспособности конструкции определяется не только снижением несущей способности, но и характером ее деградации. Для описания поведения конструкций при наличии повреждений все чаще предлагается концепция живучести, характеризующая способность элемента сохранять работоспособность при возникновении и накоплении дефектов [10,11]. В существующих исследованиях данное свойство преимущественно рассматривается применительно к аварийным воздействиям разового характера – взрывам, пожарам и локальным отказам элементов [12–14].

В целом следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе терминология, связанная с понятием живучести, не является полностью однозначной. При переводе на русский язык термином «живучесть» могут описываться как *robustness*, так и *survivability*, но их смысловые акценты не совпадают. Понятие *robustness* обычно связывается со способностью конструктивной системы противостоять локальным повреждениям без развития непропорционального разрушения. Термин *survivability*, напротив, акцентирует внимание на способности объекта функционировать в поврежденном состоянии и при накоплении повреждений, однако применительно к строительным конструкциям используется существенно реже, чем *robustness*.

Вместе с тем коррозионное повреждение арматуры в изгибаемых железобетонных элементах принципиально отличается от аварийных воздействий, представляя собой длительный процесс, постепенно снижающий работоспособность [15,16]. Следовательно, применительно к такому контексту целесообразно уточнить понятие живучести и рассматривать его как свойство конструкции, характеризующее степень сохранения ее работоспособности в процессе накопления коррозионных повреждений. В таком понимании живучесть отражает не только предельное состояние элемента, но и всю траекторию деградации его работоспособности по мере развития повреждений [10, 17].

Одним из определяющих факторов снижения работоспособности является пространственная неравномерность коррозии по длине арматуры. В настоящей работе приводится оценка влияния неравномерной коррозии арматуры на живучесть изгибаемых железобетонных элементов на основе экспериментальных данных о распределении фактических площадей поперечных сечений арматуры при коррозионных повреждениях.

2. Модели и методы

Для оценки неравномерности коррозии по длине арматурных стержней в рамках проводимого исследования в лаборатории кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» НИУ МГСУ были изготовлены образцы в виде призм 70х70х400 мм из бетона В20 с забетонированными арматурными стержнями длиной 300 мм периодического профиля Ø8 А500С и Ø12 А500С.

Образцы были разделены на 6 групп в зависимости от уровня коррозии и диаметра арматурного стержня. Предусматривалось получение коррозионных повреждений арматуры на уровнях 10, 20 и 30 % методом ускоренной электрохимической коррозии [19]. Образцы размещались в пластиковой емкости, заполненной 5 %-ным водным раствором хлорида натрия (NaCl). К арматурному стержню подключался положительный полюс источника постоянного тока, а отрицательный – к электролиту. Воздействие осуществлялось при постоянной силе тока 0,5 А.

После завершения ускоренного коррозионного воздействия арматурные стержни извлекались из образцов, бетон удалялся вручную без повреждения металла, после чего стержни обрезались по краевым зонам и подготавливались к измерениям. Геометрия корродированных стержней определялась методом оптического 3D-сканирования на сканере RangeVision PRO, по результатам которого были получены цифровые модели, использованные для последующей обработки фактических площадей поперечного сечения (рис. 1).

Для анализа пространственной неоднородности коррозии трехмерные модели арматурных стержней обрабатывались с помощью специального ПО последовательным определением фактических площадей поперечного сечения A_x вдоль продольной оси с шагом 1 мм, что позволило сформировать массив экспериментальных данных. Оценка локального ослабления арматуры выполнялась по расчетным участкам длиной 50 мм с использованием коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k , определяемого как отношение средней площади поперечного сечения стержня к минимальной площади в пределах соответствующего участка (рис. 2).

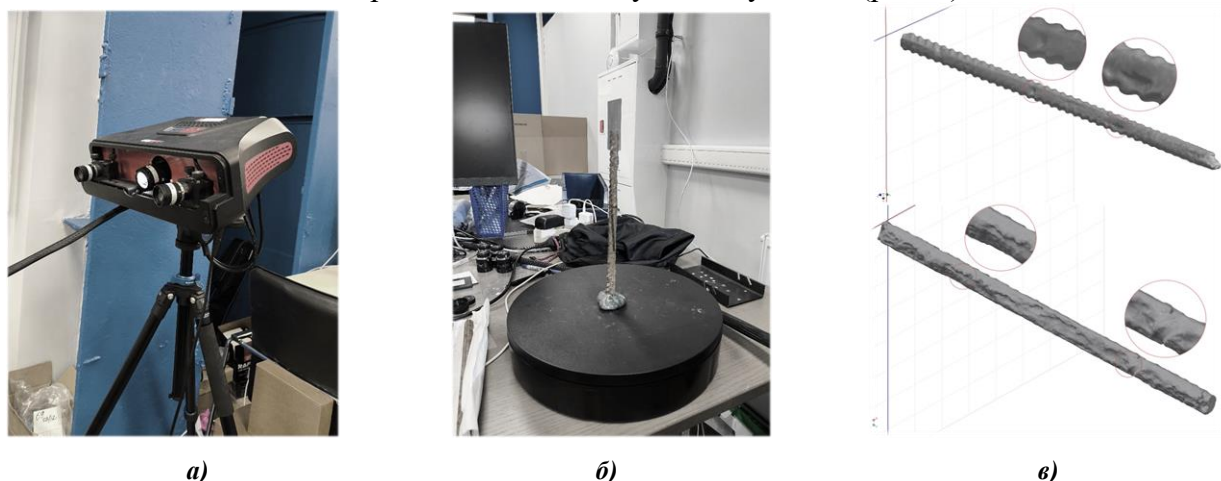


Рисунок 1 – Лазерное 3D - сканирование корродированных арматурных стержней:
 а) общий вид 3D-сканера RangeVision PRO; б) арматурный стержень на поворотном столе;
 в) цифровая 3D - модель корродированного стержня

Для каждого расчетного участка длиной 50 мм определялись значения коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k . На основе полученного массива данных R_k построены гистограммы распределения, анализ которых показал выраженную правостороннюю асимметрию и увеличение разброса значений по мере роста среднего уровня коррозионного повреждения, что свидетельствует об усилении локального характера коррозии.

По виду распределений было выдвинуто предположение о подчинении коэффициента R_k закону экстремальных значений (распределению Гумбеля). Для проверки гипотезы выполнена статистическая верификация графическим методом вероятностных графиков и

количественным методом по критерию согласия Колмогорова–Смирнова, подтвердившая принятую модель распределения [20].

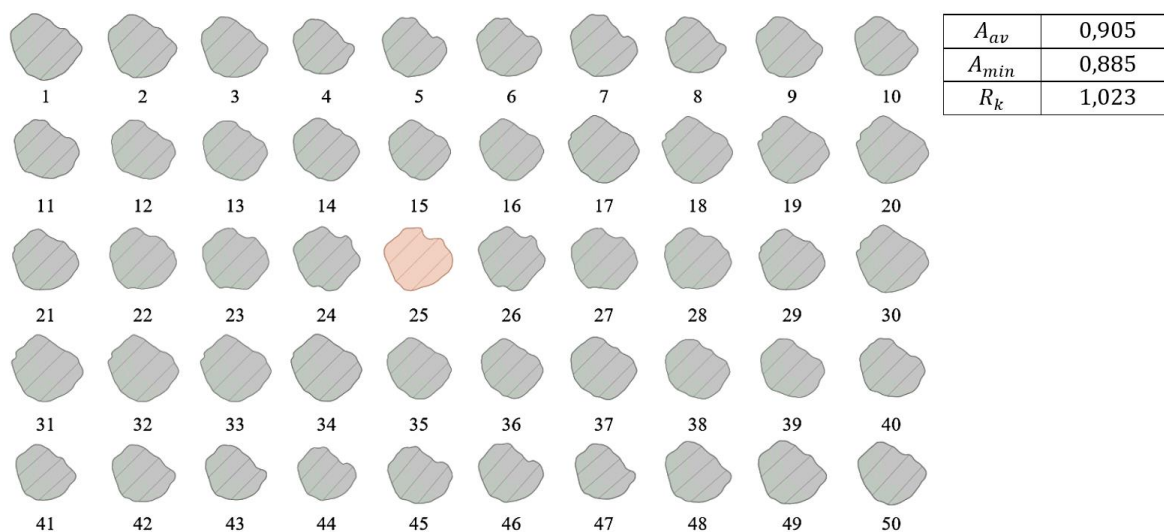


Рисунок 2 – Фактические поперечные сечения корродированных арматурных стержней на примере одного расчетного участка

По экспериментальным данным для коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k установлено, что его распределение соответствует закону экстремальных значений по распределению Гумбеля (рис. 3). Оценка параметров распределения μ и β выполнялась методом максимального правдоподобия [20]. Для выявления влияния степени коррозионного повреждения на статистические характеристики локального ослабления арматуры проведён регрессионный анализ зависимости параметров распределения от средней потери массы X_p . В качестве аппроксимирующей принята линейная зависимость $\mu(X_p)$ и $\beta(X_p)$, по которой определены значения параметров для характерных уровней коррозии 10, 20 и 30 %.

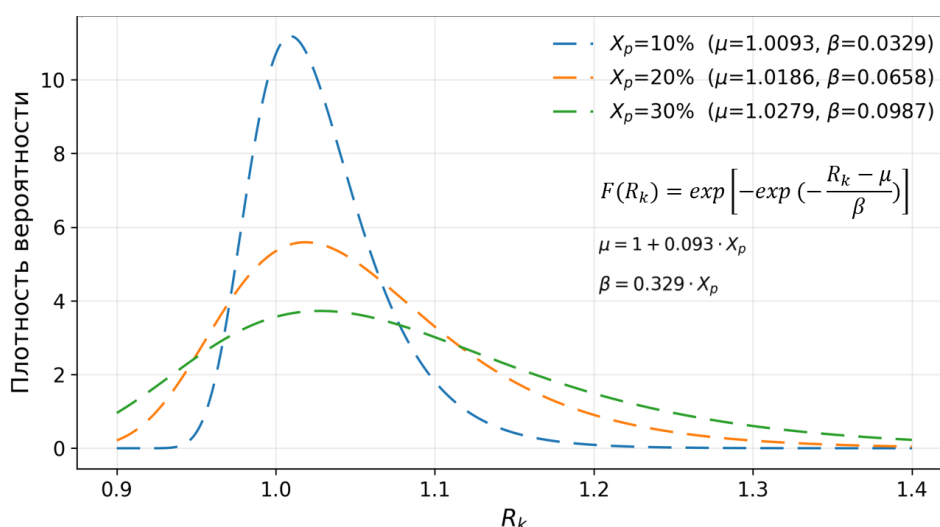


Рисунок 3 – Плотность распределения вероятности R_k для арматуры диаметром 12 мм при различных уровнях коррозионных повреждений

Для анализа снижения относительной несущей способности по диапазону повреждений и перехода от описания деградации прочности в точке к интегральной оценке определения остаточной работоспособности по мере развития коррозии арматуры используется метод оценки живучести, предложенный в работе [22]:

$$R = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T \rho(t) dt = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T \frac{M_{ult}(t)}{M_{ult}(0)} dt \quad (1)$$

где T_0 – время начала активной коррозии, лет ; T – момент времени, до которого выполняется оценка живучести или расчетный срок эксплуатации, лет ; $\rho(t)$ – нормированная функция снижения несущей способности; $M_{ult}(t)$ – функция снижения предельного изгибающего момента при коррозии арматуры во времени; $M_{ult}(0)$ – предельный изгибающий момент в неповрежденном состоянии;

Нормированная функция снижения несущей способности, отражающая, остаточный уровень несущей способности по мере развития коррозии с учетом неравномерности по длине арматуры в данном случае определяется:

$$\rho(t) = \frac{M_{ult}(t)}{M_{ult}(0)} = \frac{R_s \cdot A_{min}(t) \cdot [h_0 - 0,5 \cdot x(t)]}{R_s \cdot A_{s0} \cdot [h_0 - 0,5 \cdot x_0]} \quad (2)$$

Используя математическое ожидание коэффициента пространственной неоднородности коррозии $E[R_k]$, определим расчётное значение минимальной площади поперечного сечения арматуры в пределах расчетного участка при конкретном уровне коррозии:

$$A_{min} = \frac{A_{av}}{E[R_k]}. \quad (3)$$

где $E[R_k] = \mu + \gamma\beta$ – математическое ожидание коэффициента пространственной неоднородности коррозии, $\gamma = 0,5772$ – постоянная Эйлера [20]; μ, β – параметры распределения Гумбеля (рис. 3).

При этом средняя оставшаяся площадь арматуры при коррозионном повреждении определяется через степень коррозии $A_{av} = A_s(1 - X_p)$. Получим выражение для ожидаемой минимальной площади поперечного сечения арматуры в следующем виде:

$$A_{min} = \frac{A_s(1 - X_p)}{\mu + \gamma\beta}. \quad (4)$$

Степень коррозии поперечного сечения, определим через скорость коррозии:

$$X_p(t) = \delta_{\emptyset D} \cdot [t - T_0] \quad (5)$$

где $\delta_{\emptyset D}$ – доля площади арматуры, теряемая за год после момента начала коррозии для диаметра d ; T_0 – время начала активной коррозии; t – текущий момент времени эксплуатации конструкции с момента начала коррозии.

Тогда $x(t)$ – высота сжатой зоны бетона в момент времени t с учетом $A_{min}(t)$ определяется следующим образом:

$$x(t) = \frac{R_s \cdot A_{min}(t)}{R_b \cdot b} = x_0 \cdot \frac{(1 - X_p(t))}{\mu + \gamma\beta} \quad (6)$$

Соответственно, выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$\rho(t) = \frac{1 - X_p(t)}{\mu + \gamma\beta} \cdot \frac{h_0 - 0,5 \cdot x_0 \left[\frac{1 - X_p(t)}{\mu + \gamma\beta} \right]}{h_0 - 0,5 \cdot x_0} \quad (7)$$

Далее представим $\rho(t)$ в виде квадратичной аппроксимации $\rho(\tau)$ с учетом $\tau = t - T_0$, $\eta_s(\tau) = \delta_{\emptyset D} \cdot \tau$:

$$\rho(\tau) \approx 1 + p\tau + q\tau^2 \quad (8)$$

где p, q – коэффициент разложения по времени, $p = -\delta_{\emptyset D}(1 + \alpha + \lambda)$, $p = \delta_{\emptyset D}^2[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)]$, λ характеризует чувствительность изгибающего момента к изменению высоты сжатой зоны $\lambda = \frac{0,5 \cdot x_0}{h_0 - 0,5 \cdot x_0}$, α – коэффициент экстремальности, характеризует степень неравномерности коррозии (для стержней $d_s = 12$ мм $\alpha = 0,6$)

Подставляя выражение (7) в (1), с учетом $\Delta T = T - T_0$ получим:

$$R = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} \rho(\tau) d\tau = \frac{1}{\Delta T} \left[\Delta T + \frac{p}{2} \Delta T^2 + \frac{q}{3} \Delta T^3 \right] = 1 + \frac{p}{2} \Delta T + \frac{q}{3} \Delta T^2 \quad (9)$$

Введем обозначение $K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda)$, $K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)]$.

Окончательное выражение для интегрального показателя живучести с учетом неравномерности коррозии арматуры принимает форму:

$$R = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 \quad (10)$$

Соответственно, для оценки живучести в случае допущения о равномерной коррозии коэффициент экстремальности $\alpha = 0$.

Для количественной оценки влияния неравномерности коррозии арматуры на снижением несущей способности и показатель живучести была рассмотрена балка прямоугольного сечения $120 \times 150 \times 2300$ мм из бетона класса В25, армированная двумя стержнями класса А500С диаметром 12 мм [23]. Из расчета нормального сечения железобетонного изгибаемого элемента с одиночным армированием [21] сниженную несущую способность при коррозии продольной арматуры с учетом неравномерности определим из условия: $M_{ult}(A_{min}) = R_s A_{min} (h_0 - 0,5x)$. И соответственно при допущении равномерной коррозии сниженная несущая способность определяется: $M_{ult}(A_{av}) = R_s A_{av} (h_0 - 0,5x)$.

Коррозионные повреждения рассматривались на растянутой арматуре в диапазоне по степени коррозии от 0 до 0,3 со скоростью 2% в год. Рассматриваемый период с начала коррозии арматуры 15 лет - за это время средняя потеря площади составит 30%. Для сопоставимости результатов был введен относительный уровень коррозии $\bar{X}_p$, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, где единица соответствует 30% потери площади арматуры. На основе выполненных расчётов получены значения относительной несущей способности в поврежденном состоянии для случая допущения о равномерной коррозии $M_{ult}(A_{av})/M_{ult}(0)$ и с учетом неравномерности $M_{ult}(A_{min})/M_{ult}(0)$.

Вычислим значение коэффициентов K_1 и K_2 для случая неравномерной коррозии:

$$K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda) = \frac{1}{2}(1 + 0,6 + 0,153) = 0,876.$$

$$K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)] = \frac{1}{3}[0,6(1 + 0,6) + 0,153(1 + 0,6 + 0,6^2)] = 0,420.$$

Расчёт интегрального показателя живучести при учете неравномерности коррозии арматуры:

$$R_{(1)} = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 = 1 - 0,876 \cdot 0,02 \cdot 15 + 0,420 \cdot (0,02 \cdot 15)^2$$

$$R_{(1)} = 0,775$$

Для сравнения со случаем равномерной коррозии вычислим значения коэффициентов K_1 и K_2 при $\alpha = 0$:

$$K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda) = \frac{1}{2}(1 + 0 + 0,153) = 0,577.$$

$$K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)] = \frac{0,153}{3} = 0,051$$

$$R_{(2)} = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 = 1 - 0,577 \cdot 0,02 \cdot 15 + 0,051 \cdot (0,02 \cdot 15)^2$$

$$R_{(2)} = 0,832$$

Данный подход отличается от оценки остаточной несущей способности в одной точке при фиксированном значении коррозии, поскольку учитывает всю траекторию деградации, т.е. то, как быстро снижается работоспособность по мере развития коррозии. Полученные значения относительной несущей способности и живучести для двух вариантов коррозии приведены на диаграмме (рис. 4).

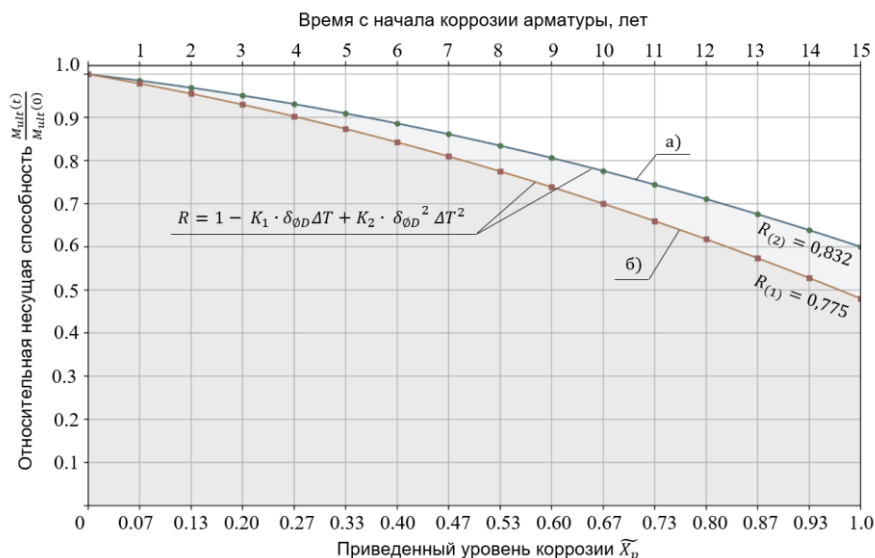


Рисунок 4 – Диаграмма снижения относительной несущей способности от приведенного уровня коррозии арматуры с учётом: а) равномерной коррозии; б) неравномерной коррозии;

3. Результаты исследования и их анализ

Проведённые экспериментальные исследования позволили количественно оценить влияние неравномерности коррозионных повреждений арматуры на несущую способность и живучесть изгибаемых железобетонных элементов. Введённый коэффициент пространственной неоднородности коррозии R_k количественно характеризует локальное повреждение стержня. Установлено, что его распределение подчиняется закону экстремальных значений (распределению Гумбеля), что указывает на факт того, что действительное состояние арматуры определяется не средней потерей площади, а вероятностью появления поврежденного сечения с минимальной остаточной площадью на ограниченном участке длины. Использование средней остаточной площади сечения приводит к систематическому завышению несущей способности нормального сечения. Таким образом, ошибка носит не случайный, а закономерный характер и возрастает по мере развития коррозионных повреждений.

Интегральная оценка живучести подтверждает данный эффект. Учёт неравномерности коррозии приводит к снижению показателя живучести с 0,832 до 0,775 ($\approx 7\%$). Несмотря на относительно небольшую величину расхождения, его физический смысл существенно важнее абсолютного значения: меняется не только остаточная несущая способность в отдельный момент времени, а вся траектория деградации работоспособности конструкции, что означает ускоренную потерю работоспособности при длительной эксплуатации. При запасе прочности около 25–30% от проектной несущей способности разница в 7% по интегральному показателю потерю до 15% от начального запаса несущей способности т.е. элемент может перейти в аварийное состояние на 5–7 лет раньше прогнозируемого срока при равномерной модели коррозии арматуры.

4. Заключение

1. Экспериментально изучен локальный характер коррозионных повреждений арматуры в бетоне. Отношение средней площади сечения к минимальной (R_k) на расчетном участке возрастает с увеличением степени коррозии, достигая при 30 % коррозионном повреждении значений 1,18–1,21 в зависимости от диаметра стержня.

2. Получены зависимости параметров распределения μ и β от среднего уровня коррозии X_p , позволяющие прогнозировать статистические характеристики локальных ослаблений для арматуры различного диаметра.

3. Для определения расчётной минимальной площади сечения корродированной арматуры предложено использование математического ожидания $E[R_k]$, что даёт возможность количественно учитывать неравномерность коррозии при расчёте несущей способности нормальных сечений и оценке живучести.

4. Установлено, что допущение о равномерной коррозии приводит к систематическому завышению несущей способности.

5. Показано, что живучесть элемента при учёте неравномерности повреждений снижается по сравнению со случаем равномерной коррозии, что отражает более интенсивную деградацию работоспособности при локальном характере износа арматуры.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоляго Г. А., Фролов Н. В., Дронов А. В. Анализ коррозионных повреждений эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 52–57
2. Бондаренко В.М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения // Строительство и реконструкция – 2009. №4. С.28-33.
3. Методические рекомендации «Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений» Москва, 2018. 50 с
4. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой. Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
5. Тамразян, А. Г. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках / А. Г. Тамразян, Й. А. К. Сайед // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 557–568.
6. Дронов, А. В. Особенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов / А. В. Дронов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 32-36.
7. Rodriguez, J., Ortega, LM and Casal, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and Building Materials, 11(4):239–248, 1997.
8. Тамразян А.Г., Попов Д.С. К влиянию армирования сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента на кинетику развития коррозионных повреждений // Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова. 2017. - С. 153-157
9. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий. Железобетонные конструкции. 2023;1(1):46-54.
10. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений. Железобетонные конструкции. 2023;3(3):62-74.
11. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 22–28.
12. Колчунов В.И., Савин С.Ю. Устойчивость железобетонных каркасов зданий к начальному локальному разрушению // Известия вузов. Строительство. 2024. No 10. С. 50–64.
13. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с
14. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047
15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures. 2004. Vol. 37. Pp. 623–633.
16. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Wiley, 2013. 434 p.
17. Cavaco, Eduardo S, Casas, Joan R, Neves, Luis AC and Huespe, Alfredo E. Robustness of corroded reinforced concrete structures—a structural performance approach. Structure and Infrastructure Engineering, 9(1):42–58, 2013.

18. Bontempi F, Giuliani L, Gkoumas K. Handling the exceptions: Robustness assessment of a complex structural system. Proceedings of the 3rd international conference on structural engineering, mechanics and computation (SEMC 2007). Rotterdam: Millpress; 2007. p. 1747–52
19. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Моногрф. / В.Н. Мигунов, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 362 с.
20. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Сб. статей. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
21. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
22. Тамразян, А. Г. Методика определения живучести изгибаемых железобетонных элементов при коррозии арматуры / А. Г. Тамразян, Д. В. Тягур // Экономика строительства. – 2025. – № 11. – С. 714-718.
23. Rodriguez, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement / J. Rodriguez, L. M. Ortega, J. Casal // Construction and Building Materials. – 1997. – Vol. 11, no. 4. – Pp. 239–248.

REFERENCES

1. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analiz korrozionnyh povrezhdenij jekspluatiruemyh izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniy i sooruzhen [Analysis of corrosion damages of reinforced concrete structures in operation]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2019, no. 1, pp. 52–57. (rus)
2. Bondarenko V.M. Specifika silovogo soprotivleniya povrezhdennyh korroziej zhelezobetonnyh konstrukcij i novye faktory razrusheniya [Specific features of load-bearing resistance of corrosion-damaged reinforced concrete structures and new failure factors]. Stroitel'stvo i rekonstrukcija [Construction and Reconstruction], 2009, no. 4, pp. 28–33. (rus)
3. Metodicheskie rekomendacii “Metodika ocenki ostatochnogo resursa nesushhih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij” [Guidelines “Methodology for assessing the residual service life of load-bearing structures of buildings and structures”]. Moscow, 2018, 50 p. (rus)
4. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slab with corroded reinforcement. Construction and reconstruction. 2022. No. 1 (99). P. 89-98
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Svrnenie pereraspredeleniya momentov v korrodirovannyh i nekorrodirovannyh staticheski neopredelimyyh zhelezobetonnyh balkah [Comparison of moment redistribution in corroded and non-corroded statically indeterminate reinforced concrete beams]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2024, vol. 19, no. 4, pp. 557–568. (rus)
6. Dronov A.V. Osobennosti razvitiya pittingovoy korrozii stal'noj armatury zhelezobetonnyh izgibaemyh jelementov [Features of pitting corrosion development of steel reinforcement in flexural reinforced concrete elements]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2017, no. 3, pp. 32–36. (rus)
7. Rodriguez, J., Ortega, LM and Casal, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and Building Materials, 11(4):239–248, 1997.
8. Tamrazyan A.G., Popov D.S. K vliyaniju armirovaniya szhatoy zony izgibaemogo zhelezobetonного jelementa na kinetiku razvitiya korrozionnyh povrezhdenij [On the influence of compression zone reinforcement of a flexural reinforced concrete element on the kinetics of corrosion damage development]. In: Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Nauka i innovacii v stroitel'stve” [International Scientific and Practical Conference “Science and Innovations in Construction”], Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2017, pp. 153–157. (rus)
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts. Reinforced concrete structures. 2023;1(1):46-54.
10. Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. Reinforced concrete structures. 2023;3(3):62-74.
11. Tamrazyan A.G. Zhivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstrukcij pri povrezhdenii [Survivability as the degree of operability of structures in case of damage]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2023, no. 7, pp. 22-28. (rus).
12. Kolchunov V.I., Savin S.YU. Ustojchivost' zhelezobetonnyh karkasov zdaniy k nachal'nomu lokal'nomu razrusheniyu [Stability of reinforced concrete building frames to initial localized failure] // Izvestiya vuzov. Construction. 2024. No 10. Pp. 50–64. (rus).
13. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyyh vozdeystviyah. [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow: ACB, 2014. 208 p. (rus).
14. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047

15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. Pp. 623–633.
16. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley, 2013. 434 p.
17. Cavaco, Eduardo S, Casas, Joan R, Neves, Luis AC and Huespe, Alfredo E. Robustness of corroded reinforced concrete structures—a structural performance approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(1):42–58, 2013.
18. Bontempi F, Giuliani L, Gkoumas K. Handling the exceptions: Robustness assessment of a complex structural system. *Proceedings of the 3rd international conference on structural engineering, mechanics and computation (SEMC 2007)*. Rotterdam: Millpress; 2007. p. 1747–52
19. Migunov V.N., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. Jeksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstrukcij v uslovijah korrozii [Experimental-theoretical modeling of reinforced structures under corrosion conditions]. Penza, PGUAS, 2014, 362 p. (rus)
20. Kolmogorov A.N. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika: Sbornik statej* [Theory of Probability and Mathematical Statistics: Collected Papers]. Moscow, Nauka, 1986, 535 p. (rus)
21. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. SNiP 52-01-2003 (with Amendment No. 1) Code of Regulations from 19.12.2018
22. Tamrazyan A.G., Tyagur D.V. Metodika opredeleniya zhivuchesti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri korrozii armatury [Methodology for determining the survivability of bent reinforced concrete elements under reinforcement corrosion]. *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of Construction]. 2025, no. 11, pp. 714-718. (rus.).
23. Rodriguez, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement / J. Rodriguez, L. M. Ortega, J. Casal // *Construction and Building Materials*. – 1997. – Vol. 11, no. 4. – Pp. 239–248.

Информация об авторах

Тамразян Ашот Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия
Д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Тягур Дмитрий Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия.
Аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: d_tyagur@mail.ru

Information about authors

Tamrazyan Ashot G.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia.
Doctor in tech. sc., Prof, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Tyagur Dmitry VI.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia.
Postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures,
E-mail: d_tyagur@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 10.01.2025
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, С.А. ДАНКОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрена задача вероятностной оценки надежности ферменных металлических конструкций с учетом коррозионного износа. Коррозионный износ представляется как накопление повреждений, а коррозионное состояние элемента рассматривается от неповрежденного уровня до предельного, соответствующего отказу (потери устойчивости стержневого элемента ферменной конструкции). Деграция описывается последовательностью вероятностных переходов между состояниями в рамках марковской модели с непрерывным временем. Временные зависимости вероятностей перехода восстанавливаются по экспериментальным наблюдениям и аппроксимируются параметрическими зависимостями, что позволяет сформировать согласованную матрицу переходов во времени для всей шкалы состояний. После калибровки модели выполняется моделирование методом Монте-Карло для отдельного стержневого элемента ферменной конструкции и для ферменной системы в целом с учетом различной структурной значимости элементов. Получены оценки надежности, а также характеристики накопления повреждений, которые можно использовать для инженерной диагностики и обоснования ремонтных решений.

Ключевые слова: коррозионный износ, ферменные конструкции, надежность, цепи Маркова, матрица вероятностей переходных состояний, метод Монте-Карло, имитационное моделирование.

T.A. MATSEEVICH¹, S.A. DANKOV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF TRUSSES IN CASE OF CORROSIONAL WEAR BASED ON SIMULATION MODELING

Abstract. The paper considers the problem of probabilistic assessment of the reliability of truss metal structures, taking into account corrosion wear. Corrosion wear is represented as the accumulation of damage, and the corrosion state of an element is considered from the undamaged level to the limit state corresponding to failure (loss of stability of a rod element of a truss structure). Degradation is described by a sequence of probabilistic transitions between states within a continuous-time Markov model. The time dependencies of the transition probabilities are reconstructed from experimental observations and approximated by parametric dependencies, which allows us to form a consistent time transition matrix for the entire state scale. After the model is calibrated, Monte Carlo simulations are performed for individual rod elements of the truss structure and for the truss system as a whole, taking into account the varying structural significance of the elements. This allows us to obtain reliability estimates and damage accumulation characteristics, which can be used for engineering diagnostics and repair decision-making.

Keywords: corrosion-induced deterioration, truss structures, reliability assessment, Markov chains, matrix of probabilities of transition states, Monte Carlo method, simulation modeling.

1. Введение

Коррозионный износ стальных ферменных конструкций можно рассматривать как длительный процесс накопления повреждений, при котором постепенно уменьшается эффективное сечение стержней и растёт неопределённость в отношении их фактической несущей способности. На практике это приводит к тому, что оценка надёжности становится задачей не только прочностной, но и вероятностной: коррозия одновременно снижает сопротивление и увеличивает разброс характеристик, поэтому «запас» работоспособности со временем меняется неодинаково для разных элементов и условий эксплуатации [1–4]. Дополнительную сложность создаёт то, что ферма является системой, где роль отдельных стержней различна, а локальные повреждения способны по-разному влиять на общую работоспособность. Сформирован широкий набор вероятностных моделей коррозии и подходов к учёту неопределённости в расчётах надёжности стальных конструкций [5–9]. Отдельно подчёркивается значимость корректного описания статистической природы коррозионных дефектов и выбора модели деградации, поскольку это влияет на временные профили надёжности и выводы о ресурсе [8, 9]. Для атмосферной коррозии накоплены длительные наблюдения и предложены обобщённые зависимости, связывающие коррозионные потери с параметрами среды [10–12], а для мостовых металлических сооружений обобщены современные представления о развитии коррозии, продуктах коррозии и технологиях очистки, влияющих на несущую способность и эксплуатационные последствия [13]. В задачах дискретного описания состояния сооружений применяются марковские модели и близкие стохастические процессы: они позволяют описывать деградацию как последовательность переходов между состояниями и строить прогнозы на горизонте жизненного цикла [14]. Для стальных ферм и мостов интерес представляют работы, где марковский аппарат используется уже на уровне планирования обслуживания и оценки системных эффектов [15], а также исследования, ориентированные на временной анализ ферменных систем в условиях атмосферной коррозии [16]. Тем не менее сохраняется методический разрыв между эмпирическими данными о деградации и полной, согласованной во времени вероятностной моделью переходов между стадиями коррозии, которая была бы пригодна и для отдельного стержневого элемента ферменной конструкции, и для ферменной системы [17–22]. Поэтому цель исследования состоит в разработке вероятностной методики оценки надёжности ферм при коррозионном износе на основе марковского описания переходов между состояниями и имитационного моделирования. Для достижения цели решаются задачи идентификации временных зависимостей переходных вероятностей по экспериментальным данным, построения полной матрицы переходов во времени и расчёта показателей надёжности методом Монте-Карло для стержневого элемента ферменной конструкции и для всей системы с учётом различной структурной значимости стержней.

2. Модели и метод

В качестве исходных материалов использованы эмпирические временные зависимости для шести дискретных коррозионных состояний стального стержневого элемента. Данные представлены в виде пар «время t – вероятность $p(t)$ » и сведены в excel-файл, где $p_{1j}(t)$ задают экспериментальные кривые для исходного состояния S_1 (элемент без коррозионных повреждений) и последующих состояний $S_2 \dots S_6$. Эти кривые рассматриваются как наблюдаемое «ядро» вероятностной деградации, по которому описываются параметрические зависимости, а затем формируется полная матрица нестационарных переходных вероятностей $P(t)$ для всех состояний.

Детерминированная часть модели используется для физического обоснования дискретизации и связи «потеря металла → потеря устойчивости». Коррозионное воздействие определяется через глубину проникновения (или эквивалентную потерю толщины) $C_{(t)}$. В простейшем кинетическом приближении используется степенная зависимость

$$C_{(t)} = At^B, \quad (1)$$

где $C_{(t)}$ — концентрация продуктов коррозии или глубина проникновения,

A и B — два фактора, определяемые условиями окружающей среды.

Эта кинетическая модель позволяет прогнозировать развитие коррозии во времени.

В работе [23] был предложен метод моделирования коррозии.

Модель рассматривает два случая:

- начальное, незатронутое коррозией сечение A_0 ;
- сечение $A_s(t)$, уменьшающееся во времени по формуле (2).

Площадь поперечного сечения элемента $A_s(t)$ с круглым сечением с течением времени оценивается по следующей формуле:

$$A_s(t) = \begin{cases} \frac{\pi d_{st0}^2}{4} \\ \frac{\pi [d_{st0} - r_{corr}(t - T_{corr})]^2}{4} \end{cases} \quad (2)$$

где t — текущее время;

T_{corr} — время начала коррозии, которое рассчитывается по формуле (3);

d_{st0} — начальный диаметр (до начала коррозии);

r_{corr} — скорость коррозии.

Время коррозии, необходимое для начала активной коррозии, определяется по следующей формуле, основанной на законах диффузии:

$$T_{corr} = \frac{x^2}{4D \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{th}}{C_0} \right) \right)^2}. \quad (3)$$

где x — глубина проникновения коррозии;

D — коэффициент диффузии;

erfc^{-1} — функция, обратная функции ошибки Гаусса;

C_{th} — пороговая концентрация хлоридов, при которой начинается разрушение защитной пленки металла и начинается коррозия;

C_0 — поверхностная концентрация хлоридов.

Введем дискретные коррозионные состояния. В таблице 1 представлены 6 стадий — от начального элемента до потери устойчивости, каждая из которых характеризуется потерей сечения элемента.

Таблица 1. Классификации стадий коррозии

Стадии коррозии	Состояние	Процент коррозии, %
стадия 1	Нет коррозии	0
стадия 2	Незначительная коррозия	0- 1
стадия 3	Умеренная коррозия	1- 3
стадия 4	Сильная коррозия	3- 8
стадия 5	Усиленная коррозия	8- 15
стадия 6	Потеря устойчивости	>15

Переход к вероятностной модели требует введения конечного числа состояний. Это не формальность, а следствие ключевого физического факта: опасность коррозии для сжатого стержня определяется не потерей массы, а нелинейным снижением его устойчивости.

3. Результаты исследования и их анализ

В нашем исследовании рассматриваются сжатые стержневые элементы ферменной конструкции коробчатого сечения 80х60х5мм и 50х5мм. Исходная площадь для прямоугольного замкнутого профиля с внешними размерами b (ширина) и h (высота), толщиной стенки s :

$$A_0 = 2s(b + h - 2s) \quad (4)$$

В свою очередь площадь поперечного сечения $A_{(t)}$ в момент времени t :

$$A_{(t)} = 2 \begin{cases} s(b + h - 2s) & (\text{коррозия не началась}) \\ s - r_{corr}(t - T_{corr})[b + h - 2(s - r_{corr}(t - T_{corr}))] & \end{cases} \quad (5)$$

где s — начальная толщина стенки,

r_{corr} — скорость коррозии,

T_{corr} — время начала коррозии,

b, h — геометрические размеры коробчатого профиля.

Для задач устойчивости определяющим является момент инерции $I_{x(t)}$ относительно оси возможного выпучивания. Для оси x :

$$I_{x(0)} = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s)(h - 2s)^3}{12}. \quad (6)$$

После начала коррозии толщина стенки уменьшается:

$$s_{eff(t)} = s - r_{corr}(t - T_{corr}). \quad (7)$$

Внешние размеры b и h в данной модели считаем неизменными (коррозия идёт с внутренней и внешней сторон стенки).

$$I_{x(t)} = 2 \begin{cases} \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s)(h - 2s)^3}{12} & , \text{ при } t < T_{corr} \\ \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s_{eff(t)})(h - 2s_{eff(t)})^3}{12} & , \text{ при } t \geq T_{corr} \end{cases} \quad (8)$$

где $I_{(t)}$ — момент инерции поперечного сечения в момент времени t ,

b, h — геометрические размеры коробчатого профиля,

s — начальная толщина стенки,

$s_{eff(t)}$ — эффективная толщина стенки в момент времени t ,

r_{corr} — скорость коррозии,

T_{corr} — время начала коррозии.

Радиус инерции и расчетная гибкость задаются по СП 16.13330.2017 п.7.1.1 [24]:

$$i(t) = \sqrt{\frac{I_{(t)}}{A_{(t)}}}, \quad \lambda(t) = \frac{\mu L}{i(t)}, \quad (9)$$

где μ — коэффициент расчётной длины, L — геометрическая длина стержня.

Проверка устойчивости центрально-сжатого элемента выполняется по СП 16.13330.2017 [24]:

$$\frac{N}{\varphi A_n R_y \gamma_c} \leq 1, \quad N_{cr}(t) = \varphi(\lambda(t)) R_y A_{(t)} \quad (10)$$

где $\varphi = \varphi(\lambda, R_y)$ — коэффициент продольного изгиба, определяемый по таблицам 5 или 6 [24] в зависимости от гибкости λ ,

$A = A_{(t)}$ — расчётная площадь сечения.

Шесть состояний (S_1 – S_6) были выделены на основе анализа двух взаимосвязанных параметров:

- критерий геометрического повреждения, $\eta(A_{(t)})$ — относительная потеря площади сечения:

$$\eta(A_{(t)}) = [(A_{(0)} - A_{(t)})/A_{(0)}] \cdot 100\% ; \quad (11)$$

- критерий функциональной деградации, $\eta(N_{(t)})$ — относительное снижение критической нагрузки:

$$\eta(N_{(t)}) = [(N_{cr(0)} - N_{cr(t)})/N_{cr(0)}] \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $N_{cr(0)}$ — начальная критическая нагрузка (для состояния S_1),

$N_{cr(t)}$ — текущая критическая нагрузка в момент t , рассчитываемая по (10). Это интегральный показатель, потому что он учитывает не просто потерю площади, но и влияние коррозии на жёсткость $I_{(t)}$ через рост гибкости $\lambda(t)$ и падение коэффициента φ .

В соответствии с данными работы [23], а также исходной постановкой задачи, строится не классическая матрица вероятностей переходных состояний за шаг, а нижнетреугольная матрица траекторий (накопленных вероятностей).

Элемент матрицы $p_{corr(i,j,t)}$ представляет собой вероятность того, что элемент, который в момент времени 0 был в состоянии 1, к моменту t находится в состоянии i , при условии, что он достиг состояния j в процессе деградации. Это отличается от классической Марковской модели $P(X_{(t)} = i | X_{(0)} = j)$. Нижнетреугольная структура матрицы объясняется невозможностью улучшения состояния (коррозия необратима) и последовательным характером повреждений.

Первый столбец матрицы показывает $p_{corr(i,1,t)}$ — вероятность того, что элемент, который в момент времени 0 был в состоянии 1, находится в состоянии i в момент времени t . Вероятность того, что система перемещается от коррозии i -ой стадии к коррозии j -ой стадии в течение периода времени T_k определяется как

$$p_{corr(i,j)} = \text{вероятность перейти из состояния } i \text{ в состояние } j. \quad (13)$$

Связанные с этим вероятности перехода от одной стадии коррозии к другой могут быть смоделированы. Важно отметить, что вероятность перехода от стадии 1 коррозии к любой другой стадии изменяется со временем, так как коррозионные стадии имеют различные вероятности начала. Время коррозии для $p_{corr(i,j)}(nT_k)$

$$T_{corr} = (n - 1)T_k. \quad (14)$$

Вероятности перехода от одной стадии коррозии к другой записываются в матричном виде:

$$P_{corr}(nT_k) = \begin{bmatrix} p_{corr(1,1)}(nT_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,2)}(nT_k) & p_{corr(2,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,3)}(nT_k) & p_{corr(2,3)} & p_{corr(3,3)} & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,4)}(nT_k) & p_{corr(2,4)} & p_{corr(3,4)} & p_{corr(4,4)} & 0 & 0 \\ p_{corr(1,5)}(nT_k) & p_{corr(2,5)} & p_{corr(3,5)} & p_{corr(4,5)} & p_{corr(5,5)} & 0 \\ p_{corr(1,6)}(nT_k) & p_{corr(2,6)} & p_{corr(3,6)} & p_{corr(4,6)} & p_{corr(5,6)} & p_{corr(6,6)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Важным условием модели является полнота пространства событий:

$$\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha,\beta)} = 1. \quad (16)$$

В определенный момент времени для конструктивной системы ферм с N стержневыми элементами существует $2N$ структурных состояний и 6 стадий коррозии. Следовательно,

имеется $6 \times 2N$ различных возможных состояний системы при учете воздействия коррозии. Новый вектор состояния системы определяется как

$$S_c(nT_k) = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где S_k , $k=1,2,\dots,6$, представляет вероятности определенного структурного состояния, связанного со стадией коррозии k .

$$S_k = \begin{bmatrix} P(\text{состояние}(1, k)) \\ P(\text{состояние}(2, k)) \\ P(\text{состояние}(3, k)) \\ P(\text{состояние}(4, k)) \\ \vdots \\ P(\text{состояние}(n, k)) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Пусть P_{Sk} представляет матрицу перехода для системы на стадии коррозии k

$$P_{Sk} = \begin{bmatrix} p_{k1,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1,N} & \cdots & p_{kN,N} \end{bmatrix} \quad (19)$$

где

$$P_{ki,j} = \begin{cases} p_{k(i,j)} & i \geq j \\ 0 & i < j \end{cases} \quad (20)$$

Тогда общая матрица должна иметь вид:

$$P_c(nT_k) = \begin{bmatrix} p_{c(1,1)}(nT_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,2)}(nT_k) & p_{c(2,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,3)}(nT_k) & p_{c(2,3)} & p_{c(3,3)} & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,4)}(nT_k) & p_{c(2,4)} & p_{c(3,4)} & p_{c(4,4)} & 0 & 0 \\ p_{c(1,5)}(nT_k) & p_{c(2,5)} & p_{c(3,5)} & p_{c(4,5)} & p_{c(5,5)} & 0 \\ p_{c(1,6)}(nT_k) & p_{c(2,6)} & p_{c(3,6)} & p_{c(4,6)} & p_{c(5,6)} & p_{c(6,6)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

где

$$P_{ci,j} = p_{corr(i,j)} P_{si}. \quad (22)$$

Таким образом,

$$S_c(nT_k) = (\prod_{i=1}^n P_c(i T_k)) S_c(0). \quad (23)$$

Вероятность всей системы за определенный период времени T_k равна

$$P_{sys}(nT_k) = \sum_{\substack{i=\text{функциональное} \\ \text{состояние}}} S_c(nT_k) i, \quad (24)$$

где $S_c(nT_k) i$ - i -й элемент в $S_c(nT_k)$.

Для описания распределений вероятностей $p_{corr(1,1)} - p_{corr(1,6)}$ используется асимметричная Гауссова функция с обрезкой хвоста:

$$w(t) = \begin{cases} a \exp\left(-\frac{(t-b)^2}{2c^2}\right), & t < b, \\ a \exp\left(-\frac{(t-b)^2}{2d^2}\right), & t \geq b, \\ 0, & t > t_c, \end{cases} \quad (25)$$

где a, b, c, d — параметры формы, t_c — время обрезки, определяемое по экспериментальным данным как последнее t , для которого $w(t)$ остается выше малого порога (в реализации используется критерий $y > 0,001$). Для $p_{(1,1)}$ (вероятность остаться в состоянии 1) применяется последовательная зависимость с обрезкой:

$$w_{11}(t) = \begin{cases} 1, & t < t_1, \\ \frac{L}{1 + \exp[-k(x - x_0)]}, & t_1 < t \leq t_c, \\ 0, & t > t_c, \end{cases} \quad (26)$$

где L, k, x_0 — параметры, t_1 — момент начала убывания (в реализации $t_1=20$).

Параметры оцениваются нелинейным методом наименьших квадратов. Для повышения устойчивости подгонки используется многократный запуск с вариацией начального приближения; выбирается решение с максимальным R^2 , приоритетный порог в реализации — $R^2 \geq 0.99$, данный коэффициент вычисляется по классической формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_n (y_n - \widehat{y}_n)^2}{\sum_n (y_n - \overline{y_n})^2}. \quad (27)$$

Полная матрица $P(t)$ строится на временной сетке и дополняется недостающими переходами из состояний $S_2 \dots S_5$. В реализованной схеме соседние переходы $2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 5, 5 \rightarrow 6$ аппроксимируются той же формой (25), при этом начальные приближения параметров задаются масштабированием параметров эталона p_{12} (время и амплитуда), а «дальние» переходы $i \rightarrow j$ при $j > i + 1$ формируются преобразованием базовой соседней кривой $i \rightarrow i + 1$ с растяжением по времени и уменьшением амплитуды:

$$w_{i,j}(t) = \beta_\Delta w_{i,j+1}\left(\frac{t - \delta_\Delta}{\alpha_\Delta}\right), \quad \Delta = j - i \quad (28)$$

где в расчетной реализации $\delta_\Delta = 0$, а коэффициенты $\alpha_\Delta, \beta_\Delta$ заданы таблично по Δ (для $\Delta = 1 \dots 5$). Вводится ненулевая вероятность «остаться» в состоянии в виде экспоненциального спада $w_{i,i}(t) = \exp(-\lambda_i t)$ при $\lambda_i = 0,01(i + 1)$. Далее для каждого t_k выполняется нормировка по допустимым исходам, и переходные вероятности получаются как

$$P_{i,j}(t_k) = \frac{w_{i,j}(t_k)}{\sum_{m=i}^6 w_{i,m}(t_k)}, \quad \Delta = j \geq i. \quad (29)$$

Для каждой реализации генерируется траектория Xk до состояния S_6 ; время отказа τ определяется как первый момент достижения состояния 6. Функция надежности оценивается эмпирически:

$$R(t_k) = P\{\tau > t_k\} \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 1\{\tau_n > t_k\}, \quad F(t_k) = 1 - R(t_k), \quad (30)$$

где N — число реализаций. Дополнительно рассчитываются времена первого достижения состояний (first-passage time) и показатель накопления повреждений в виде математического ожидания номера состояния

$$E[X(t_k)] = \sum_{j=1}^6 j \hat{P}_j(t_k), \quad (31)$$

где $\hat{P}_j(t_k)$ — эмпирическая доля реализаций в состоянии j на момент t_k .

Нами разработаны программы, реализованные на языке Python с использованием библиотек numpy, pandas, scipy, scikit-learn, matplotlib. Эти программы позволяют формировать графики $F(t)$, $R(t)$, $E[X(t)]$, дают возможность интерактивного просмотра $P(t)$, строить ядро и матрицу переходов, по выборке времен отказов системы τ_{sys} строить кривую $R_{sys}(t)$ по формуле (30), собирать статистику времен переходов между состояниями, сохранять итоговый отчет. Заметим, что параметры моделирования (горизонт по времени, число реализаций Монте-Карло) задаются в коде программ и могут быть изменены для проверки сходимости статистических оценок.

На рисунке 1 представлено описание «ядра» вероятностной модели коррозии. Так как достоверно известны только данные по вероятностям переходов из 1 состояния в другие, то они и служат основой метода. Аппроксимация функций происходила с высокой степенью корреляции с исходными экспериментальными данными при $R^2 > 0,98$.

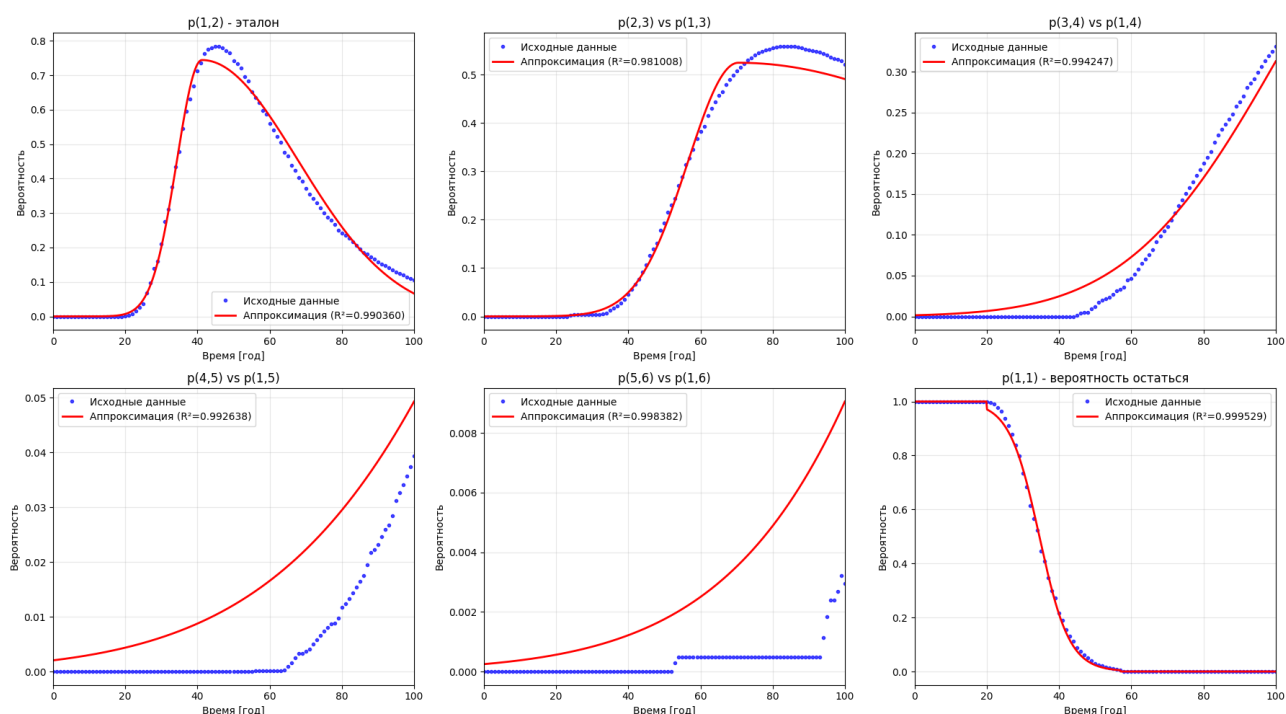


Рисунок 1 – Вывод «ядра» модели $p_{corr(1,j)}$ из $p_{corr(1,2)}$ с помощью математических преобразований, реализованное на языке Python, при $R^2 > 0,98$

На рисунке 2 представлены характерные временные срезы вероятностной матрицы переходов на 0, 25, 50, 75 годах. Так как данная матрица функциональная, она представляет вероятности переходов из соответствующего состояния в следующие с привязкой к конкретному моменту времени.

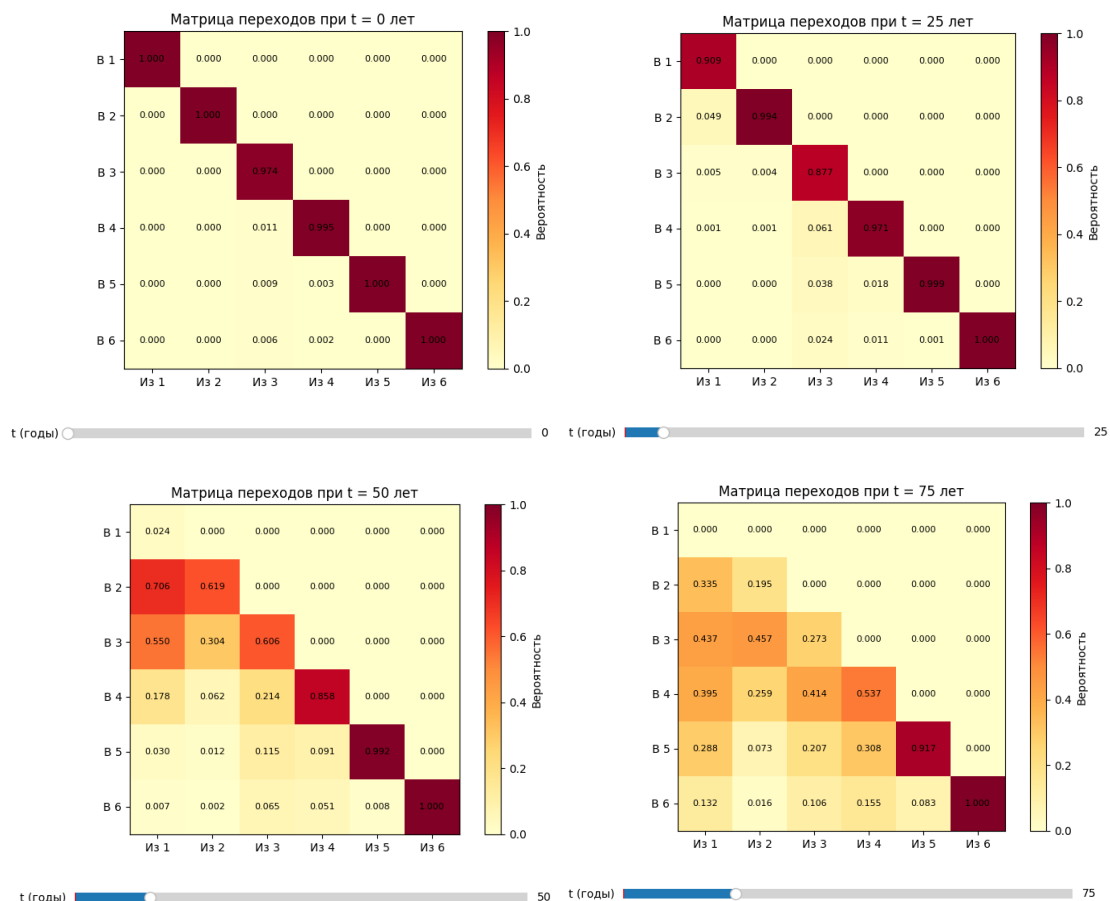


Рисунок 2 – Типовые срезы времени функциональной матрицы переходных вероятностей

На рисунке 3 представлена реализация модели накопления повреждений, реализованная для одного стержневого элемента из стали СТЗПС при интенсивной агрессивности среды. Данные получены с помощью метода Монте-Карло при 50 000 симуляций.

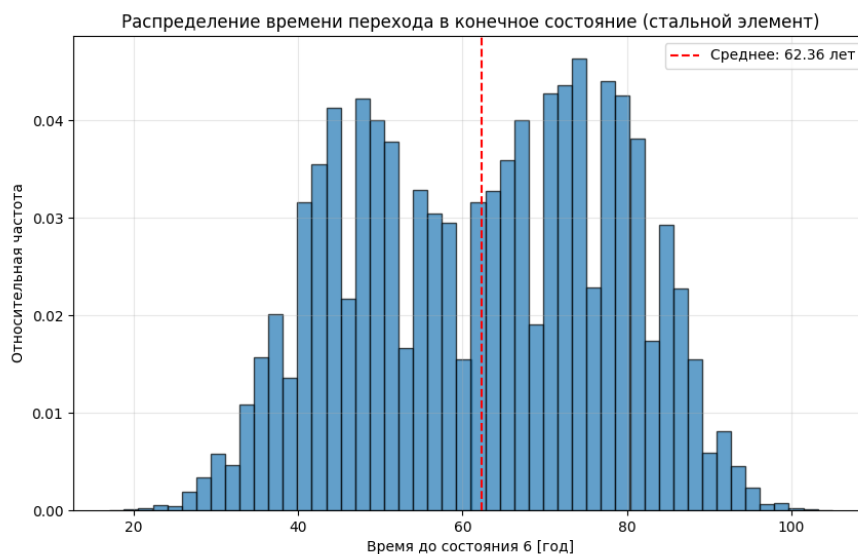


Рисунок 3 – Распределение времени отказа стального стержня с применением вероятностной модели накопления повреждений

На рисунках 4 и 5 представлены графики функции распределения времени отказа $F(t)$ и надежности $R(t)$ для единичного стального элемента, полученные с помощью метода Монте-Карло при 50 000 симуляций.

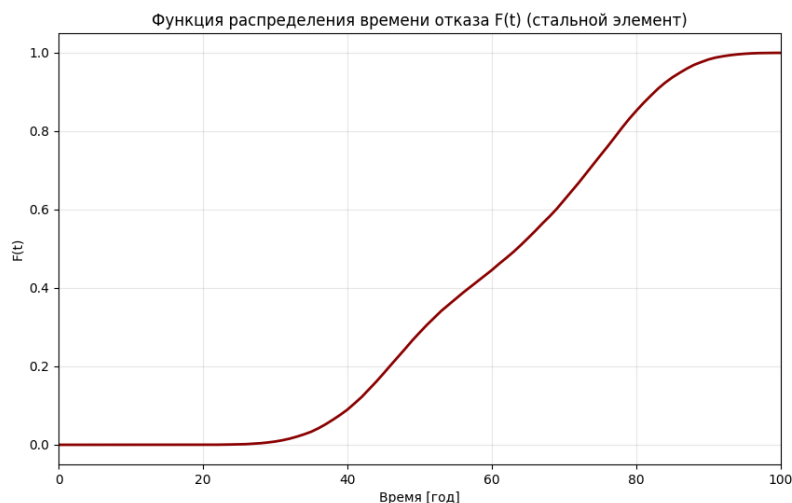


Рисунок 4 – График функции распределения времени отказа $F(t)$ для стального элемента

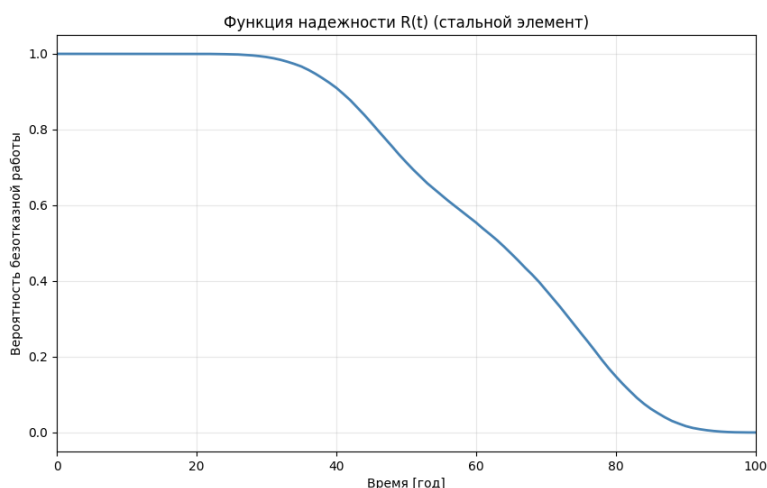


Рисунок 5 – График функции надежности $R(t)$ для стального элемента

Далее рассмотрена металлическая ферма, которая состоит из 18 элементов с разделением на критические и некритические группы. Для каждого элемента моделируется независимая деградация по одной и той же матрице $P(t)$, а отказ системы фиксируется по логическим условиям предельного состояния: отказ любой стойки или любого элемента верхнего пояса, либо отказ двух и более элементов нижнего пояса (связи рассматриваются как некритические).

На рисунке 6 представлена реализация модели надежности для 18-элементной ферменной конструкции с учетом разделения элементов по ответственности и накоплением дефектов в системе при агрессивном воздействии внешней среды.

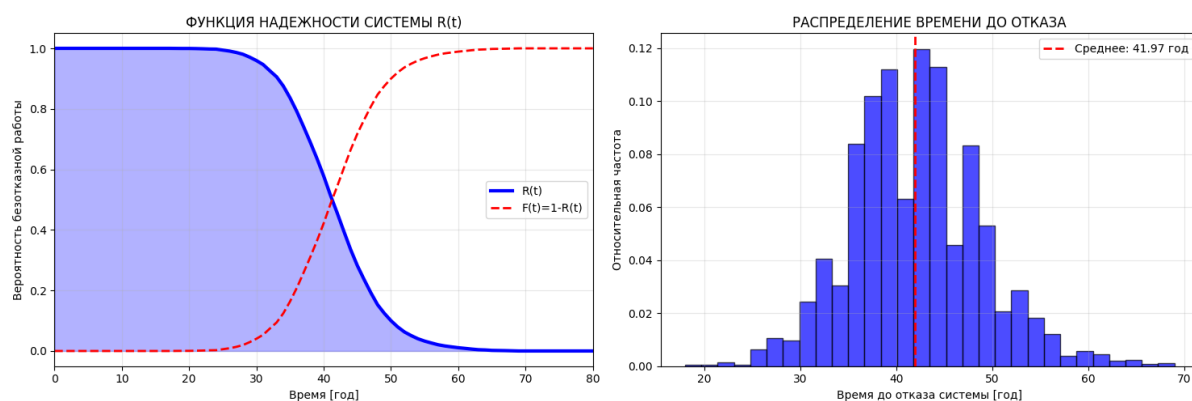


Рисунок 6 – График функции надежности и распределение времени до отказа для 18-элементной ферменной конструкции

4. Заключение

1. Сформирована и вычислительно реализована вероятностная методика оценки надежности ферменных конструкций при коррозионном износе, основанная на марковском описании деградации как последовательности необратимых переходов между шестью дискретными коррозионными состояниями $S_1 - S_6$.

2. Показано, что «ядро» вероятностной модели, заданное экспериментально наблюдаемыми зависимостями $P_{(1,j,t)}$, может быть восстановлено и аппроксимировано параметрическими функциями с высокой согласованностью с исходными данными; в расчетной реализации качество идентификации обеспечивается на уровне $R^2 > 0,98$, что позволяет использовать полученные зависимости как основу для построения полной матрицы переходов во времени.

3. Построена функциональная матрица вероятностей переходных состояний $P_{corr}(t)$, включающая недостающие переходы и обеспечивающая полноту пространства событий (нормировку по исходному состоянию). Тем самым получено согласованное вероятностное описание «накопления повреждений» на всей шкале состояний и для всех временных срезов, применимое как к отдельному стержню, так и к системе в целом.

4. На основе калиброванной матрицы $P_{corr}(t)$ методом Монте-Карло получены количественные оценки ресурса одиночного стального элемента ферменной конструкции при заданной интенсивности коррозионного воздействия. При 50 000 реализациях состояние S_6 достигалось во всех траекториях (доля достижений 1.000), среднее время до отказа составило 62,54 года, медиана — 64 года, стандартное отклонение — 16 лет, коэффициент вариации $CV = 0,2558$. Характерные времена первого достижения промежуточных состояний составили: $S_2 - 28,88$ года; $S_3 - 38,46$ года; $S_4 - 41,08$ года; $S_5 - 45,64$ года.

5. Показано, что переход от оценки элемента к оценке системы в целом принципиально меняет временной профиль надежности за счет структурной значимости стержневых элементов ферменной конструкции и заданных условий отказа. Для 18-элементной фермы (7 критических и 11 некритических элементов) при 50 000 реализациях получены: среднее время отказа 41,88 года, медиана 42 года, стандартное отклонение 6,84 года, $CV = 0,1633$. По принятому критерию отказа надежность системы на горизонте 100 лет стремится к нулю ($R_{sys}(100) = 0$), что подтверждает чувствительность ферменной системы к отказам критических элементов при интенсивном коррозионном воздействии.

6. Полученные результаты подтверждают практическую применимость предложенной схемы «эксперимент → идентификация ядра → построение $P_{corr}(t)$ → метод Монте-Карло

для элемента и системы»: методика обеспечивает расчет функций надежности $R(t)$, $F(t)$, характерных времен деградации по стадиям и статистик разброса, что может быть использовано для инженерной диагностики, обоснования сроков обследований и выбора ремонтных воздействий с учетом различной ответственности элементов фермы.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kayser J.R., Nowak A.S. Reliability of corroded steel girder bridges // *Structural Safety*. 1989. Vol. 6. No. 1. P. 53–63. DOI: 10.1016/0167-4730(89)90007-6.
2. Czarnecki A.A., Nowak A.S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges // *Structural Safety*. 2008. Vol. 30. No. 1. P. 49–64. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.05.002.
3. Gong C., Frangopol D.M. Reliability of steel girder bridges with dependent corrosion growth // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 224. Art. 111125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111125.
4. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А., Савин С.Ю. Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозировании риска аварии / *Строительство и реконструкция*. 2024. № 6 (116). С. 82-91. DOI: 10.33979/2073-2024-116-6-82-91.
5. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Методы вероятностного проектирования элементов строительных конструкций на новый уровень надежности. Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. 99 с.
6. Melchers R.E. Probabilistic Model for Marine Corrosion of Steel for Structural Reliability Assessment // *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 11. P. 1484–1493. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:11(1484).
7. Melchers R.E. New insights from probabilistic modelling of corrosion in structural reliability analysis // *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. Art. 102034. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102034.
8. Qin S., Cui W. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements // *Marine Structures*. 2003. Vol. 16. No. 1. P. 15–34. DOI: 10.1016/S0951-8339(02)00028-X.
9. Шереметьева Е.С. Вероятностные модели коррозионного износа строительных сталей // *Вестник МГСУ*. 2019.
10. de la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Chico B., Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion of mild steel // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 2. P. 604–617. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.10.007.
11. Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases // *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 6. Art. 601. DOI: 10.3390/ma10060601.
12. Landolfo R., Cascini L., Portoli F. Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report // *Sustainability*. 2010. Vol. 2. No. 7. P. 2163–2175. DOI: 10.3390/su2072163.
13. Guo S., Si R., Dai Q., You Z., Ma Y., Wang J. A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. P. 126–146. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.023.
14. Колчунов В.И. Развитие методов анализа надежности усиливаемых конструкций при техногенных воздействиях. – М.: ПААСН, 2004. – 210 с.
15. van Noortwijk J.M. A survey of the application of gamma processes in maintenance // *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94. No. 1. P. 2–21. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.019.
16. Frangopol D.M., Kallen M.-J., van Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions // *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004. Vol. 6. No. 4. P. 197–212. DOI: 10.1002/pse.180.
17. Biondini F., Frangopol D.M. Life-Cycle Performance of Deteriorating Structural Systems under Uncertainty: Review // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. No. 9. Art. F4016001. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001544.
18. Seçer M., Saylan A.A. Time-dependent advanced analysis method for steel truss bridges under atmospheric corrosion // *Advances in Bridge Engineering*. 2025. Vol. 6. No. 1. Art. 34. DOI: 10.1186/s43251-025-00181-5.
19. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic approach of state transition elements of truss structures at corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. Art. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003.

20. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43.
21. Albrecht P., Naeemi A.H. Performance of Weathering Steel in Bridges. NCHRP Report 272. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council; 1984. Available at: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_272.pdf.
22. McCuen R.H., Albrecht P. Reanalysis of thickness loss data for weathering steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004;16(3):237–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(237).
23. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011;26(2):308–320. DOI: 10.1016/j.proengmech.2010.08.009.
24. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81.

REFERENCES

1. Kayser J.R., Nowak A.S. Reliability of corroded steel girder bridges. *Structural Safety*. 1989. Vol. 6. No. 1. Pp. 53-63. DOI: 10.1016/0167-4730(89)90007-6.
2. Czarnecki A.A., Nowak A.S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges. *Structural Safety*. 2008. Vol. 30. No. 1. Pp. 49-64. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.05.002.
3. Gong C., Frangopol D.M. Reliability of steel girder bridges with dependent corrosion growth. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 224. Art. 111125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111125.
4. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh konstruktsiy zdaniy na osnove prognozirovaniya riska avarii [Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 6 (116). Pp. 82-91. DOI: 10.33979/2073-2024-116-6-82-91. (rus)
5. Solovyev S.A., Solovyeva A.A. *Metody veroyatnostnogo proektirovaniya elementov stroitel'nykh konstruktsiy na novyy uroven' nadezhnosti* [Methods of probabilistic design of structural elements for a new reliability level]. Vologda: Vologda State University, 2022. 99 p. (rus)
6. Melchers R.E. Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment. *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 11. Pp. 1484-1493. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1484).
7. Melchers R.E. New insights from probabilistic modelling of corrosion in structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. Art. 102034. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102034.
8. Qin S., Cui W. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*. 2003. Vol. 16. No. 1. Pp. 15-34. DOI: 10.1016/S0951-8339(02)00028-X.
9. Sheremetyeva E.S. Veroyatnostnye modeli korrozionnogo iznosa stroitel'nykh staley [Probabilistic models of corrosion wear of structural steels]. *Vestnik MGSU*. 2019. (rus)
10. de la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Chico B., Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 2. Pp. 604-617. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.10.007.
11. Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. An integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT databases. *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 6. Art. 601. DOI: 10.3390/ma10060601.
12. Landolfo R., Cascini L., Portioli F. Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*. 2010. Vol. 2. No. 7. Pp. 2163-2175. DOI: 10.3390/su2072163.
13. Guo S., Si R., Dai Q., You Z., Ma Y., Wang J. A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 126-146. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.023.
14. Kolchunov V.I. *Razvitie metodov analiza nadezhnosti usilivaemykh konstruktsiy pri tekhnogennykh vozdeystviyakh* [Development of methods for reliability analysis of strengthened structures under technogenic impacts]. Moscow: RAASN, 2004. 210 p. (rus)
15. van Noortwijk J.M. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94. No. 1. Pp. 2-21. DOI: 10.1016/j.res.2007.03.019.
16. Frangopol D.M., Kallen M.-J., van Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: Review and future directions. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004. Vol. 6. No. 4. Pp. 197-212. DOI: 10.1002/pse.180.
17. Biondini F., Frangopol D.M. Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: Review. *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. No. 9. Art. F4016001. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001544.

18. Seer M., Saylan A.A. Time-dependent advanced analysis method for steel truss bridges under atmospheric corrosion. *Advances in Bridge Engineering*. 2025. Vol. 6. No. 1. Art. 34. DOI: 10.1186/s43251-025-00181-5.
19. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic approach of state transition elements of truss structures at corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. Art. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003.
20. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Veroyatnostnyy analiz dinamicheskikh kharakteristik sistemy "sooruzhenie - sloistoe osnovanie" [Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the "structure-layered foundation" system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2024. No. 8 (788). Pp. 32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. (rus)
21. Albrecht P., Naeemi A.H. *Performance of Weathering Steel in Bridges*. NCHRP Report 272. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1984. Available at: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_272.pdf.
22. McCuen R.H., Albrecht P. Reanalysis of thickness loss data for weathering steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. No. 3. Pp. 237-246. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(237).
23. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 308-320. DOI: 10.1016/j.proengmech.2010.08.009.
24. SP 16.13330.2017. *Steel Structures. Updated Edition of SNiP II-23-81*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2017. (rus)

Информация об авторах:

Мацеевич Татьяна Анатольевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
д.ф.-м. н, профессор, E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Данков Савелий Андреевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Information about authors:

Matseevich Tatiana A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor Of Physical And Mathematical Sciences, Professor,
E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Dankov Saveliy A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.02.2026
Одобрена после рецензирования 09.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 18.02.2026
Approved after reviewing 09.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026

Ю.А. ИВАШЕНКО¹, С.Г. ШАБИЕВ²

¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

ИДЕОЛОГИЯ И ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. Предлагается для обсуждения идеология, на основании которой развитие архитектурной экологии может быть более успешным. Главным направлением принимается достижение эмоционально-психологического комфорта на основе знаний закономерностей, вызывающих дискомфорт. Исследуются направления, основанные на методах интеллектуального творчества, включая новые данные в науке «Познание человека»: режиссура, офтальмология, биолокация и т.д. В этих научных направлениях отмечается наличие общих целей и сходство методов создания положительного эмоционально-психологического состояния людей при архитектурной деятельности. В этом направлении рассматриваются варианты объемно-планировочных решений по проблемам снижения интенсивности жизнедеятельности людей на поверхности земли в «надземную зону» и интеграции многоуровневых пересечений с объектами городской среды, с привлечением смежных научных направлений, таких как психология и познание человека через архитектуру.

Ключевые слова: архитектурная экология, идеология, эмоционально-психологическое состояние, объемно-планировочные решения.

Yu.A. IVASHENKO¹, S.G. SHABIEV²

¹South Ural State University (NIU), Chelyabinsk, Russia

²South Ural State University (NIU), Chelyabinsk, Russia

IDEOLOGY AND DEVELOPMENT PERSPECTIVE ARCHITECTURAL ACTIVITY

Abstract. An ideology is proposed for discussion, on the basis of which the development of architectural ecology can be more successful. The main focus is on achieving emotional and psychological comfort based on knowledge of patterns that cause discomfort. The directions based on the methods of intellectual creativity are being investigated, including new data in the science of "Human Cognition": directing, ophthalmology, biolocation, etc. In these scientific areas, it is noted that there are common goals and similarity of methods for creating a positive emotional and psychological state of people in architectural activities. In this direction, options for spatial planning solutions are being considered to reduce the intensity of human activity on the earth's surface into an "aboveground zone" and integrate multilevel intersections with urban objects, involving related scientific fields such as psychology and human cognition through architecture.

Keywords: architectural ecology, ideology, emotional and psychological state, spatial planning solutions.

1. Введение

«Идеология» присутствует в любой деятельности людей, так как всегда преследуется достижение какой-либо цели. Существует мнение, что можно действовать (функционировать) не имея «идеологии». Но отсутствие идеологии тоже – идеология (закон «отрицание отрицания» – отсутствие «чего-то» приведет к появлению «другого»). Идеология определяет сознание, намерения и действия людей. Она служит оправданием их деятельности и используется чтобы избежать ответственности за последствия. Вопрос о необходимости (полезности) идеологии в архитектурной деятельности не определен, так как имеются различные идеологические установки для архитектурной деятельности с учетом экологического аспекта, например:

- прочность, польза, красота;
- гармония, красота, комфортность [1-11].

Экологический аспект состоит в том, что действия, направленные на достижение прочности, красоты, пользы, гармонии и комфортности не должны вредить природе в виде изменения естественных (природных) процессов.

Средства (инструменты) для архитектурной деятельности весомо ограничены: объемно-планировочные; цветовые; световые; символические; энергоинформационные. Несмотря на их ограниченность достигается разнообразие путем их комбинации с учетом структурных особенностей каждого из них.

При анализе средств и действий с учетом влияния фактора «время» возникают следующие вопросы:

- архитектурная деятельность развивается или нет?
- существуют ли общие закономерности (фундаментальные) ее развития?
- можно ли определить признаки развития и соответствующие критерии?
- можно ли достичь «совершенства» или это стремление является потребностью людей как духовного роста?
- при отсутствии общих закономерностей развитие архитектурной деятельности является случайным процессом, если спонтанно возникают новые идеи и решения с непредсказуемым результатом?
- может ли идеология оказать положительное влияние на развитие архитектурной деятельности и ее экологического аспекта?

2. Модели и методы

С позиции методов системного анализа [12-16] архитектурную деятельность можно представить «как выдвижение альтернативных вариантов» достижения цели с учетом случайностей (неопределенности) по каждому варианту на основе сравнения с критериями эффективности.

Установка «прочность» достигается применением научного направления – «механика твердого тела». В этом направлении имеются вполне определенные критерии эффективности и методы их достижения. Архитектурный аспект в этой установке представляется как психоэмоциональное воздействие, обусловленное зрительным эффектом о наличии массивности и устойчивости с использованием прямоугольных (призматических), треугольных (пирамидальных) и других форм.

Установка «польза» основана на представлении о том, что объекты архитектуры включая экологический аспект, не должны вредить здоровью людей и природе. Это обеспечивается развитием различных научных направлений (медицина, биология и т.д.), имеющих соответствующие методы и критерии эффективности. Эта установка двойственна по содержанию: «польза или вред» – зависит от позиции субъекта, делающего такую оценку.

Установка «красота» не имеет критериев эффективности (в литературе не обнаружены). Красота есть первостепенный признак объектов и явлений, обладающих эстетической ценностью [17].

Сущность красоты сводится к этике, которая тоже требует объяснения. Этика представляется счастьем как высшим критерием всякой добродетели и основой моральных поступков [18]. Экологический аспект этики сформирован в связи с обеспокоенностью

негативными последствиями воздействия человечества на среду обитания и возможность поступательного (эволюционного) движения человеческой цивилизации. Этика считается научным направлением, объектом изучения которой является «мораль». Возникает вопрос о происхождении и сущности «морали».

Существует мнение, что мораль формируется в процессе социальной практики, исторического аспекта, а также субъективным отношением [19, 20]. «Красота вообще и экологическая красота», воспринимаемая органами зрения субъектом или группой людей, не может иметь фундаментальных общих признаков. В связи с этим ее достижение весьма затруднительно. Можно предположить, что общим признаком является «копирование природы». Этот признак может быть полезен при разработке методов достижения красоты в архитектурной экологии.

Установка «гармония» претендует на универсальность и существование космических (всеобъемлющих) закономерностей.

Архитектурная деятельность в космическом аспекте представляется в виде желания людей создавать объекты, имеющие материальное и ментальное содержание. Появляется «термин» экологическая гармония двойственна [21-23]. Можно полагать, что в него вкладывается экологический аспект, основанный на утверждении, что природу нельзя критиковать (подвергать сомнению), так как она (природа) гармонична «сама по себе». В существующих расшифровках понятия «гармония» имеются различия и общие представления. Например, в утверждении теоретика зодчества Леон-Батиста Альберти: «упорядочение частей, различных по своей природе, неким совершенным соотношением так, чтобы они одна другой со-ответствовали, создавая красоту». Гармония в большой советской энциклопедии – «соразмерность частей, слияние различных компонентов объекта в единое органическое целое». В первом утверждении акцент ставится на «красоту», во втором – на «целое». Если «гармонию» рассматривать как «установку к действию», то возникает неопределенность и субъективный фактор становится превалирующим: действие отдельного человека или группы людей и созданные ими объекты могут быть представлены как гармоничными, несмотря на различие в акцентах «красота» или «целое».

Имеется также такое толкование термина: универсальное свойство существования (бытия) объектов «мира», обеспечивающее эволюционное развитие. Такая расшифровка является более универсальной. В ней уменьшается роль субъективности и проявляются определенные закономерности универсальные по своей природе (все обладает свойствами и эволюционирует). Имеется в литературе набор многочисленных признаков и принципов гармонии, что затрудняет понимание ее «сущности» в виде основной наиболее существенной закономерности. Такая закономерность необходима для концентрации сознания и создания методов достижения основной цели – «гармонизации всего сущего».

Установка «комфорт» основана на представлении о том, что это есть совокупность положительных психофизиологических ощущений человека в процессе его контракта с окружающей средой [24]. Установка «комфорт» как идеологема привлекательна для создания идеологии, так как в направлении физиологии установлены факторы и разработаны методы. В направлении психологии пока существует неопределенность.

В древней философии модель архитектурной деятельности основана на «тройственности» и представлялась элементами: 1 – первоидея; 2 – пероматерия; 3 – первоэнергия. В настоящее время можно модель «тройственности» составить из следующих элементов: ментальность – материальность – системность. Противоречие существует, так как сущность элементов сохраняется и выделяются определенные акценты.

Основой являются исследования влияния окружающей среды (в широком понимании – природа, социум, культура, экономика, объекты архитектуры и т.д.) на психоэмоциональное состояние людей. Психологические исследования показали, что наибольший дискомфорт вызывают у большинства людей факторы монотонности, незащищенности и не системности, при этом психоэмоциональный фактор является преимущественным в сравнении с физиологическим.

Эти факторы приводят к появлению стрессовых явлений: депрессия, страх, агрессия.

Монотонность в архитектуре проявляется в виде однообразного повторения геометрических форм, однообразий колоритности и однонаправленного энергоинформационного обмена.

Незащищенность выражается в появлении чувств неопределенности и страха. В архитектуре это с появлением сложных геометрических форм, затрудняющих восприятие прочности, устойчивости, а также практическим опытом (наблюдением) повреждений и аварий архитектурных объектов. Экологический аспект состоит в том, что надежда на изменение или поддержание природы становится частичной вследствие отсутствия намерений (планов) и средств. Несистемность в архитектурной деятельности (с учетом экологического аспекта) проявляется в связи с тем, что попытки решить экологические задачи осуществляются в частных случаях и в отдельных зонах. Системный подход отсутствует. При анализе архитектурной деятельности появляется представление что она осуществляется в рамках пространственно-временного континуума. Экологический аспект в этом факторе состоит в том, что повторение негативных воздействий одного вида исключает надежду на перспективу исчезновения этих воздействий. Надежда состоит в том, что в системе всегда заложен механизм самовосстановления, основанных на существовании резервов энергии и информационного обмена. Отсутствие системы или ее частичное повреждение на «качественном» уровне блокирует процесс самовосстановления. Согласно теоремы австрийского ученого Курта Геделя, ни одна системы не может быть познана «изнутри». В основе находится представление о развитии человечества по спиральному времени, что является отличительной чертой пространства, в котором человечество существует. Применительно к архитектурной деятельности спиральность развития состоит (проявляется) в скачкообразном (дискретном) появлении разных стилей в зодчестве с повторением предшествующих элементов. «Архитектурная гармония» в системном представлении имеет двойственный (биполярный) смысл:

- в узком – совокупность архитектурных средств для решения эстетико-технических задач;

- в широком – совокупность архитектурных средств для применения в условиях неопределенности (случайности), которая существует в результате наличия факторов (красота, прекрасное и т.д.) не дающихся строгой количественной оценке.

В условиях неопределенности (случайности) единственным методом является выдвижение и рассмотрение альтернативных вариантов: создание архитектурных объектов по образу и подобию природы; противопоставление архитектурного объекта как искусственного природным объектам, без причинения вреда природе.

По степени сложности архитектурные экологические модели следует считать очень сложными. По типу связей взаимодействия между элементами (объект – человек – природа) преимущества следует рассматривать вероятностные (случайные). По характеру процессов в виде архитектурного творчества на динамические и статические [25, 26].

В связи с формулировкой идеологии возникает вопрос – существует ли в архитектурной деятельности «системность». Системность предполагает закономерность [27].

В архитектурной деятельности (включая аспект экология) имеются три составляющих: инженерная, художественно-эстетическая и этическая. Первая предполагает наличие закономерностей, две вторые – характеризуются случайностью, как внезапно возникающими идеями. Можно предполагать, что в художественно-эстетическом и этическом направления закономерности существуют в виде тех, которые обнаружены в теориях вероятности и корреляции. Ответ на этот вопрос будет получен в результате дальнейших исследований с учетом системного анализа стохастических моделей.

Предлагается следующая формулировка для идеологии архитектурной экологии: «разнообразие – копирование природы – системность». В этой идеологии заложены методы «достижения физиологического и эмоционально-психологического комфорта без ущерба для природы». Разнообразие предполагает случайность, системность – определенную закономерность, а копирование природы – метод устранения противоречивости (биполярности) между случайностью и закономерностью. Разнообразие также предполагает

свободу творчества (технического и художественного), а также преодоления технических и художественных противоречий.

Системность также предполагает [28] устойчивое развитие (эволюцию) дающее ощущение защищенности. При стохастическом (случайном) отключении в эволюции системы приводят к укреплению «иммунитета» системы и усилению процесса ее самовосстановления. Применительно к архитектурной деятельности создается уверенность, что качество, художественно-эстетические, экологические и технические показатели архитектурных объектов будут повышаться. Копирование природы в идеологической формуле необходимо рассматривать как основной метод, обеспечение достижения разнообразия и системности. Копирование также предполагает применение закономерностей «сакральной геометрии», отражающей энергоинформационную сущность природы.

В психологии установлены три основных эмоционально-психических состояний людей:

- отсутствие стресса и чувство защищенности;
- некоторая напряженность и чувство неполной защищенности;
- поиск комфортных условий путем решительных действий.

Предполагаемая идеологема, возможно, более приближена к обеспечению «отсутствия стресса и чувства защищенности»: разнообразие не ограничивает творчество (удовлетворение от «новизны»), а защищенность выражается в определенности (предсказуемости), заложенной в системном анализе.

3. Результаты исследования и их анализ

В результате проведенных научных изысканий установлены новые направления в эволюционно-психическом аспекте архитектурной экологии. При поиске новых направлений использовался известный метод «аналогий», когда по целям и задачам исследования используются исследования различных научных направлений. При более глубоком анализе находятся общие положения и закономерности.

Первое направление – использование средств режиссуры в архитектурной экологии. Общим признаком является стремление создать психическое воздействие в виде проявления эволюций и воображения. В теории режиссуры [29] для передачи идеи используются следующие аспекты: исторический, пространственно-временной, ступенчатость концентраций, аналогий и параллелей, а также дедуктивность. Новым для архитектуры может быть метод «движения к конфликту». В этом случае объекты архитектуры (их детали) располагаются и комбинируются, достигая кульминации. При этом используются пять частных композиционных структур: экспозиция; завязка; развитие; кульминация; развязка.

Второе направление – применение «результатов исследований по теории познания человека [30, 31]. В этом направлении утверждается наличие «здорового организма» в виде комбинации цифр, букв и геометрических фигур. Архитектура и ее экологический аспект обладает такими средствами: форма, соотношение элементов и деталей форм, символы. Установлено, что определенное сочетание цифр, букв и геометрических форм влияет на физическое и психологическое состояние людей. В связи с этим изучение и исследование таких воздействий, и применение их для решения задач архитектурной экологии представляется актуальным и перспективным. Конкретное применение, например, может использоваться для передачи информации в виде «символов».

Третье направление – использование результатов офтальмологических исследований в архитектурной экологии.

В книгах [32, 33] приведены результаты по новому направлению «офтальмо-геометрия». Установлено, что глаза человека имеют 22 геометрических параметра, которые соответствуют определенным физическим и психическим состояниям и ощущениям. Данные основаны на анализе 1500 индивидуумов. В основе анализа – четырехугольники, получаемые из треугольников с параметрами: углы и размеры сторон. Установлена связь параметров с эмоционально-психическим состоянием человека и его внутренним миром (установка на образ жизни), а именно, значения параметров характеризуют понятия «воля, доброта, зло».

Единство и общность офтальмо-геометрии и архитектурной экологии состоит в том, что используются геометрические формы для достижения определенного эмоционально-психического состояния с направленностью положительного воздействия. В связи с этим исследованиями возникает ряд вопросов:

- почему существует зависимость вида и объемно-планировочного решения «архитектурного объекта, включая «сакральные», от национальности людей и этнических групп?

- каковы особенности психического воздействия архитектурных объектов в зависимости от этноса?

- принимая передачу энергии и информации посредством «психической энергии» [34] можно ли одновременно положительно воздействовать на людей и природу?

Отмеченные направления в целях архитектурной экологии теоретически и практически не изучены. В данной статье высказаны идеи. Идеологом – отсутствие стресса, системность и защищенность как определенность (общая установка – «добро») соответствует по сущности этим идеям.

Авторами исследовано снижение воздействия архитектурных объектов на поверхность «земли».

Традиционные объемно-планировочные решения архитектурных объектов создаются на основе следующих принципов:

- площадь застройки на отметке 0.00; это обеспечивает устойчивость с учетом действия ветровых и сейсмических нагрузок; при этом для зданий повышенной этажности приоритет имеют объекты с постепенным уменьшением площади этажа с увеличением их числа;

- планировка помещений принимается прямоугольной с плоскими потолками; прямоугольная планировка обеспечивает «компактность» помещений, а плоский потолок (перекрытие) обеспечивает минимизацию объемов; это обусловлено упрощением несущих конструкций и снижением затрат на отопление.

Недостатки, связанные с применением этих принципов, известны:

- большие объемы земляных работ, связанные с возведением фундаментов и нарушение водно-теплового режима грунта в зоне архитектурного объекта и миграции подземных вод, что отрицательно воздействует на растительность;

- повышение температуры воздуха при тесном комбинировании зданий и затруднение вентиляции;

- «транспортные развязки» занимают значительные территории, а с увеличением интенсивности движения и существенного уменьшения растительности возникают проблемы вентиляции пространств.

Человечество в своем развитии в основном использовало подземное и надземное пространства для обитания и производственной деятельности. По мнению некоторых исследователей интенсификация их деятельности привела к экологической проблеме. Практически неосвоенными пространствами являются подводное и надземное («воздушная архитектура»).

Рациональным архитектурным решением представляется объемно-планировочная компоновка на основе принципов, противоположных традиционным (рис. 1):

- площади застройки на отметках больше 0.00 увеличиваются с увеличением числа этажей;

- планировка помещений осуществляется геометрическими формами, в которых используются углы более 90° (наиболее рациональны 120°, так как при этом достигается «компактность»).

- в качестве объемов принимаются пирамидальные с фундаментами, занимающими минимальную площадь с незначительным повреждением поверхности земли (свайное основание).

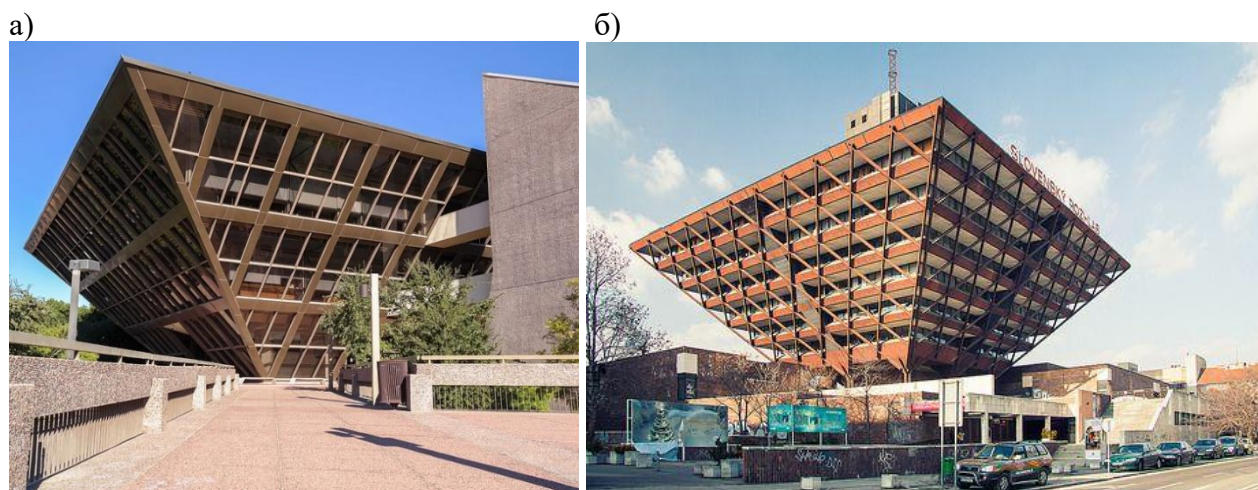


Рисунок 1 - Примеры развития территорий с уменьшением повреждения поверхности «земли» по типу «перевернутая пирамида» с эксплуатируемой кровлей: а – муниципальное здание Темпе г. Темпе, штат Аризона, США; б – здание словацкого радио г. Братислава, Словакия

Устойчивость этих объемов может обеспечиваться их блокировкой в группы по 3, 4 и более штук с созданием конструкций связей, определяемых расчетом. Предполагаемое объемно-планировочное решение устраняет вредные последствия традиционных решений [35, 36]. Для экологии среды обитания, а также является привлекательным с позиции психоэмоционального воздействия архитектурных объектов за счет неиспользования прямоугольных форм. При этом применение методов колоритности усиливает психоэмоциональный эффект.

Можно ввести показатель интенсивности использования архитектурного пространства (показатель жизнедеятельности):

$$П_{ж/э} = \frac{N \cdot Э}{V}$$

где N – количество людей; $Э$ – потребляемая энергия; V – объем (пространство), в котором осуществляется деятельность людей. Этот показатель учитывает все элементы поселения (здания, сооружения, транспорт, производство и т.д.).

В традиционных объемно-планировочных решениях наибольшее значение этот показатель имеет на поверхности земли, что и определяет сущность антропогенного воздействия. В предполагаемой в статье решении он отодвигается от поверхности земли и увеличивается с увеличением высотности архитектурных объектов («воздушная» архитектура), что уменьшает воздействие на землю без снижения жизнедеятельности. Элементы этого принципа уже применяются: многоуровневые пересечения путепроводов, мосты, элементы инфраструктуры и даже использование космического пространства. В идеале поверхность земли становится особой зоной, предназначенной для создания положительного состояния людей.

Эффективным архитектурным решением представляется рациональное использование городского пространства с совмещением многоуровневых пересечений транспортных развязок со зданиями различного назначения.

Повышение интенсивности движения транспорта привело к необходимости использования многоуровневых пересечений и появлению новых негативных явлений: большие территории со значительными повреждениями «земли», загрязнение воздуха при многоэтажной плотной застройке, увеличение длины пешеходных переходов.

Кроме отмеченных недостатков имеются другие: появление «мертвых зон», грубое использование и принятие формы вызывает эмоционально-психологическое и художественно-эстетическое отторжение; теряется масштабность пространства, исчезает взаимосвязь «человек – природа – архитектурный объект», снижается доступность и

видимость архитектурных композиций, а также теряется гуманитарный и иконографический смысл архитектуры (рис. 2) [37].



Рисунок 2 - Пример развития территории современного города или реконструкции существующих пересечений с применением совмещения многоуровневых пересечений городских магистралей со зданиями различного назначения. Проект

Суть совмещения состоит в том, что для транспортной «развязки» (пересечений) используются конструкции и объемно-планировочные пространства здания повышенной этажности в пределах 1-3 этажа. Здание может иметь многофункциональное назначение: нижние этажи – административные и торгово-развлекательные, верхние – жилые. Повышенная этажность позволяет создать аэродинамический эффект для вентиляции окружающего пространства, включая внутренние помещения, за счет создания «трубы» в центре плана здания. Для усиления изоляции транспортной «развязки» (1-3 этажа) от вышележащих этажей используется горизонтальный «защитающий экран», перекрытие с растительностью определенного вида [38-40].

При таком объемно-планировочном решении сокращается длина пешеходных маршрутов за счет комбинации пространств с различными функциональными назначениями.

При применении этого направления могут быть решены ряд негативных последствий, отмеченных выше, главным из которых является негативное эмоционально-психическое воздействие.

4. Заключение

1. Отсутствует единое мнение о существовании экологической проблемы. Сохранение цивилизации происходит под влиянием пока неизвестных факторов. Необходима концентрация средств человеческого сообщества для выявления этих факторов.

2. Влияние архитектурных объектов на психику и эмоциональное состояние человека оценивается интуитивно с ориентацией на исторические примеры с учетом особенностей для разных этносов.

3. Идеология архитектурной экологии требует большего внимания, так как может оказать глобальное влияние на эволюционный процесс жизнедеятельности человека в этом направлении.

4. Привлечение смежных научных направлений с проведением междисциплинарных исследований, включая направление «Познание человека», создает новые перспективные возможности для разработки «методов влияния».

5. В решении задач архитектурной экологии традиционные объемно-планировочные решения устарели. Перспектива развития архитектурной деятельности за инновационными идеями для создания положительного эмоционально-психического состояния с аспектом художественно-эстетического содержания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тетиор, А.Н. Экологическая гармония, красота и комфортность города. – М.: МГУП, 2010. – 312 с.
2. Гутнов, А.Э. Мир архитектуры (лицо города) / А.Э. Гутнов, В.П. Глазычев // М.: «Молодая гвардия», 1990. – 352 с.
3. Тетиор, А.Н. Экологическая инфраструктура. – М.: МГУП, 2003. – 421 с.
4. Тетиор, А.Н. Красота в природе и в обществе. – М.: Природа, 2005. – 312 с.
5. Филин, В.А. Видеоэкология. – М.: «Видеоэкология», 1994. – 50 с.
6. Курбатов, Ю.И. Архитектурные формы и природный ландшафт. – Л.: ЛГУ, 1988. – 138 с.
7. Столович, Л.Н. Красота, добро, истина. – М.: Республика, 1994. – 464 с.
8. Стресс в большом городе. Что влияет на психологический дискомфорт жителей мегаполиса // Ведомости. 2021. 14 дек. URL: <https://www.vedomosti.ru/gorod/townspeople/articles/stress-v-bolshom-gorode-chto-vliyaet-na-psihologicheskii-diskomfort-zhitelei-megapolisa> (дата обращения: 28.01.2025).
9. Горошко Ю. Д. и др. Критерии оценивания визуального шума в городской среде // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2022. №. 7 (71). С. 41-47.
10. Эллард К. Среда обитания: Как архитектура влияет на наше поведение и самочувствие. Пер. с англ. 3-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2022. 288 с.
11. Артемова Е.А. Когнитивно-поведенческая урбанистика: критерии и принципы формирования адаптивной городской среды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 27-37.
12. Системный анализ и основы биосферного мышления / Молодежный центр интеллектуального развития, ред. Р. П. Чапцов // Издательство ТОО «Версия» Челябинск, 1994. – 141 с. ISBN 5-87229-004-7
13. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко // М.: Сов. радио, 1973. – 439 с.
14. Тапалчинова Д.Н. Влияние архитектуры зданий на психологическое состояние человека // Молодой ученый 2019. № 23 (261). С. 67-68. URL: <https://moluch.ru/archive/261/60383/> (дата обращения: 20.01.2025).
15. Шулер Р.М. Психологические аспекты архитектурного проектирования // Теоретический и практический потенциал современной науки. 2021. Т. Ч. X. С. 5-7. URL: <https://www.ehbraiy.ru/item.asp?id=47133464> (дата обращения: 10.01.2025).
16. Ткачева А.С. Психологическое воздействие архитектуры и архитектурной среды на человека // Образование. Наука. Производство. 2021. С. 333-337. URL: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?id=47278828> (дата обращения: 15.01.2025).
17. Smejkal K. Architectural psychology - a challenge for a new generation of architects // Architecture. Construction. Education. 2019. № 1 (13). Р. 32-38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38486758> (дата обращения: 26.01.2025).
18. Словарь по этике / Под ред. И. С. Кона. – М.: Политиздат, 1981. – 430 с.
19. Толстых, В. И. Искусство и мораль (о социальной сущности и функции искусства). М.: Политиздат, 1973. – 439 с.
20. Abel A. What is Architectural Psychology // Dimensions of Architectural Knowledge. 2021. Р. 201-208.
21. Виноградова Е.И., Килимник Е.В. Анализ архитектурно-психологических исследований конца XX - начала XXI века // Артикульт. 2020. № 3 (39). С. 137-148. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44134527> (дата обращения: 10.01.2025).
22. Рыжанова Д.А. Психология восприятия элементов архитектуры и дизайна // Строительство и реконструкция : сборник научных трудов 3-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. 2021. С. 371-374. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46282465> (дата обращения: 21.01.2025).
23. Бадалова, С.Л. Психология пространства: влияние окружающей среды на поведение человека. Москва: Наука, 2019;
24. Гирке, К. Архитектурная психология: влияние дизайна на человека. Санкт-Петербург: Лань, 2021;
25. Нагорнов, В. С. Основы технического творчества: Учеб. пособие / В. С. Нагорнов, В. Г. Дукмасов, Б. В. Баричко // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 50 с. ISBN 5-696-01853-X.
26. Белозерцев, В. И. Проблемы технического творчества как вида духовного производства. Ульяновск: Приволж. книж. изд-во, 1970. – 350 с.
27. Гольдштейн, М. Психология и архитектура: создание комфортной среды для человека. Москва: Издательский дом, 2020
28. Венгерова М.Э. Психологический аспект систематизации стилей архитектуры и средового дизайна // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. № 1(62). С. 150-162. URL: https://marhi.ru/AMIT/2023/1kvart23/PDF/09_vengerova.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-150-162
29. Юткевич, С.И. Поэтика режиссуры: театр и кино. М.: Искусство, 1986. – 465 с.
30. Пучко, Л. Г. Многомерная медицина. Система самодиагностики и самоисцеления человека. М.: Изд. АНС, АСТ-Астрель, 2010. – 431 с. ISBN 978-5-17-092337-3.
31. Выготский Л. С. Психология искусства. - М.: АСТ, 2023. - 478 с.
32. Мулдашев, Э.Р. От кого мы произошли? М.: ООО «АиФ – Принт», «ОЛМД – Пресс», 2002. – 448 с.
33. Мулдашев, Э.Р. В поисках Города Богов: Том 1: Трагическое послание древних. М.: ООО «АиФ – Принт», «ОЛМД – Пресс», 2002. – 544 с. ISBN: 5-7654-3535-1.

34. Айванков, О.М. Центры и тонкие тела. М.: изд. «просвета», 2015. – 132 с. ISBN 978-5-41-301361-8.
35. Венгерова М.Э. Фирменный стиль в архитектуре: философия и материалы // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ.Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. С. 53-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37383033> (дата обращения 18.01.2025).
36. Здание словацкого радио города Братислава, Словакия. <https://www.flickr.com/photos/cs/27508288> (дата обращения 18.01.2025).
37. Future City Traffic , Wang Jie <https://www.artstation.com/404> (дата обращения 18.01.2025).
38. Малая, Е.В. Архитектурные особенности экологического комфорта промышленных городов России / Е. В. Малая, К. Е. Вавулин // Architecture and Modern Information Technologies, 2022. – №1(58). – С. 241-257. DOI : 10.24412/1 998-4839-2022-1-241-257.
39. Неаполитанский, С. М. Сакральная геометрия: ключ к пониманию Вселенной и человека / С. М. Неаполитанский, С.А. Матвеев // СПб.: Ин-т метафизики, 2004. – 630 с. ISBN 5-87383-008-8:200.
40. Пучко, Л. Г. Радиэстетическое познание человека. Система самодиагностики, самоисцеления и самопознания человека. Издательство: АСТ, 2022. – 544 с. ISBN: 978-5-17-149440-7.

REFERENCES

1. Tetior, A.N. Ecological harmony, beauty and comfort of the city. Moscow: MGUP, 2010. 312 p.
2. Gutnov, A.E. The world of architecture (the face of the city) / A.E. Gutnov, V.P. Glazychev // Moscow: Molodaya gvaridiya, 1990. 352 p.
3. Tetior, A.N. Ecological infrastructure. Moscow: MGUP, 2003. 421 p.
4. Tetior, A.N. Beauty in nature and in society. Moscow: Nature, 2005. 312 p.
5. Filin, V.A. Videoecology, Moscow: Videoecology, 1994, 50 p.
6. Kurbatov, Yu.I. Architectural forms and natural landscape. – L.: LSU, 1988. – 138 p.
7. Stolovich, L.N. Beauty, goodness, truth. – M.: Republic, 1994. – 464 p.
8. Stress in the big city. What influences the psychological discomfort of the inhabitants of the metropolis // Vedomosti. 2021. December 14 URL: <https://www.vedomosti.ru/gorod/townpeople/articles/stress-v-bolshom-gorode-cto-vliyaet-na-psihologicheskii-diskomfort-zhitelei-megapolisa> (date of reference: 28.01.2025).
9. Goroshko Yu. D. et al. Criteria for assessing visual noise in an urban environment // Skif. Questions of student science. 2022. No. 7 (71). pp. 41-47.
10. Ellard K. Habitat: How architecture affects our behavior and well-being. Translated from English. 3rd ed. Moscow: Alpina Publisher, 2022. 288 p.
11. Artemova E.A. Cognitive-behavioral urban studies: criteria and principles of adaptive urban environment formation // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2023. Vol. 25. No. 4. pp. 27-37.
12. System analysis and fundamentals of biospheric thinking / Youth Center for Intellectual Development, ed. by R. P. Chaptsov // Versia LLP Publishing House Chelyabinsk, 1994. 141 p. ISBN 5-87229-004-7
13. Buslenko, N. P. Lectures on the theory of complex / N. P. Buslenko, V. V. Kalashnikov, I. N. Kovalenko // Moscow: Soviet Radio, 1973. – 439 p.
14. Tapalchinova D.N. The influence of building architecture on the psychological state of a person // Young scientist 2019. № 23 (261). pp. 67-68. URL: <https://moluch.ru/archive/261/60383/> (accessed: 01/20/2025).
15. Shuler R.M. Psychological aspects of architectural design // Theoretical and practical potential of modern science. 2021. Vol. X. P. 5-7. URL: <https://www.ehbraiy.ru/item.asp?id=47133464> (date of request: 10.01.2025).
16. Tkacheva A.S. The psychological impact of architecture and the architectural environment on a person // Education. Science. Production. 2021. pp. 333-337. URL: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?id=47278828> (accessed: 01/15/2025).
17. Smejkal K. Architectural psychology - a challenge for a new generation of architects // Architecture. Construction. Education. 2019. No. 1 (13). P. 32-38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38486758> (accessed: 01/26/2025).
18. Dictionary of Ethics / Edited by I. S. Kon. – M.: Politizdat, 1981. – 430 p.
19. Tolstykh, V. I. Art and morality (on the social essence and function of art). Moscow: Politizdat, 1973. 439 p.
20. Abel A. What is Architectural Psychology // Dimensions of Architectural Knowledge. 2021. P. 201-208.
21. Vinogradova E.I., Kilimnik E.V. Analysis of architectural and psychological research at the end of the XX - beginning of the XXI century. 2020. No. 3 (39). pp. 137-148. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44134527> (date of request: 10.01.2025).
22. Ryzhanova D.A. Psychology of perception of elements of architecture and design // Construction and reconstruction : collection of scientific papers of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, graduate students, masters and bachelors. 2021. pp. 371-374. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46282465> (date of reference: 01/21/2025).
23. Badalova, S.L. Psychology of space: the influence of the environment on human behavior. Moscow: Nauka, 2019;
24. Girke, K. Architectural psychology: the influence of design on a person. Saint Petersburg: Lan, 2021;
25. Nagornov, V. S. Fundamentals of technical creativity: Textbook / V. S. Nagornov, V. G. Dukmasov, B. V. Barichko // Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2000. – 50 p. ISBN 5-696-01853-X.

26. Belozertsev, V. I. Problems of technical creativity as a type of spiritual production. Ulyanovsk: Privolzh. books. publishing house, 1970. 350 p.
27. Goldstein, M. Psychology and architecture: creating a comfortable environment for humans. Moscow: Publishing House, 2020
28. Vengerova M.E. The psychological aspect of the systematization of styles of architecture and environmental design // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. No. 1(62). pp. 150-162. URL: https://marhi.ru/AMIT/2023/1kvart23/PDF/09_vengerova.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-150-162
29. Yutkevich, S.I. Poetics of directing: theater and cinema. Moscow: Iskusstvo, 1986. – 465 p.
30. Puchko, L. G. Multidimensional medicine. The system of self-diagnosis and human self-healing. Moscow: ANS Publishing House, AST-Astrel, 2010. 431 p. ISBN 978-5-17-092337-3.
31. Vygotsky L. S. Psychology of art. Moscow: AST, 2023. 478 p.
32. Muldashev, E.R. From whom did we come? Moscow: AiF – Print LLC, OLMD – Press, 2002. 448 p.
33. Muldashev, E.R. In search of the City of the Gods: Volume 1: The Tragic Message of the Ancients. Moscow: AiF – Print LLC, OLMD – Press, 2002. 544 p. ISBN: 5-7654-3535-1.
34. Aivankov, O.M. Centers and subtle bodies. Moscow: ed. Prosveta, 2015. 132 p. ISBN 978-5-41-301361-8.
35. Vengerova M.E. Corporate identity in architecture: philosophy and materials // New ideas of the new century: proceedings of the International scientific conference of the Faculty of Fine Arts of TOGU. Khabarovsk: Pacific State University, 2019. pp. 53-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37383033> (accessed 18.01.2025).
36. The building of the Slovak Radio in Bratislava, Slovakia. [https://www.flickr.com/photos/cs ____ /27508288](https://www.flickr.com/photos/cs____/27508288) (accessed 18.01.2025).
37. Future City Traffic , Wang Jie <https://www.artstation.com/404> (accessed 18.01.2025).
38. Malaya, E.V. Architectural features of the ecological comfort of industrial cities in Russia / E. V. Malaya, K. E. Vavulin // Architecture and Modern Information Technologies, 2022. – №1(58). – Pp. 241-257. DOI : 10.24412/1998-4839-2022-1-241-257.
39. Neapolitansky, S. M. Sacred geometry: the key to understanding the Universe and man / S. M. Neapolitansky, S.A. Matveev // St. Petersburg: Institute of Metaphysics, 2004. – 630 p. ISBN 5-87383-008-8:200.
40. Puchko, L. G. Radiesthetic cognition of man. A system of self-diagnosis, self-healing and self-knowledge of a person. Publishing house: AST, 2022. – 544 p. ISBN: 978-5-17-149440-7.

Информация об авторах:

Ивашенко Юлий Алексеевич

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия,
E-mail: ivashenkoia@susu.ru

Шабиев Салават Галиевич

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия,
доктор архитектуры, профессор, зав. кафедрой «Архитектура»
E-mail: shabievsg@susu.ru

Information about authors:

Ivashenko Yuliy Al.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture
E-mail: ivashenko-ia@susu.ru

Shabiev Salavat G.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia,
Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Architecture
E-mail: sha-bievsg@susu.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2025
Одобрена после рецензирования 23.01.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 30.09.2025
Approved after reviewing 23.01.2026
Accepted for publication 01.04.2026

В.Т. ЕРОФЕЕВ¹, Е.С. ДЕРГУНОВА², М.А. ГОНЧАРОВА², В.В. ДЕРГУНОВА²

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

²ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

ДЕФОРМАЦИИ УСАДКИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УРЕАЗНЫМИ БИОДОБАВКАМИ

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния уреазных биодобавок на трещиностойкость и деформацию усадки бетонов. Образцы изготавливались путем модифицирования уреазы микроорганизмами *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, продуцирующих фермент уреазу. Оценены свойства бетонных смесей по таким показателям как удобоукладываемость и подвижность. Изучена поверхность среза образцов модифицированного бетона, исследовалось поровое пространство с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов, идентифицировано образование новой фазы в поровом пространстве. Установлено, что применение уреазных добавок способствует снижению величины усадки бетона и повышению его трещиностойкости, а также прочность при растяжении на изгибе повышается более чем на 30 %, модуль упругости бетона возрастает в 1,5 раза. Эффект упрочнения поровой структуры материалы достигается за счет образования карбоната кальция в результате жизнедеятельности бактерий. Полученные результаты открывают перспективы для разработки экологически чистых и эффективных методов улучшения свойств строительных материалов

Ключевые слова: портландцемент, деформации усадки, уреазные биодобавки, прочность, трещиностойкость, бетон.

V.T. YEROFEEV¹, E.S. DERGUNOVA², M.A. GONCHAROVA², V.V. DERGUNOVA²

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

²Lipetsk State Technical University

SHRINKAGE DEFORMATION AND CRACK RESISTANCE OF CONCRETE MODIFIED WITH UREASE BIOADDITIVES

Abstract. This article examines the effect of urease bioadditives on the crack resistance and shrinkage deformation of concrete. The study involved introducing the urease-producing microorganisms *Sporosarcina pasteurii* and *Sporosarcina ureae* into the concrete mix. The properties of the concrete mixes were assessed for workability and flowability. The cut surfaces of modified concrete samples were examined, and the pore space was examined using optical and scanning electron microscopes to identify the formation of a new phase in the pore space. It was found that the use of urease additives reduces concrete shrinkage and improves its crack resistance, increases flexural strength by more than 30%, and increases the elastic modulus of concrete by 1.5 times. This is achieved through the formation of calcium carbonate as a result of bacterial activity, which strengthens the structure of the material. The results obtained open up prospects for the development of environmentally friendly and effective methods for improving the properties of building materials

Keywords: Portland cement, shrinkage deformations, urease bioadditives, strength, crack resistance, concrete.

1. Введение

Образование трещин в бетонном материале представляет собой критическое явление, которое может существенно снизить уровень безопасности эксплуатации сооружений, особенно в условиях значительных механических нагрузок или воздействия агрессивных сред. Своевременное обнаружение и предотвращение процессов трещинообразования является важным аспектом обеспечения надежности и долговечности бетонных конструкций. Также усадочные деформации являются одной из ключевых причин возникновения трещин в бетоне, которые снижают прочность и устойчивость сооружения, увеличивают вероятность проникновения влаги и агрессивных веществ внутрь конструкции, ускоряя коррозионные процессы и снижая срок службы сооружения [1-3].

Проблема снижения усадки бетонных и железобетонных конструкций, способствующей регулированию процессов трещинообразования, является одной из ключевых проблем современной строительной индустрии [4-6]. Поэтому разработка способов снижения усадки является актуальной задачей, решение которой позволит создавать эффективные и долговечные бетонные композиты.

К настоящему времени для устранения повышенных усадочных деформаций в бетонных элементах и предупреждения формирования в них трещин разработаны разнообразные методы, осуществляемые на уровне микро и макроструктуры:

- оптимизация состава смесей. Правильный выбор компонентов и пропорций наполнителей и связующих веществ позволяет минимизировать усадку и обеспечить высокие прочностные характеристики готового продукта [7-11].

- контроль условий твердения. Создание благоприятных условий влажности и температуры в период набора прочности способствует равномерному распределению влаги и минимизации появления разрывов [12-13].

- применение специализированных добавок. Широко используются пластификаторы, замедляющие схватывание и улучшающие подвижность смеси, полимерные добавки, увеличивающие прочность и эластичность, а также стабилизирующие растворы, предотвращающие преждевременное обезвоживание [9-10].

- армирование цементных композитов. Применение стальной и синтетической фибры повышает сопротивление бетона воздействию растягивающих усилий и предотвращает распространение мелких трещин [13-15].

- применение каркасной технологии. Создание каркасной макроструктуры бетонов и других композиционных материалов осуществляется в два этапа: на первом – заполнители складываются в каркас, на втором пористая структура каркаса заслоняется высокоподвижной матрицей [16]. У изделий полученных по каркасной технологии усадка снижается в 2-5 раз.

- применение нано- и биологических добавок. Внедрение наночастиц оксида кремния и диоксида титана усиливает межмолекулярные взаимодействия, делая материал более плотным и менее подверженным внешним воздействиям. Использование биоминерализирующих препаратов способствует самозалечиванию дефектов и укреплению структуры бетона [17-19].

Технология биоминерализации активно развивается в последние годы, привлекая внимание исследователей и инженеров-строителей своим потенциалом значительного увеличения срока службы бетонных конструкций и снижения экологического следа производства строительных материалов [17-29]. Она представляет собой уникальный технологический процесс, позволяющий повысить эксплуатационные характеристики традиционных цементных композиций посредством внесения специально подобранных микробиологических агентов. Биоминерализацию бетонов осуществляют путем введения

специальных штаммов бактерий, обладающих способностью вырабатывать ферменты, способные инициировать химико-минеральные реакции внутри пористой структуры бетона [26]. Ключевым элементом данного процесса выступает способность некоторых видов микроорганизмов синтезировать карбонат кальция (CaCO_3) [25, 26]. Именно этот минерал играет важнейшую роль в уменьшении пористости и укреплении межзерновой связи частиц цемента, снижая вероятность образования трещин и повышая общую прочность материала [27, 28]. Таким образом, включение биологического компонента в технологию изготовления бетона становится новым перспективным направлением развития отрасли, сочетающим преимущества традиционной химии цемента с возможностями живых организмов.

Цель данной работы – изучение усадочных деформаций и трещиностойкости бетонов, модифицированных уреазными биодобавками. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать бетонные смеси с биодобавками, содержащие микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, и оценить свойства бетонных смесей по таким свойствам как удобоукладываемость и подвижность.
- изучить поверхность среза образцов модифицированного бетона, исследовать поровое пространство с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов, идентифицировать образование новой фазы в поровом пространстве.
- определить деформации усадки и оценить трещиностойкость бетонов, модифицированных уреазными биодобавками.

2. Материалы и методы

Определение деформаций усадки при сжатии осуществляли с применением ГОСТ 25544. Размеры образцов-призм принимали 150X150X60. Насыщение водой образцов бетонов осуществляли согласно ГОСТ 24452. Испытания по определению коэффициентов усадки проводили при следующих условиях: температура составляла 20 ± 1 °C при относительной влажности воздуха 62 ± 1 %.

Для приготовления образцов использовали бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 32,5 N, песок (стандартный полифракционный по ГОСТ 6139), щебень фракции 5-10 мм и воду. Водоцементное отношение (В/Ц) обеспечивает получения теста нормальной густоты. Консистенцию раствора определяли по распылу конуса после встряхивания.

В качестве биодобавки использовали уреазные микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, взятые в соотношении 1:1. Смесь уреазных бактерий перед использованием иммобилизовали с применением альгината натрия. Альгинат натрия растворяли в кипящей воде в концентрации 2% и автоклавировали при 125°C в течение 15 мин. После охлаждения до температуры 40°C к 20 мл альгината натрия добавляли 10 мл бактериальной суспензии. Затем полученную смесь пропускали через экструдер в объем холодного 0,1 М раствора хлорида натрия. Образованные гранулы промывали водой, высушивали и хранили в темном месте при температуре не более 22 °C [22, 24].

Для контроля химического и минералогического состава портландцемента использовалась рентгенофлуоресцентная спектроскопия.

Исследования внутренних поверхностей модифицированных бетонных образцов проводили с применением электронного сканирующего микроскопа LYRA 3 TESCAN и оптического микроскопа ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41 (Липецк, ЛГТУ).

3. Результаты исследования и их анализ

Формирование бетонных смесей и исследование свойств и структуры бетона.

Установлено на начальном этапе, что портландцемент марки ЦЕМ 0 32,5 N, используемый в дальнейшей работе соответствует требованиям стандартов.

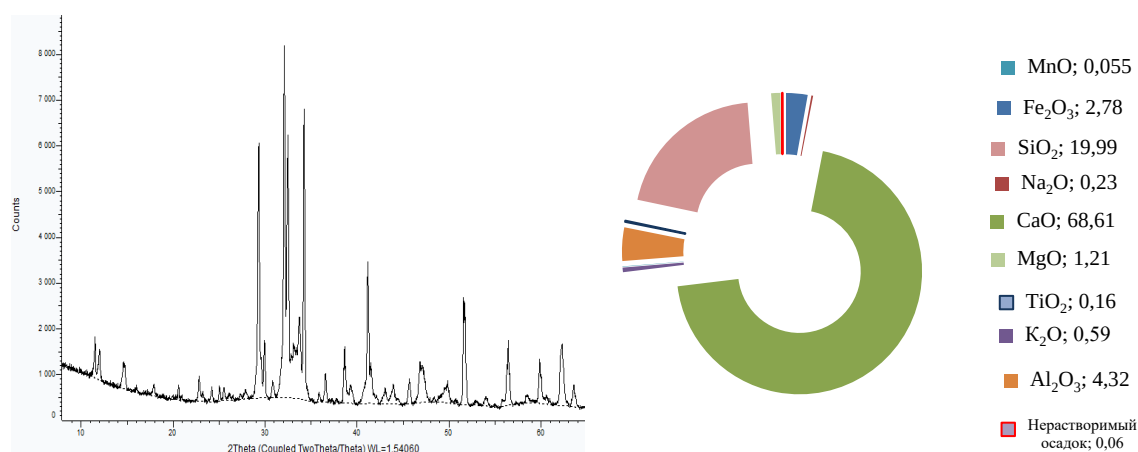


Рисунок 1 – Рентгенограмма и химический состав портландцемента ЦЕМ 0 32,5 N (% масс.)

Для исследования свойств бетонных смесей и бетонов использовали 6 составов (Табл. 1).

Таблица 1 – Состав бетонных смесей на 1 м³, кг

Наименование компонентов	Маркировка образцов в зависимости от составов бетонных смесей, кг/ м ³					
	I1	I10	I2	I20	I3	I30
Цемент	209	211	207	209	205	202
Песок	627	634	620	627	615	607
Щебень	1332	1346	1318	1332	1306	1289
Вода	63	63	83	83	102	101
Биодобавка	21	-	21	0	21	0
В/Ц	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5

Свойства затвердевшего бетона во многом зависят от его удобоукладываемости. Для количественной оценки влияния биодобавки на удобоукладываемость свежееуложенного бетона была определена подвижность расплыву конуса согласно ГОСТ Р 57811 «Смеси бетонные. Методы испытаний». В таблице 2 приведены экспериментальные данные.

Полученные результаты показывают, что бетон, модифицированный биодобавкой даёт осадку конуса больше на 0,2 – 0,5 см, чем обычный образец, что соответствует классу консистенции П1 и позволяет использовать такой бетон для обычных конструкций, уплотняемых вручную или с вибрацией. Увеличение осадки конуса по сравнению с обычным бетонным составом за счет биодобавки, которая обладает свойствами поверхностно-активного вещества и повышает пластичность бетонной смеси. Бетонные образцы твердели в течение 24 часов, затем выдерживались в резервуаре с водой при температуре 40±2 °С в течение 7 дней. Затем образцы до окончания набора проектной прочности, помещались в резервуар с водой комнатной температуры (25 °С).

Таблица 2 – Характеристики бетонных смесей

Характеристика	Маркировка образцов					
	I1	I10	I2	I20	I3	I30
Средняя плотность смеси, кг/м ³	2242	2245	2231	2235	2220	2225
Тип смеси	П1	П1	П1	П1	П1	П1
Осадка конуса, см	1,5	1,3	1,6	1,4	2,1	1,6
Степень уплотняемости, С	1,25	1,10	1,27	1,12	1,28	1,14
Объем воздуха в бетонной смеси, л	4,8	2,2	4,9	2,4	5,2	2,6

Исследование структуры образцов проводилось с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов. Были изучены поверхности срезов бетонных образцов, модифицированных биодобавками в возрасте 28 и 56 суток (рис. 2). Образцы материалов, модифицированные биодобавками, возрастом 28 суток, под микроскопом выглядят структурно стабилизированными, видно, что значительный объем пор заполнен продуктами гидратации, а некоторые остаются незаполненными. На фото образцов возрастом 56 суток уже появляются на месте пустых пор образования карбоната кальция. Идентификацию образовавшегося вещества проводили с применением рентгенофлуоресцентного анализатора. В результате было установлено, что полученная модификация карбоната кальция является кальцитом.

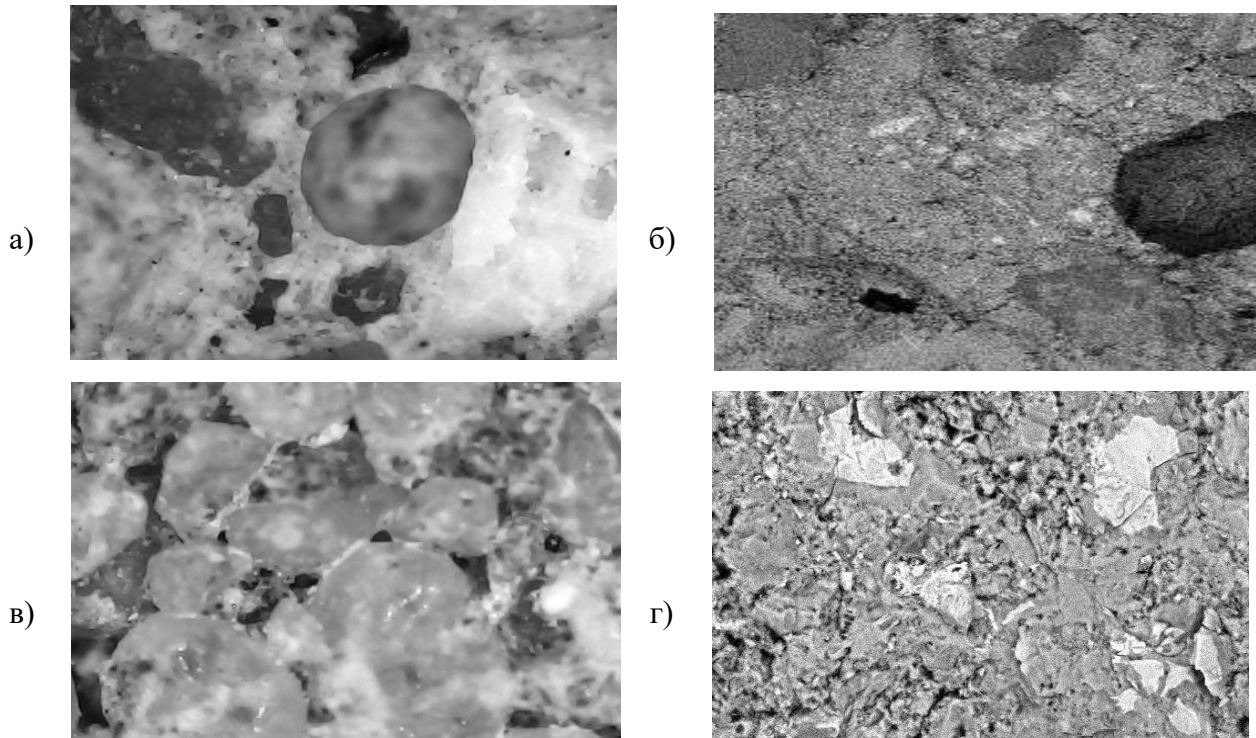


Рисунок 2 – Фото поверхности среза образца бетона, модифицированного биодобавкой в возрасте 28 (а, б) и 56 (в, г) суток (а, в – увеличение 150X, б, г – увеличение 2000X)

Результаты показали прогрессирование процессов гидратации и соответствующие биоминерализации микроструктурные преобразования (образования кальцита), заложив предпосылки для исследования усадки и трещиностойкости бетона, модифицированного биодобавками.

Исследование усадочных деформаций и трещиностойкости бетонов, модифицированных уреазными биодобавками.

Определение усадочных деформаций и трещиностойкости бетона имеет большое значение в строительной отрасли, особенно при проектировании и эксплуатации конструкций и сооружений [25, 26]. Экспериментально были определены коэффициенты общей усадки образцов бетона, модифицированных биодобавками. Установлены зависимости для каждой серии образцов коэффициента общей усадки от времени твердения (рис. 3). Измерения проводились ежедневно в одно и то же время в течение 120 суток.

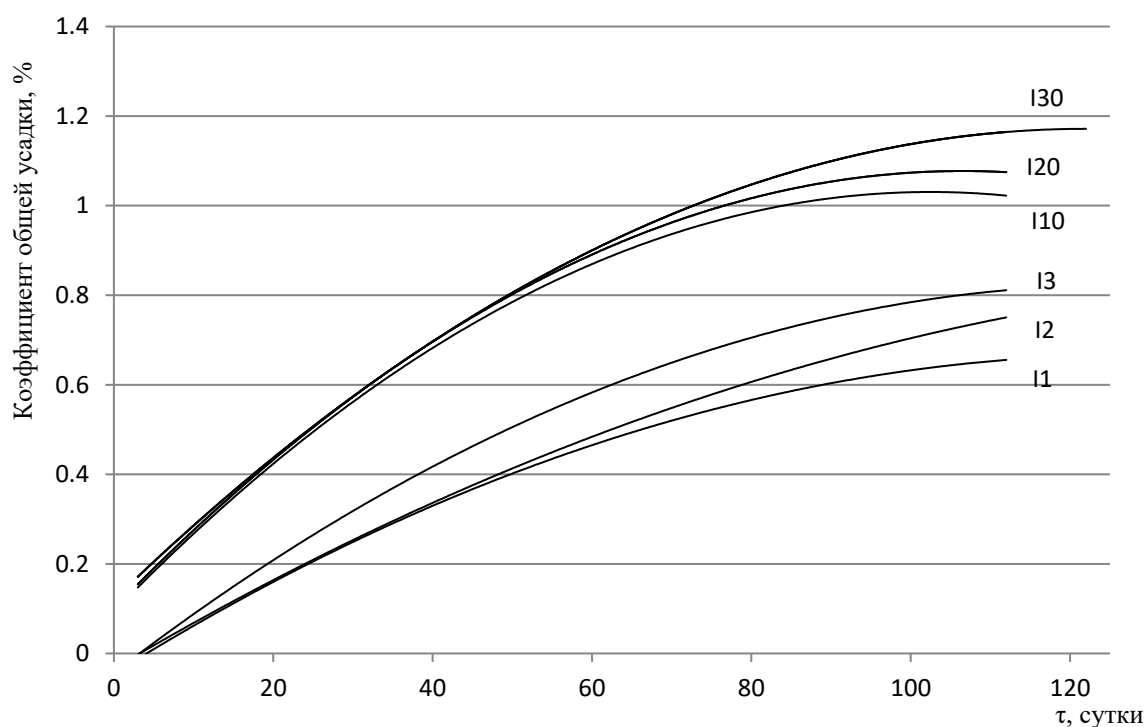


Рисунок 3 – Зависимость общего коэффициента усадки от времени для бетонов, модифицированных биодобавками

Как видно из рис. 3 коэффициенты усадки образцов бетона как модифицированного так и контрольного с возрастанием соотношения В:Ц имеют тенденцию к увеличению. Так, например, по сравнению с контрольным образцом I10 с соотношением воды и связующего 0,30, общая усадка модифицированного образца I1 снижена более чем на 30 %, соответственно. В то же время жидкая фаза альгинатной оболочки биодобавки, использованной в этом исследовании, способствует усилению гидратационных процессов цементных систем, постоянно обеспечивает потребность в гидратации системы с низким водоцементным отношением и уменьшает отрицательное давление в капиллярных порах. И этому же способствует образование плотной цементной матрицы, эффективно препятствующей потере капиллярной воды, тем самым снижая степень усадки при высыхании. В результате общая усадка за 120 дней для модифицированного биодобавками бетона может составить всего 670-680 мкм.

Бетон подвергается множеству негативных факторов, начиная от естественных процессов высыхания и заканчивая воздействием механических нагрузок и температурных колебаний. Эти факторы приводят к значительным изменениям в структуре материала, вызывая появление нежелательных дефектов, ухудшающих механические и физико-химические свойства конструкций [4, 5].

Для оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) определяли и рассчитывали согласно ГОСТ 29167 следующие показатели: прочность на изгиб, модуль упругости (E_b), статический J-интеграл (J_i), статический критический коэффициент интенсивности напряжений (K_i), условный критический коэффициент интенсивности напряжений (K_c). Результаты приведены в таблица 3.

Таблица 3 – Характеристики трещиностойкости бетонных образцов, модифицированных биодобавкой

№ п/п	Характеристика	Образцы бетона					
		I1	I10	I2	I20	I3	I30
1	E_b , МПа	29463	19523,2	28861	18952,3	27256	18053,4
2	J_i , МДж/м ²	10,7	9,8	10,4	9,7	10,1	9,2
3	K_i , МПа×м ^{0,5}	0,81	0,73	0,79	0,71	0,78	0,69
4	K_c , кН×м ^{0,5}	0,79	0,66	0,78	0,65	0,76	0,60
5	Прочность на растяжение при изгиб, МПа	10,2	6,4	10,1	6,3	9,8	6,2

Сравнение полученных результатов, приведенных в таблице 3, показывает, что за счет введения биодобавки повышается прочность при растяжении на изгиб более чем на 30 %, модуль упругости бетона возрастает в 1,5 раза. При формировании кальцита в порах бетона (данные таблицы) происходит значительное увеличение энергии, приходящейся на развитие магистральных трещин и энергии, расходуемой на разрушение образца вследствие восприятия растягивающих напряжений скоплений кальцита. В результате условный критический коэффициент интенсивности напряжений повышается с 0,66 до 0,79. Проведенные исследования позволили подтвердить предположение о положительной роли биодобавки в бетоне для повышения его трещиностойкости, модуля упругости и прочности на изгиб.

4. Заключение

На основании результатов исследований, представленных в статье, можно сделать следующие выводы:

1. Сформированы бетонные смеси с биодобавками, содержащие иммобилизованные микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae* в соотношении 1:1, и оценена удобоукладываемость бетонных смесей.
2. В результате изучения поверхности среза образцов модифицированного бетона с применением электронного сканирующего микроскопа LYRA 3 TESCAN и оптического микроскопа ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41 установлены устойчивые новой фазы кальцита в поровом пространстве.
3. Определены деформации усадки и оценены трещиностойкость бетонов, модифицированных уреазными биодобавками с учетом значений В:Ц. Установлены зависимости для каждой серии модифицированных и контрольных образцов коэффициента общей усадки от времени твердения.
4. Приведены оценки трещиностойкости бетонов по параметрам модуля упругости, статический J-интеграл, статический критический коэффициент интенсивности напряжений, условный критический коэффициент интенсивности напряжений.

Подводя итог, можно сказать, что устранение проблем усадки и трещинообразования бетона является необходимым условием для эффективного функционирования и долговечней эксплуатации железобетонных конструкций. Тщательное исследование механизмов происходящих процессов и интеграция новейших достижений науки и техники станут залогом успешного преодоления существующих трудностей и достижения высоких показателей долговечности и экономичности современного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yardim Y., Gesoğlu M., Nahhab A. H. Durability of ultra-high performance fiber reinforced concrete against internal sulfate attack using gypsum-contaminated aggregates // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 498. 144067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144067>.
2. Li J., Zhang Y., Wu Sh., Xin H. Effect of shrinkage-mitigating additives on flexural and compressive performance of ultra-high-performance concrete in corrosive environments // *Journal of Building Engineering*. 2025. 114761. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114761>.
3. Dang J., Qian J., Zhao J., Xiao J., Jing H. Understanding the autogenous shrinkage of concrete with recycled fine brick aggregate: Effects of minimum particle size and initial water saturation // *Journal of Building Engineering*. 2025. V. 113. 114158. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114158>.
4. Анпилов С. М., Ерофеев В. Т., Римшин В. И., Сколупович Ю. Л., Сорочайкин А. Н. Инновационные технологии строительства быстровозводимых зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2024. № 8. С. 5-13. doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13. EDN CXDPSN.
5. Han Y., Xie Y., Li W., Yue Q., Liu Y., Peng B. Using SAP to control the deformation of shrinkage-compensating concretes at early age // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 416. 135139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135139>.
6. Gamage N., Patrisia Y., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 427. 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>.
7. He M., Zhang L., Zhao J., Hadi M.N.S. A review of mixture design methods for self-compacting recycled concrete // *Journal of Building Engineering*. 2025. V. 113. 114085. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114085>.
8. Shao R., Wu C., Li J. A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance // *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104676. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104676>.
9. Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Зоткина М.М., Стенечкина К.С., Тюряхина Т.П., Лазарев А.В. Анализ свойств полимерных композитов с различными типами наполнителей // *Строительные материалы*. 2024. № 1–2. С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-100-109>. EDN ACZEED.
10. Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 359. 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>.
11. Li W., Qu F., Dong W., Mishra G., Shah S.P. A comprehensive review on self-sensing graphene/cementitious composites: A pathway toward next-generation smart concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 331. 127284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127284>.
12. Barbhuiya S., Das B.B., Rajput A., Katore V., Das A.K. Structural performance and implementation challenges of next-generation concrete materials // *Structures*. 2025. V. 81. 110169. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110169>.
13. Bahraq A.A., Jose J., Shameem M., Maslehuddin M. A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis // *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104713. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104713>.
14. Aghaee K., Khayat K.H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 305. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>.
15. Стурова, В. А. Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений // *Строительные материалы*. 2023. № 1-2. С. 44-49. DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49. EDN OVFCJP.
16. Erofeev, V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments / V. Erofeev // *Procedia Engineering : Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development*, St.Petersburg, 12–15 сентября 2016 года. V. 165. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. P. 1444-1447. DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.877.
17. The Effect of Modifying Additives on the Performance Properties of Slag-Alkali Binders and Concretes / Zh. T. Aimenov, A. Z. Aimenov, V. T. Erofeev [et al.] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. V. 20, No. 1. P.162-170. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170.
18. Дергунова Е.С., Гончарова М.А., Ерофеев В.Т. Комплексное исследование выносливости бетонов, модифицированных биодобавками// *Региональная архитектура и строительство*. 2025. № 3(64). С.20-25. DOI 10.54734/20722958_2025_3_20.
19. Vignesh J., Ramesh B., Xavier J.R., A review of recent trends in sustainable biopolymer-integrated concrete and its impact on mechanical performance and structural reliability // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 321. Part 2. 146408. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146408>.
20. Pu Y., Li L., Shi X., Wang Q., Abomohra A. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO2 mitigation from a life cycle perspective// *Construction and Building Materials*. 2023. V. 388. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>.

21. Ерофеев В.Т., Самченко С.В., Тараканов О.В., Максимова И.Н., Стенечкина К.С., Ерофеева И.В. От традиционных бетонов к бетонам нового поколения // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2025. Т. 68. №. 12. С. 83-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7199.
22. Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Сеницин Д.А. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 6. С. 493–500. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>.
23. Строкова В.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Дроздов О.И., Нелюбова В.В., Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 82–122. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>.
24. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review // Construction and Building Materials. 2024. V. 411. 134313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>.
25. Aytekin B., Mardani A., Yazici Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2023. V. 378. 131198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.
26. Гончарова М.А., Дергунова Е.С. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона // Строительные материалы. 2023. № 1-2. С. 25-33. DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31.
27. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83-103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.
28. Ерофеев, В. Т. Повышение долговечности и экологичности зданий и сооружений текстильной промышленности путем применения материалов, модифицированных микробиологической добавкой / В. Т. Ерофеев, С. Д. С. Аль Дулайми, А. В. Дергунова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 141-146. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_141.
29. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Zuev Yu.F., Holyavka M.G., Artyukhov V.G. Adsorption immobilization of enzymes on alginates: properties and use of drugs based on them. Short review // Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy. 2023. V. 23(5). pp. 924-937. (Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11727>.
30. Daneshvar D., Behnood A., Robisson A. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review // Construction and Building Materials. 2022. V. 359. 129195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129195>.
31. Mao Y., Liu J., Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 295. 126435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435>.

REFERENCES

1. Yardım Y., Gesoğlu M., Nahhab A. H. Durability of ultra-high performance fiber reinforced concrete against internal sulfate attack using gypsum-contaminated aggregates. Construction and Building Materials. 2025. V. 498. 144067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144067>.
2. Li J., Zhang Y., Wu Sh., Xin H. Effect of shrinkage-mitigating additives on flexural and compressive performance of ultra-high-performance concrete in corrosive environments. Journal of Building Engineering. 2025. 114761. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114761>.
3. Dang J., Qian J., Zhao J., Xiao J., Jing H. Understanding the autogenous shrinkage of concrete with recycled fine brick aggregate: Effects of minimum particle size and initial water saturation. Journal of Building Engineering. 2025. V. 113. 114158. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114158>.
4. Anpilov S. M., Erofeev V. T., Rimshin V. I., Skolubovich Yu. L., Sorochaykin A. N. Innovative Technologies for the Construction of Prefabricated Buildings and Structures. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2024. No. 8. Pp. 5-13. (rus). doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13.
5. Han Y., Xie Y., Li W., Yue Q., Liu Y., Peng B. Using SAP to control the deformation of shrinkage-compensating concretes at early age. Construction and Building Materials. 2024. V. 416. 135139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135139>.
6. Gamage N., Patrisia Y., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. Construction and Building Materials. 2024. V. 427. 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>.
7. He M., Zhang L., Zhao J., Hadi M.N.S. A review of mixture design methods for self-compacting recycled concrete. Journal of Building Engineering. 2025. V. 113. 114085. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114085>.
8. Shao R., Wu C., Li J. A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. Journal of Building Engineering. 2022. V. 55. 104676. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104676>.

9. Erofeev V.T., Afonin V.V., Zotkina M.M., Stenechkina K.S., Tyuryakhina T.P., Lazarev A.V. Analysis of properties of polymer composites with various types of fillers. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2024. No. 1–2, Pp. 100–109. (rus). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-100-109>.
10. Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. V. 359. 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>.
11. Li W., Qu F., Dong W., Mishra G., Shah S.P. A comprehensive review on self-sensing graphene/cementitious composites: A pathway toward next-generation smart concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. V. 331. 127284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127284>.
12. Barbhuiya S., Das B.B., Rajput A., Katare V., Das A.K. Structural performance and implementation challenges of next-generation concrete materials. *Structures*. 2025. V. 81. 110169, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110169>.
13. Bahraq A.A., Jose J., Shameem M., Maslehuiddin M. A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis. *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104713. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104713>.
14. Aghae K., Khayat K.H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview. *Construction and Building Materials*. 2021. V. 305. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>.
15. Sturova V.A. Steel Fiber Concrete with the use of local production waste for transport facilities. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 1–2, Pp. 44–49. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49>.
16. Erofeev, V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments / V. Erofeev // *Procedia Engineering : Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development*, St.Petersbug, 12–15 сентября 2016 года. Vol. 165. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. P. 1444-1447. DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.877.
17. Aimenov Z., Aimenov A., Erofeev V., Sabitov L., Sanyagina Y. The Effect of Modifying Additives on the Performance Properties of Slag-Alkali Binders and Concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. V.20 (No 1). Pp. 162-170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>.
18. Dergunova E.S., Goncharova M.A., Erofeev V.T. Comprehensive study of the endurance of concretes modified with bio-admixtures. *Regional architecture and engineering*. 2025. № 3(64). Pp.20-25 (rus). DOI 10.54734/20722958_2025_3_20. EDN TOOBWD.
19. Vignesh J., Ramesh B., Xavier J.R., A review of recent trends in sustainable biopolymer-integrated concrete and its impact on mechanical performance and structural reliability. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 321. Part 2. 146408. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146408>.
20. Pu Y., Li L., Shi X., Wang Q., Abomohra A. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO2 mitigation from a life cycle perspective. *Construction and Building Materials*. 2023. V. 388. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>.
21. Erofeev V.T., Samchenko S.V., Tarakanov Oh.V., Maksimova I.N., Stenechkina K.S., Erofeeva I.V. From traditional concretes to new generation concretes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 12. P. 83-95. (rus.) DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7199.
22. Kasatkin S.P., Soloviova V.Y., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. High-performance nano-modified concrete of increased strength and durability. *Nanotechnologies in construction*. 2022. 14(6). P. 493–500. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>. EDN: SNRCRN.
23. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I., Nelubova V.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Polymorphism and morphology of calcium carbonates in construction materials technologies using microbial biomineralization (review). *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2022. No. 1–2, Pp. 82–122. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>.
24. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review. *Construction and Building Materials*. 2024. V. 411. 134313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>.
25. Aytakin B., Mardani A., Yazici Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2023. V. 378. 131198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.
26. Goncharova M.A., Dergunova E.S. Features of the application of the bio-mineralization process to improve the structural and strength properties of concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 1–2, Pp. 25–31. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>.
27. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 9, Pp. 83–103. (rus). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>.
28. Ерофеев, В. Т. Повышение долговечности и экологичности зданий и сооружений текстильной промышленности путем применения материалов, модифицированных микробиологической добавкой / В. Т.

Ерофеев, С. Д. С. Аль Дулайми, А. В. Дергунова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 141-146. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_141.

29. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Zuev Yu.F., Holyavka M.G., Artyukhov V.G. Adsorption immobilization of enzymes on alginates: properties and use of drugs based on them. Short review. Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy. 2023. V. 23(5). Pp. 924-937. (rus). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11727>.

30. Daneshvar D., Behnood A., Robisson A. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review. Construction and Building Materials. 2022. V. 359. 129195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129195>.

31. Mao Y., Liu J., Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. Journal of Cleaner Production. 2021. V. 295. 126435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435>.

Информация об авторах:

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, г. Москва

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов

E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Дергунова Елена Сергеевна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

кандидат химических наук, доцент

E-mail: dergunova14@yandex.ru

Гончарова Маргарита Александровна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения и дорожных технологий,

E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Дергунова Валентина Витальевна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

студент кафедры химии

E-mail: valedergunova@yandex.ru

Information about authors:

Yerofeyev, Vladimir T.

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Materials

E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Dergunova Elena S.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

E-mail: dergunova14@yandex.ru

Goncharova Margarita A.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science and Road Technologies,

E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Dergunova Valentina V.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

student of the Department of Chemistry

E-mail: valedergunova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.02.2026

Одобрена после рецензирования 12.03.2026

Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 19.02.2026

Approved after reviewing 12.03.2026

Accepted for publication 01.04.2026

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

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

В тексте статьи не рекомендуется применять:

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

Обязательные элементы:

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

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

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

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

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

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. 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 27.04.2026 г.

Дата выхода в свет __.__.____ г.

Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6

Цена свободная. Тираж 500 экз.

Заказ № __

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