

В.Т. ЕРОФЕЕВ¹, М.А. ГОНЧАРОВА², О.В. ТАРАКАНОВ³, Д.А. СВЕТЛОВ⁴, И.Н. МАКСИМОВА³, И.В. ЕРОФЕЕВА¹, В.Н. КУЧИН⁵, Д.В. СВЕТЛОВ⁶

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

³ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Россия

⁴ ООО «Софт Протектор», г. Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

⁶ Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БИОЦИДНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. В процессе эксплуатации зданий и сооружений железобетонные конструкции подвержены воздействию различных нагрузок, которые вызывают деформации и разрушения. Прочностные и упруго-пластические свойства современных бетонов регулируются с помощью введения в составы пластификаторов, нанодобавок и наполнителей. Повышение биостойкости композитов достигается за счет введения биоцидных добавок. Статья посвящена изучению процессов деформирования и разрушения модифицированных биоцидной добавкой цементных композиций для создания долговечных порошково-активированных бетонов – одного из разновидностей бетонов нового поколения. Экспериментально доказана перспективность применения в качестве фунгицидной добавки препаратов на основе соединений гуанидина. Основные характеристики процессов деформации бетонов устанавливаются с помощью диаграмм «напряжение–деформация». Получены полные диаграммы деформирования биоцидных бетонов с протяженным участком нагружения при постоянной затухающей скорости деформирования, с фиксацией плавного снижения напряжения. Диаграмма деформирования бетона на нисходящей ветви фиксируется предельной деформативностью, соответствующей достижению бетоном максимального значения прочности, и конечной точкой нисходящей ветви, соответствующей остаточной прочности бетона. Изучены зависимости влияния В/Ц-отношения и биоцидной добавки на основные параметрические точки диаграммы σ – ϵ . Выполнен анализ полученных диаграмм. Показано, что за счет введения биоцидной добавки повышаются прочностные показатели цементного камня. Прочность на тесте нормальной густоты возросла в пределах от 12 до 65 % (в зависимости от состава). При повышении водоцементного отношения эти изменения более значительны – 29–79 %. Повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 для составов на биоцидной добавке приводит к снижению прочности цементного камня на 27–39 %.

Ключевые слова: цементные композиции, реакционно-порошковые бетоны, биоцидная добавка, физико-механические характеристики композитов, диаграммы деформирования с нисходящей ветвью, закономерности деформирования цементных матриц реакционно-порошковых бетонов с биоцидными добавками.

V.T. EROFEEV¹, M.A. GONCHAROVA², O.V. TARAKANOV³, D.A. SVETLOV⁴, I.N. MAKSIMOVA³, I.V. EROFEEVA¹, V.N. KUCHIN⁵, D.V. SVETLOV⁶

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

² Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

³ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

⁴ Soft Protector LLC, Saint Petersburg, Russia

⁵ Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

⁶ Saint Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Saint Petersburg, Russia

©Ерофеев В.Т., Гончарова М.А., Тараканов О.В., Светлов Д.А., Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Кучин В.Н., Светлов Д.В., 2025

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BIOCIDAL CEMENT COMPOSITES

Abstract. During the operation of buildings and structures, reinforced concrete structures are exposed to various loads that cause deformation and failure. The strength and elastic-plastic properties of modern concrete are controlled by introducing plasticizers, nanoadditives, and fillers. The biostability of composites is enhanced by adding biocidal additives. This article examines the deformation and failure of cement compositions modified with biocidal additives to create durable powder-activated concrete—a type of next-generation concrete. The potential of using guanidine-based compounds as a fungicide additive has been experimentally demonstrated. The key characteristics of concrete deformation processes are determined using stress-strain diagrams. Complete stress-strain diagrams for biocidal concrete are obtained and analyzed, showing a descending branch with an extended section of concrete loading at a constant, decaying strain rate, with a smooth decrease in stress. The concrete deformation diagram on the descending branch is fixed by the ultimate deformation, corresponding to the concrete achieving the maximum strength value, and the end point of the descending branch, corresponding to the residual strength of concrete. The dependences of the influence of the water/cement ratio and the biocidal additive on the main parametric points of the σ - ϵ diagram are studied. The obtained diagrams are analyzed. It is shown that the introduction of the biocidal additive increases the strength properties of the cement stone. Moreover, the role of the water-cement ratio is revealed: the strength of concrete on a test of normal consistency increased within the range of 12 to 65% (depending on the composition), with an increase in the water-cement ratio these changes are more significant – 29–79%. An increase in the water-cement ratio from 0.267 to 0.350 for compositions with a biocidal additive lead to a decrease in the strength of the cement stone by 27–39%

Keywords: cement compositions, reaction powder concretes, biocidal additive, physico-mechanical characteristics of composites, diagrams of deformation with a descending branch, patterns of deformation of cement matrices of reaction powder concretes with biocidal additives.

1. Введение

Современные бетоны – неоднородные, многофазные, гетерогенные искусственные композиционные материалы сложного иерархического строения [1]. В общей структуре бетонов выделяют нано-, субмикро-, микро-, мезо- и макроструктуры [2 - 4]. При этом вне зависимости от масштабного уровня композит состоит из двух обобщенных компонентов – матрицы и наполнителя, т.е. структура бетонов представляется капиллярно-пористой деформируемой матрицей, в которую включены более крупные зерна наполнителя (заполнителя) пико-, нано-, микро- и макромасштабного уровня.

Наноструктура описывается на уровне 10–6 мм (10–3 мкм). В цементных композитах в качестве наночастиц используется, например, ультрадисперсный микрокремнезем, а в качестве наполнителя – более грубодисперсная, нежели микрокремнезем, зола уноса и др. [5-7]. Пластифицирующими добавками являются вещества различной природы [8]. При рациональной дозировке и правильному сочетанию их с сырьевыми компонентами можно получить синергетический эффект, выражающийся в снижении водосодержания и соответственно уменьшению количества образующегося гидроксида кальция, улучшении микропластических свойств кристаллитной структуры, уменьшении размеров составляющих цементного геля и более равномерного распределения их в микрообъемах и др. [9, 10]. Таким образом, повышается вязкость разрушения, трещиностойкость и прочность материала в целом. При этом важно учитывать, что для поддержания уровня прочности цементного камня со сформировавшейся и продолжающей развиваться структурой, важнейшим фактором обеспечения стабильности свойств является возможность и способность цементной системы к самозалечиванию (заращению трещин в бетоне кристаллами $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 , сопровождающееся частичным или полным восстановлением конструкции) [11].

Формирование оптимальной структуры цементного камня является задачей, которую в последние годы решают исследователи, разрабатывая композиционные вяжущие, включающие в своем составе, наряду с цементом, микронаполнители различных размеров, пластифицирующие и другие добавки [12].

С экологической точки зрения эффективно использование альтернативных минеральных добавок, таких как фосфорный шлак, стеклянный порошок и известняк [12, 13]. Использование вышеуказанных наполнителей оказывает минимальное воздействие на окружающую среду и способствует уменьшению углеродного следа. В литературе также показаны возможные пути снижения содержания дорогостоящего ультрадисперсного микрокремнезема за счет применения кварцевого порошка, порошка диоксида кремния, золы рисовой шелухи [14].

Структура и свойства цементных композитов на различных структурных уровнях формируются при введении пуццолановых добавок [5], наночастиц [6], модифицирующих водорастворимых полимеров [7, 8], пластификаторов [9, 10, 11], наполнителей различных видов [7, 8], дисперсной арматуры [55].

Механические свойства и долговечность бетона во многом зависят от интенсивности связи между заполнителем и матрицей, где могут возникнуть микротрещины, которые затем распространяются на саму матрицу [14-22]. Большое влияние на свойства бетонов оказывают наноструктура, субмикро- и микроструктура. До недавнего времени эти уровни рассматривались исследователями в одном масштабном диапазоне, а именно, микроструктуры в работах [3 – 5]. Цементный камень и заполнитель демонстрируют хрупкое поведение. Напротив, бетон обладает способностью к псевдопластическим деформациям, что может быть объяснено развитием трещин в межфазной зоне.

Одним из наиболее важных факторов, улучшающих структуру бетонов, – это устранение крупных заполнителей и замена их мелким заполнителем, что способствует увеличению прочности связи компонентов внутри структуры бетона, снижению величин концентрации напряжений. В результате снижается общая неоднородность бетона [22, 23], уменьшаются механические эффекты неоднородности микроструктуры, минимизирующие внутренние дефекты материала, такие как поровое пространство и микротрещины [14-27]. Наиболее ярко эти эффекты проявляются в реакционно-порошковых бетонах (RPC). Низкая величина водоцементного отношения и добавление более мелких частиц в RPC способствует значительному снижению пористости [23, 28].

Оптимальная кривая распределения зерен по размерам будет способствовать получению материалов с наиболее благоприятной упаковкой [29].

Порошково-активированные бетоны характеризуются сверхвысокими характеристиками при воздействии статических и динамических нагрузок. Их особенностью является применение при изготовлении бинарных наполнителей, например, реологических и реакционных. В последние годы расширялись и продолжают расширяться области применения порошковых бетонов: для изготовления железобетонных колонн [31]; полноразмерных армированных балок [32]; защитных слоев сооружений с повышенной пуленепробиваемостью [33]; инженерных конструкций, подвергаемых растягиваемым нагрузкам [34, 35]; усиленных свай фундаментов [36]; низкочастотно циклически погружаемых соединений балок с колоннами [37]; сталебетонных композитных мостов и настилов [38-42]; фибробетонов в условиях воздействия повышенных температур [43, 44]; предварительно-напряженных железобетонных конструкций [45, 46]; конструкций, работающих на срез [47-49]; композитов с повышенной химико-биологической стойкостью [50]; Т-образных армированных балок малой высоты для мостовых сооружений [51-80].

Свойства порошково-активированных бетонов для ответственных конструкций улучшаются за счет введения дисперсной арматуры [30]. Для этого используются металлические, стеклянные, полипропиленовые и другие волокна. По форме они могут быть гладкие, крючковатые, гантельные и скрученные.

Расчет бетонных и железобетонных элементов во многом зависит от вводимых в него параметров, соответствующих реальному поведению бетона под нагрузкой. Одна из основных зависимостей диаграмма деформирования бетона, которая входит в нормативные документы

многих стран мира [55]. С помощью диаграмм «напряжение-деформация» (σ – ϵ) отслеживаются основные характеристики процессов деформирования и разрушения цементных композитов. Характер изменения диаграммы деформирования бетона зависит от множества факторов [56]: призмочной прочности, модуля упругости, предельной относительной деформации.

Призмочная прочность является одним из важнейших свойств бетона, она характеризует способность бетона сопротивляться осевым нагрузкам. Призмочная прочность очень важна для проектирования и расчетов, определения качества готовой конструкции и способности конструкции выдерживать возложенные нагрузки. Некоторые особенности изменения диаграммы « σ – ϵ » в зависимости от призмочной прочности и уровня нагружения бетонов представлены в работе [90]. Эти данные позволяют проиллюстрировать характер изменения диаграммы деформирования бетонов от призмочной прочности (рис. 1). Как показывают экспериментальные исследования, с ростом призмочной прочности возрастает линейность деформирования.

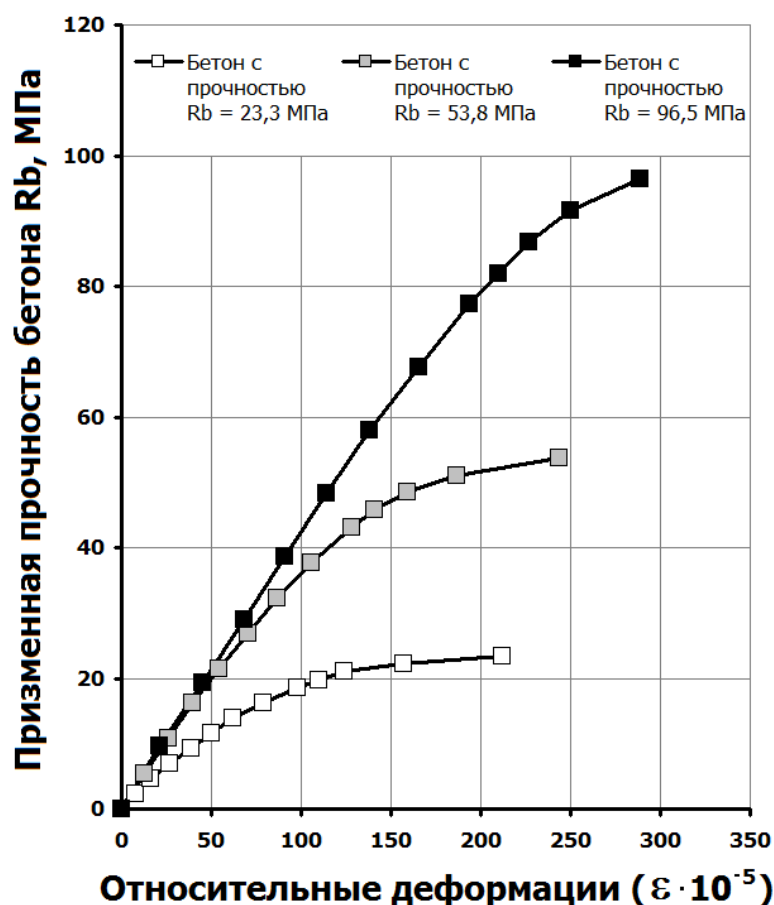


Рисунок 1 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от призмочной прочности [90]

Модуль упругости – коэффициент пропорциональности между величиной напряжения и соответствующей этому напряжению величиной упругой деформации материала. В условиях осевого сжатия или растяжения определяют модуль продольной упругости E . Исследованию зависимости начального модуля упругости бетона от класса бетона по прочности на сжатие посвящена работа [90]. Характер изменения диаграммы деформирования бетона от модуля упругости представлен на рис. 2. При построении диаграмм использовались экспериментальные данные из работы [91].

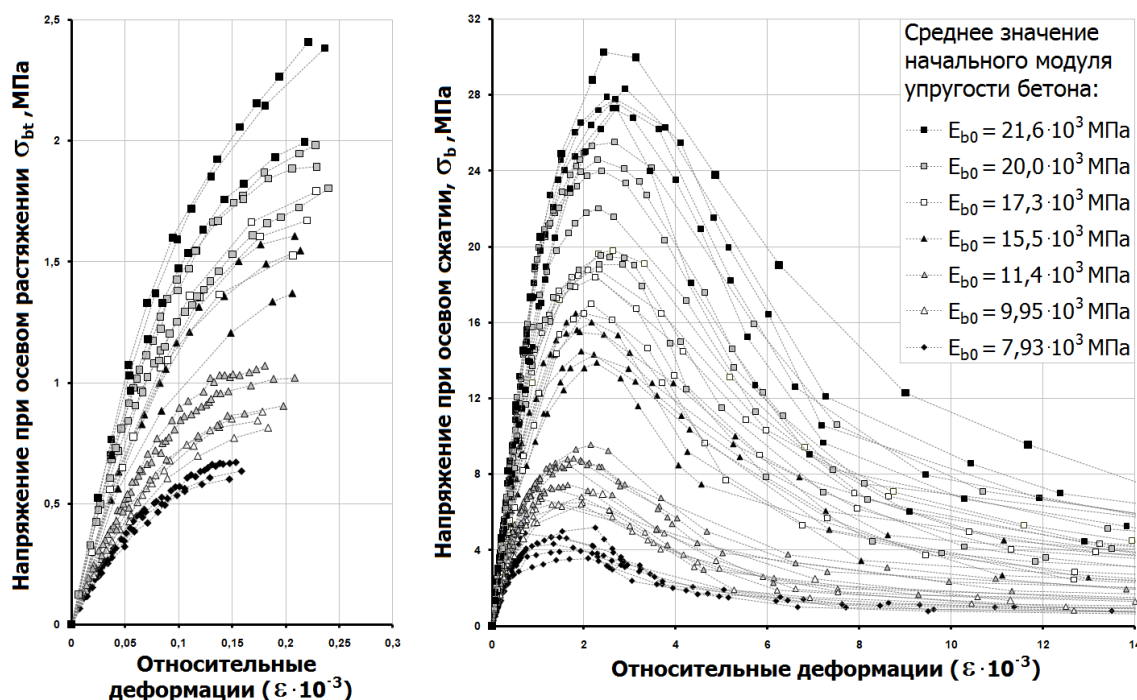
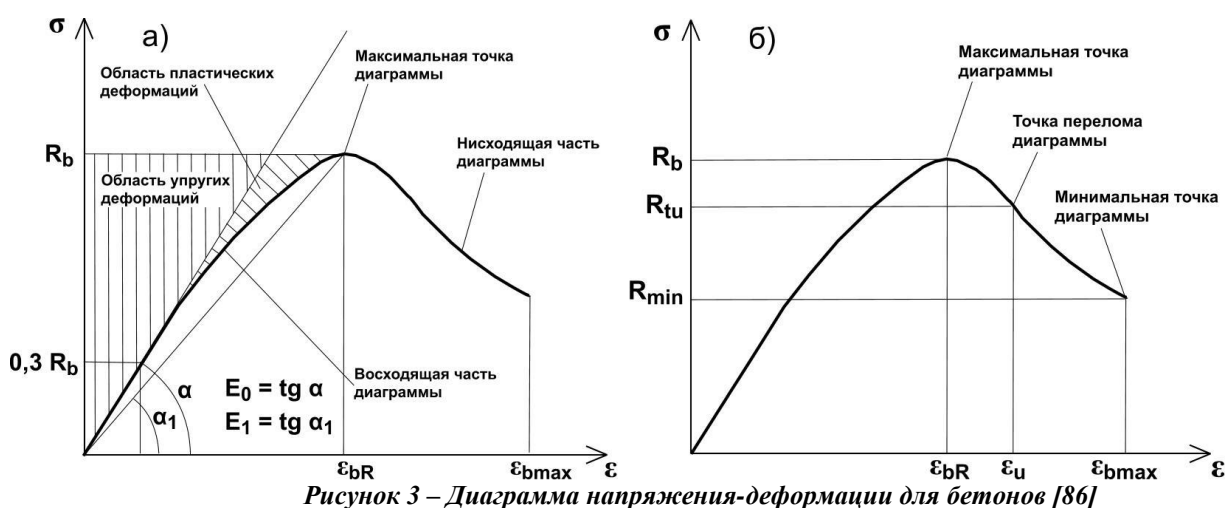


Рисунок 2 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от продольного модуля упругости

Также важной характеристикой материала, которая определяет характер диаграммы деформирования, является относительная деформация, соответствующая пределу кратковременной прочности бетона. Данные, представленные в статье [91], позволили оценить зависимость временной прочности бетона от предельных относительных деформаций бетона при осевом растяжении и сжатии.

Общий вид и основные параметрические точки диаграммы деформирования σ – ϵ бетона при сжатии приведены на рис. 3.



На диаграмме σ – ϵ выделяются три области развития деформации: линейная – на восходящей ветви – характеризует упругие деформации (сопровождаются уплотнением бетона); упруго-пластическая – нелинейный участок восходящей ветви – характеризует необратимые пластические деформации (сопровождаются разуплотнением бетона); пластическая стадия – нисходящая ветвь деформирования – характеризует пластические деформации, ведущие к разрушению бетона. Таким образом, упругие или линейные

деформации в сумме с длительными деформациями, включающими обратимые - подчиняющиеся принципу суперпозиции, и необратимые, нелинейно зависящие от напряжений, дают представление о полных деформациях цементного композита [57-59].

Характер изменения диаграммы деформирования бетона от относительных деформаций, соответствующих пределу кратковременной прочности бетона, проиллюстрирован на рисунке 4.

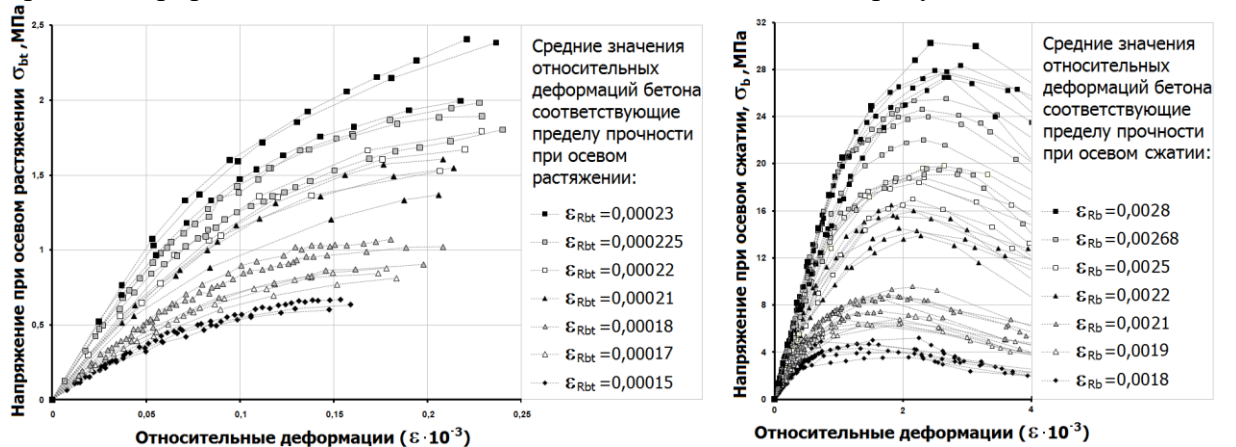


Рисунок 4 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от относительных деформаций, соответствующих пределу кратковременной прочности бетона

По данным, диаграммы напряжения-деформации показывают, что с ростом скорости деформации максимальное напряжение увеличивается. При этом по линейному закону происходит рост предельных деформаций, а по степенному закону снижается время до начала разрушения бетонов [89, 90, 91, 92, 93, 94].

Процесс разрушения бетонов является сложным и развивается постепенно. На первом этапе проявляются перенапряжения, следствием чего является развитие трещин в отдельных микрообъемах. Затем распределение напряжений способствует вовлечению в трещинообразование большего объема материала, вплоть до образования сплошного разрыва того или иного вида, который зависит от формы образца (конструкции), ее размеров и других факторов. На последнем этапе микроразрушения приобретают лавинный катастрофический характер [60-65].

При разрушении цементных композитов при испытаниях на сжатие образуются микротрещины отрыва, направленные параллельно действующему усилию. За счет этого увеличивается объем, хотя это «кажущееся» явление. Очевидно, что именно структура бетонов и характер приложенной нагрузки определяет механизм (интенсивность и продолжительность) развития микротрещин. При этом только анализ продольных и поперечных деформаций на диаграммах поведения бетона « σ – ϵ » бетонных образцов позволяет обнаружить процесс развития микроразрушений.

Актуальными являются исследования, направленные на установление аналитических выражений, максимально отражающих физическую нелинейность поведения бетонов при нагружении [66]. В этом случае физическая нелинейность в большей степени связывается с трещинами и их развитием. Деформативные свойства бетона с учетом нисходящей ветви деформации изучали в ряде работ [67 и др.].

Диаграмма деформирования бетона на нисходящей ветви фиксируется следующими параметрическими точками: ϵ_{bR} (предельная деформативность бетона соответствует достижению бетоном максимального значения прочности R_b), ϵ_{bu} , ϵ_{bmax} (текущая и конечная точки ниспадающей ветви диаграммы. Конечная точка соответствует остаточной прочности бетона (R_{min}). Диаграммой оцениваются различные состояния бетона как до образования трещин, так и после их возникновения.

Представляет значительный интерес установление влияния средовых нагрузок на долговечность материалов. Установлено, что в настоящее время более 50 % общего объема

регистрируемых в мире повреждений связано с деятельностью микроорганизмов [75, 76]. Биоповреждениям подвержены практически все материалы, в том числе полимерные, цементные растворы и бетоны, древесина [76-78].

Особенно остро эта проблема стоит для сооружений гидротехнического строительства, агропромышленных комплексов, предприятий пищевой промышленности, (в том числе в овощехранилищах, на кожевенных фабриках и других [69-73].

Под биоповреждениями понимают разрушение материалов и нарушение работоспособности изделий в результате воздействия биологических агентов и продуктов их жизнедеятельности [71].

Очевидно, что исследования, посвященные влиянию биоцидных препаратов на деформативные свойства цементного камня порошково-активированных бетонов, являются крайне актуальными, так как в последние годы наметилась тенденция увеличения видов и численности микроорганизмов. Возросла агрессивность известных видов. При нынешней эпидемиологической и экологической ситуации биозаражения строительных конструкций представляют серьезную угрозу внутригосударственным мерам по безопасности жизнедеятельности людей, защите их здоровья [84].

Один из наиболее эффективных и длительно действующих способов защиты строительных материалов и конструкций от поражений микроорганизмами — применение биоцидных соединений. В основе токсического действия биоцидных добавок лежит их способность ингибировать активность ферментов и определенные реакции метаболизма грибов, угнетать дыхание, нарушать их клеточные структуры. Фунгицид, контактируя с клеточной оболочкой гриба, проникает в клетку и вступает во взаимодействие с ее компонентами, подавляя биосинтез [89]. Особый интерес среди биоцидов представляют антимикробные препараты – производные гуанидина, характеризующиеся широким спектром действия. Гуанидин – фрагмент аминокислот и витамина В₆, содержится в яичном альбумине, стрептомицине и многих белках, входит в состав гуано. Гуанидин имеет формулу $(H_2N)_2C = NH$. Производные гуанидина проявляют наивысшую активность при наличии у заместителей 5–8 атомов углерода, причем эти свойства сохраняются при их включении в полимерные композиции.

Цель и задачи исследования.

Целью исследований являлось разработка инженерного и технологического решения по минимизации деформирования и разрушения порошково-активированных бетонов с биоцидной цементной матрицей.

Задачи исследования:

1. Составить аналитический обзор работ отечественных и зарубежных авторов в области исследования деформативности и изучения физико-механических свойств материалов на основе диаграмм «напряжение-деформация» для защиты зданий и сооружений от биоповреждений.

2. Применить модельные системы при получении порошково-активированных бетонов (RPC) следующих составов цементных матриц: «цемент - вода - биологическая добавка» (матрица первого рода); «цемент- молотый наполнитель – пластификатор – вода - биоцидная добавка» (матрица второго рода); 3) цемент, молотый наполнитель, тонкий наполнитель фракции 0,1–0,5 или 0,16–0,63 мм, пластификатор, вода, биоцидная добавка (матрица третьего рода); 4) матрица первого рода, матрица второго рода или матрица третьего рода, включающая мелкий заполнитель фракции 0,63–5,0 или 1,25–5,0 мм (матрица четвертого рода).

3. Обосновать применение в качестве биоцидной добавки в цементных композитах препаратов на основе соединений гуанидина.

4. Определить рациональную дозировку биоцидной добавки и водо-твердого отношения, при которых биостойкость и физико-механические свойства цементных композитов в составе матрицы первого рода существенно улучшаются.

5. Получить диаграммы «напряжение-деформация» для цементных композитов и описать влияние рецептурных факторов на основные параметрические точки. При этом в качестве типа исследуемых диаграмм выбрать диаграммы с нисходящей ветвью, которые позволяют изучать наряду с упругими упруго-пластические и пластические свойства.

6. Выполнить анализ полученных диаграмм для материалов цементных композитов от В/Ц отношения и биоцидной добавки.

2. Модели и методы

В качестве вяжущего использовался бездобавочный цемент производства ООО «Ульяновскцемент», удовлетворяющей требованиям ГОСТ 10178 –85.

В качестве биоцида применялся препарат «Тефлекс», представляющий собой модифицированный комплекс сополимеров гуанидина – «Тефлекс Дезинфицирующий» (ТУ 9392-006-23170704-2004). В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор (СП) серии «Melflux» – «Melflux 1641F» на основе поликарбоксилатных эфиров (производитель – компания Degussa Constraction Polymers, SKW Trostberg, Германия).

Характеристики пластификатора приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Характеристики пластификатора «Melflux 1641F»

Характеристики	Melflux 1641F
Внешний вид, цвет	Порошок, цвет от желтоватого до коричневого
Потери при высушивании, % по массе	max 2,0
Насыпная плотность, кг/м ³	400–600
Реакция – pH 20% раствора t =20 °C	6,5–8,5
Рекомендуемая дозировка по отношению к массе связующего, %	0,05–1,0

В качестве реакционно-химической пуццолановой добавки использовали порошкообразный липецкий микрокремнезем (марки МК-85), с удельной поверхностью 6500 м²/кг. В качестве активного дисперсного наполнителя использовалась каменная мука в виде микрокварца, характеристики которого представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Характеристики микрокварца

Размеры сит, мм	Остатки на ситах, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Модуль крупности
5	0	0	0	1,02
2,5	0	0	0	
1,25	0	0	0	
0,63	5	0,25	0,25	
0,315	205	10,25	10,5	
0,16	1620	81,0	91,5	
менее 0,16	155	7,75	102	

Песок Смольненского карьера Ичалковского района Республики Мордовия и Храмцовского карьера Ивановской области выполняли роль тонкодисперсного наполнителя мелкого заполнителя. Их свойства приведены в табл. 3-6.

Таблица 3 - Характеристики песка Ичалковского карьера Республики Мордовия

№ п/п	Свойство	Ед. изм.	Показатель
1	Класс песка	—	1
2	Модуль крупности	—	1,7
3	Объемно-насыпная масса	г/см ³	1,35
4	Содержание пылеватых и глинистых частиц	%	2,0
5	Содержание глины в комках	%	0,2
6	Коэффициент фильтрации	м/сут	3

Таблица 4 - Характеристики песка Храмцовского карьера Ивановской области

№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ 8736–93	Фактические показатели
1	Модуль крупности	2,5–3,0	2,76
2	Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	Не более 2,0	1,0
3	Содержание глины в комках, %	Не более 0,25	Отсутствует
4	Насыпная плотность, кг/м ³		1 580
5	Содержание вредных компонентов и примесей: SO ₃ , % аморфные разновидности SiO ₂ , ммоль/л	0–1,0 0–50	0,37 28,83
6	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов песка, Бк/кг	До 370–1-й кл.	39

Таблица 5 - Гранулометрический состав кварцевого песка Ичалковского карьера Республики Мордовия

Остатки	Остатки на ситах, %, с размером отверстий, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	поддон
Частные	0,28	1,11	6,44	32,16	47,34	12,67
Полные	0,28	1,39	7,83	39,99	87,33	100

Таблица 6 - Характеристика зернового состава кварцевого песка Храмцовского карьера Ивановской области

Остатки	Остатки на ситах, %, с размером отверстий, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	поддон
Частные	9,63	8,89	34,35	35,37	9,94	1,82
Полные	9,63	18,52	52,87	88,24	98,18	100

В качестве дисперсной арматуры применяли полипропиленовое волокно длиной 18 мм и диаметром 20 мкм, ТУ 2272-001-90345062 2012, ТУ 5458-001-82255741-2008, стальную фибра длиной 12 мм и диаметром 0,22 мм.

Образцы изготавливались в металлических формах, которые предварительно смазывали парафином. Твердение образцов проходило при термовлажностной обработке, после того как в течение одних суток они твердели в формах в ванной с гидравлическим затвором. Влияние биоцидной добавки «Тефлекс Дезинфекант» при различном содержании воды исследовали на составах, приведенных в табл. 7.

Таблица 7 - Составы композиций для изготовления образцов

Компоненты	Содержание, мас. ч. в составах			
	1	2	T17	T18
Цемент ульяновский ПЦ 500 Д0	1	1	1	1
Вода	0,267	0,350	0,267	0,350
Биоцидная добавка	–	–	0,030	0,030

Исследование свойств фибробетона проводили на составах при различном соотношении компонентов (табл. 8).

Таблица 8 - Составы фибробетонов

Наименование	Содержание компонентов в составе, масс %						
	Рациональные составы						Прототи п
	1	2	3	4	5	6	7
Портландцемент	32,1	31,0	30,1	29,0	27,9	26,9	20,3
Микрокремнезем	4,74	4,62	4,50	4,28	4,26	4,14	2,3
Пластификатор	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,18
Микрокварц, $S_{уд}=400\text{м}^2/\text{г}$	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	-
Стальная фибра	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	
Полипропиленовое волокно	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,05
Кварцевый песок фракции 0,16-0,63 мм	24,1	24,7	25,1	25,9	26,4	26,9	-
Кварцевый песок фракции 1,25-5 мм	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,3	-
Песок нефракционированный крупный $M_k=2,5\div 3,0$	-	-	-	-	-	-	67,6
Стеарат полигексаметиленгуанидин	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	-
Вода	8,9	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	9,57

Прочность определяли при испытании образцов в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы испытывали на изгиб как балку на двух опорах одиночной силой, приложенной в середине пролета. Прочность при сжатии определяли на половинках образцов-балочек, имеющих площадь поперечного сечения 1,4 и 25 см², с помощью специально изготовленного приспособления, обеспечивающего приложение нагрузки через нажимные пластинки. Для проведения исследований по определению прочности образцов на раскалывание использовалась оснастка, обеспечивающая их фиксацию в заданном положении и нагружение их граней призмами, расположенными на верхней и нижней плите нагружающего устройства. Средняя скорость нарастания нагрузки принималась равной 50 Н/с.

Испытание фибробетонных образцов на прочность при сжатии, морозостойкость, водонепроницаемость и биостойкость производилось на 28-е сутки в соответствии с ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10060 2012, ГОСТ 12730.5-84.

Биостойкость цементных композиций определяли в соответствии с ГОСТ 9.048. Экспериментальную диаграмму трансформировали в расчетную по требованиям ГОСТ 29167. С этой целью, пользуясь средствами графического редактора AutoCAD, по набору данных восстанавливали диаграмму деформирования. Для получения равновесной диаграммы «усилие – перемещение» («F – V») при испытаниях образцов была использована установка повышенной жесткости. На основании данных усилия F и перемещения V строилась диаграмма «F – V», показанная на рис. 5.

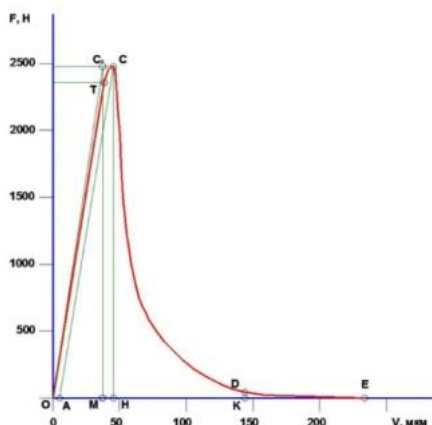


Рисунок 5 – Равновесная диаграмма деформирования образца
По результатам испытаний формировались итоговые таблицы 9-11

Таблица 9 - Определение характеристик трещиностойкости образца. Исходными данными являлись для образца № Т17.

Состав образца	Режимы отверждения	Геометрические размеры образца					Масса образца, кг	Плотность образца, кг/м ³	Влажность (весовая), %
		L · 10 ³	B · 10 ³	H · 10 ³	A ₀ · 10 ³	L ₀ · 10 ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T-17	TBO	160	40	40	4	120	0,581	2270	3,0

Примечание: L – длина образца; B – ширина; H – высота; A₀ – длина наведенной в образце трещины; L₀ – расстояние между опорами образца; TBO – тепловлажностная обработка

Таблица 10 - Значения нагрузки F, H, величины перемещений V, м, в характерных точках на кривой «F–V»

Показатели в характерных точках диаграммы деформирования													
С		Н		Т		А		D		М		Е	
F _C · 10 ³	V _C · 10 ³	F _H · 10 ³	V _H · 10 ³	F _T · 10 ³	V _T · 10 ³	F _A · 10 ³	V _A · 10 ³	F _D · 10 ³	V _D · 10 ³	F _M · 10 ³	V _M · 10 ³	F _E · 10 ³	V _E · 10 ³
2503.0	32.0	0.0	32.0	2385	18.8	0.0	11.8	22	219	0.0	18.2	0.0	278.0

Таблица 11 - Расчетные характеристики материала

Энергетические показатели характеристик							Трещиностойкость		Свойства бетона			
							Б					
W _e , Дж	W _m , Дж	W _i , Дж	W _{ul} , Дж	G _I , Дж	G _F , Дж	J _j , Дж	K _i , МПа м ^{1/2}	R _{tb} , МПа	E, МПа	X _{сF} , м	R _{pp} , МПа	R, МПа
0,0248	0,02939	0,193381	0,022797	37,4438	151,501	21,6123	0,93178	6,43621	23187,38	0,0848	6,8	10,5

Примечание: W_e – энергозатраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины; W_m – то же, на процессы развития и слияния микротрещин; W_i – то же, на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины; W_{ul} – то же, на упругое деформирование сплошного образца; G_I – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины; G_F – то же, на статическое разрушение; J_j – статический джей-интеграл; K_i – статический коэффициент интенсивности напряжений; R_{tb} – прочность бетона на растяжение при изгибе; X_{сF} – критерий, характеризующий хрупкость испытуемого материала; R_{pp} – прочность на растяжение при раскалывании, вычисляемая как среднее арифметическое двух показателей; R – то же, прочность на сжатие (величины R_{pp} и R устанавливаются проведением дополнительных испытаний).

Испытания с тест-объектами мицелиальных грибов и бактерий грибов проводили следующим образом:

Размеры образца не превышали внутренние размеры стандартной чашки Петри (диаметр 900 мм), толщина образца не превышала 0,7 глубины чашки. С учетом этого был принят размер образцов 1×1×3 см. Каждый образец очищался от загрязнений, протирался тампоном или кистью, смоченными в этиловом спирте. Затем образцы помещали в стерильные чашки Петри.

Испытание на биостойкость материала проводили по следующим микробиодеструкторам:

- а) грибы: *Aspergillus niger*; *Aspergillus terreus*; *Aspergillus versicolor*; *Alternaria alternata*; *Aurebasidium pullulans*; *Cladosporium cladosporioides*; *Cladosporium sphaerospermum*; *Mucor racemosus*; *Penicillium ochro-chloron*; *Penicillium funiculosum*; *Paecilomyces variotii*; *Scopulariopsis brevicaulis*; *Trichoderma viride*;
- б) бактерии: *Streptomyces* sp.; *Nitrosomonas* sp.; *Thiobacillus ferrooxidans*; *Thiobacillus thioparus*; *Pseudomonas fluorescens*; *Gallionella ferruginea*; *Bacillus subtilis*; *Desulfovibrio desulfuricans*.

Оценку степени биостойкости каждого образца проводили по табл. 12.

Таблица 12 - Оценка степени биостойкости образцов испытываемых материалов для каждого тест-объекта

Характеристика балла	Балл
Под микроскопом прорастания спор, конидий грибов и бактерий не обнаружено	0
Под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий. Под микроскопом видны единичные колонии бактерий	1
Под микроскопом виден развитый мицелий, возможно спороношение. Под микроскопом видны немногочисленные колонии бактерий	2
Невооруженным глазом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом. Под микроскопом видны многочисленные колонии бактерий	3
Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25% испытываемой поверхности. То же, для бактерий	4
Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих более 25% испытываемой поверхности. То же, для бактерий	5

3. Результаты исследования и их анализ

1. Испытание биоцидов в средах мицелиальных грибов и бактерий и исследование биологической стойкости цементных композитов с биоцидными добавками.

Исследования проводили в два этапа. На первом этапе для оценки влияния микрофлоры и биоцидных добавок на прочность цементного камня были изготовлены несколько серий образцов. В качестве биологических агентов использовались выделенные штаммы *Bacillus subtilis* и других типичных микроорганизмов, поражающих строительные материалы (табл. 13).

Таблица 13 - Микроорганизмы, используемые в испытаниях

Тип микроорганизма	Вид
Мицелиальные грибы	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Trichoderma viride</i>
Бактерии	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i>
Актиномицеты	<i>Streptomyces</i> spp.

Для примера в статье приводится три типа образцов: контрольный состав бетона (без добавок и заражения); бетон, инфицированный бактериальной культурой; бетон, инфицированный бактериальной культурой с добавлением «Теффлекса».

Образцы выдерживались в условиях, способствующих развитию микрофлоры (температура 28 °С, влажность 90 %). Добавка Тефлекс вводилась в количестве 0,5 % от массы цемента. Результаты испытаний представлены в табл. 14.

Таблица 14 - Результаты испытаний

Состав	Прочность, МПа
Бетон (контроль)	32,5
Бетон + микроорганизмы	18,7
Бетон + бактерии + Тефлекс	39,2

Как видно из результатов испытаний, микробиологическое заражение без дополнительной защиты приводит к значительному снижению прочности цементного композита: более чем на 42 % по сравнению с контрольным образцом. В то же время введение добавки Тефлекса не только полностью компенсировало потери, но и увеличило прочность по сравнению с исходным составом на 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале полимеров гуанидина как стабилизирующих и антисептических добавок, предотвращающих деградацию материалов на основе цементных вяжущих под действием биологических агентов. Рост прочности может быть обусловлен как снижением микробиологической активности, так и возможным участием гуанидиновой группы в гидратационных процессах. На втором этапе исследований образцы изготавливались с биоцидной присадкой в разных концентрациях

В качестве объектов испытания выступали цементные композиты с различными типами биоцидных добавок марки Тефлекс. Испытания проводились в средах мицелиальных грибов и бактерий. Для выращивания грибов применялись среды Czapek-Dox, PDA, Sabouraud, а для бактерий – Нутриентный агар и МРА. Пробы цементных композитов с Тефлекс вносились на выращенные культуры грибов и бактерий. Испытания велись в течение 28 суток при T = 25 °С. В табл. 15 представлены полученные результаты испытаний по установлению роста микроорганизмов в зависимости от типа препарата (№№ 1–4).

Таблица 15 - Результаты испытаний

Вид микробов	Разведение ПГМГ, %	Зона отсутствия роста микроорганизмов, мм			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
E. coli	1	4	3		
	0,1	1	1	3	2,5
	0,01	0,5	0,5		
	0,001	0,2	0,1		
Staphilo-coccus aureus	1	6	7		
	0,1	2	4	6	5,5
	0,01	1	2		
	0,001	0	0		
Candida	1	4	4		
	0,1	1	2	5,5	0
	0,01	0	0		
	0,001	0	0		
Aspergillus	1	4 (ингибция)	4 (ингибция)		
	0,1	0	0	3	4
	0,01	0	0		
	0,001	0	0		

Из результатов исследований следует, что растворы всех препаратов высокоактивных против всех тест-штаммов, в том числе бактерий, дрожжеподобных и плесневых грибов. Максимальную активность проявил препарат № 2, давший наибольшие усредненные зоны отсутствия роста вокруг дисков. Таким образом, использование биоцидных композиций на основе Теффлекса в составе цементных материалов может быть рекомендовано для условий, подверженных воздействию микроорганизмов. Это открывает перспективы применения таких добавок в подземных, транспортных, санитарных и других объектах, где важна не только прочность, но и микробиологическая стойкость строительных материалов.

2. Исследование прочности, трещиностойкости и деформативности цементного камня с биоцидной добавкой.

Влияние биоцидной добавки «Тефлекс Дезинфекант» на свойства цементного камня изучали на составах, отличающихся водоцементным отношением: образцы из цементного теста нормальной густоты с В/Ц 0,267 (состав № 1) без биоцидной добавки и состава № Т17 с биоцидной добавкой, а также образцы, изготовленные при повышенном водоцементном отношении – 0,350 (состав № 2) без биоцидной добавки и состава № Т18 с биоцидной добавкой. Результаты прочностных испытаний образцов приведены в табл. 16.

Таблица 16 - Влияние водоцементного отношения на прочность образцов цементного камня с биоцидной добавкой

Номер состава	В/Ц	Прочность на сжатие		Прочность при изгибе		Прочность на растяжение при раскалывании	
		R, МПа	%	R _{th} , МПа	%	R _{bb} , МПа	%
T17	0,267	70,9	100	9,72	100	5,39	100
T18	0,350	51,5	73	6,58	68	3,30	61

Как следует из таблицы 16, для составов на биоцидной добавке повышение водоцементного отношения приводит к снижению прочности цементного камня аналогично бездобавочным составам (с 22 до 58 %), в то же время с повышением В/Ц от 0,267 до 0,350 снижение прочности для составов с биоцидной добавкой оказалось менее значительным и находится в пределах от 27 до 39 %. Введение биоцидной добавки приводит к повышению прочностных показателей цементного камня, причем на тесте нормальной густоты это изменение составило 12–65 %, а при повышенном водоцементном отношении это изменение более значительно – 29–79 %.

3. Исследование свойств дисперсно-армированных порошково-активированных бетонов – строительных материалов нового поколения.

Для исследований были выбраны составы, приведенные выше в табл. 8. Физико-механические свойства данных составов приведены в табл. 17.

Таблица 17 - Физико-механические свойства фибробетонов

Наименование	Содержание компонентов в составе, масс %						
	Рациональные составы						Прототип
	1	2	3	4	5	6	7
Прочность при изгибе, МПа	33,0	41,0	45,0	43,0	41,0	31,0	10,0
Прочность при сжатии, МПа	100,0	150,0	180,0	170,0	150,0	110,0	50,5
Ударная вязкость, кДж/м ²	3,6	3,7	3,9	4,0	3,8	3,7	2,0
Морозостойкость, циклы	650	650	700	700	750	650	F600
Водонепроницаемость, МПа*10 ⁻¹	18	18	18	18	18	18	W16
Биостойкость	Гриб. *	Фунг. **	Фунг. **	Фунг. **	Фунг. **	Фунг. **	Не грибо- стойкий

Примечание: *Гриб – грибоустойкий; **Фунг. – фунгицидный

Оптимизация расхода компонентов в составе фибробетонной смеси позволила получить фибробетоны с высокими эксплуатационными показателями качества. При применении микрокремнезема снижается расход цемента в бетонах и повышается его прочность за счет снижения пористости цементного камня. При введении же кварцевых порошков различной крупности увеличивается плотность смесей. Пластификатор позволяет увеличить водоредуцирующий эффект, улучшить реологические и технологические свойства смеси. Наибольшее влияние при равномерном распределении по объему оказывают полипропиленовое волокно и стальная фибра на бетонную матрицу, усиливающей контактную зону «цементный камень-заполнитель».

Сопоставление результатов испытаний показывает, что для оптимальных составов фибробетонов с фунгицидными свойствами характерны прочность при сжатии выше на 12 %, морозостойкость выше в 1,7 раза при экономии цемента и микрокремнезема в 1,5 раза и уменьшении расхода волокна от 10 до 30 раз по массе.

4. Заключение

1. Составлен обзор научно-технической литературы отечественных и зарубежных авторов в области исследования деформативности и расчета физико-механических свойств материалов на основе диаграмм «напряжение-деформация», биологического сопротивления и долговечности.

2. Предложено в качестве типа исследуемых диаграмм для цементных композитов выбрать диаграммы с нисходящей ветвью, которые позволяют изучать наряду с упругими упруго-пластические и пластические свойства.

3. Путем проведения физико-механических испытаний образцов из цементного камня получены диаграммы «напряжение-деформация» с нисходящей ветвью. Описано влияние рецептурных факторов (В/Ц-отношения и биоцидной добавки) на основные параметрические точки.

4. Выявлено, что повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 приводит к снижению на 22–30 % прочности на сжатие, вызывает более упругое поведение материала под нагрузкой, значительное (в 4–5 раз) удлинение ниспадающей ветви полной равновесной диаграммы деформирования цементного камня.

5. Введение биоцидной добавки приводит к повышению прочностных показателей цементного камня, причем на тесте нормальной густоты это изменение составило 12–65 %, а при повышенном водоцементном отношении это изменение более значительно – 29–79 %. Повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 для составов на биоцидной добавке приводит к снижению прочности цементного камня на 27–39 %.

6. Установлено, что биоцидные композиции на основе гуанидинсодержащих полимеров проявили высокую активность против широкого спектра микроорганизмов (бактерии, дрожжеподобные и плесневые грибы). Введение добавки Тефлекс не только полностью компенсирует потери прочности, но и повышает ее на ~20 % по сравнению с контролем. Разработанные биоцидные добавки перспективны для использования в условиях повышенного микробиологического риска: подземные сооружения, санитарные и транспортные объекты и другие постройки.

7. Полные равновесные диаграммы деформирования цементного камня с биоцидной добавкой аппроксимирована двумя прямыми и двумя параболами.

8. Показано, что повышение долговечности бетонов нового поколения достигается за счет оптимизации их рецептуры, введения полипропиленовой и стальной дисперсной арматуры, биоцидных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н. И., Круглов В. М., Соловьев Л. Ю. Нелинейное деформирование бетона и железобетона. – Новосибирск: Издательство СГУПС, 2001. – 276 с.
2. Шейкин А. Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
3. Грушко И. М. Прочность бетонов на растяжение / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, С. Т. Рашевский. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1973. – 155 с.
4. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев и др. – Ташкент : Фан, 1991. – 342 с.
5. Iskhakov, I., Frolov, I., Ribakov, Y., 2022. Experimental verification of theoretical stress-strain model for compressed concrete considering post-peak stage // *Materials* 15(17), 6064.
6. Y. Feng, Y. Su, N. Lu, S. Shah, Meta concrete: exploring novel functionality of concrete using nanotechnology, *Eng. Sci.* (2020), <https://doi.org/10.30919/es8d816>.
7. S. Barbhuiya, B.B. Das, Water-soluble polymers in cementitious materials: a comprehensive review of roles, mechanisms and applications, *Case Stud. Constr. Mater.* 19 (2023) e02312, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02312>.
8. N. P. Tran, T. N. Nguyen, T. D. Ngo, The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: a systematic review, *Constr. Build. Mater.* 360 (2022) 129562, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129562>.
9. Javadi A., Jamil T., Abouzari-Lotf, E., Soucek, M. D., & Heinz, H. (2021). Working mechanisms and design principles of comb-like polycarboxylate ether superplasticizers in cement hydration: quantitative insights for a series of well-defined copolymers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(25), 8354–8371.
10. L. Xia, M. Zhou, T. Ni, Z. Liu. Synthesis and characterization of a novel early-strength polycarboxylate superplasticizer and its performances in cementitious system, *J. Appl. Polym. Sci.* 137 (2020) 48906.
11. X. Liu, G. Lai, J. Guan, S. Qian, Z. Wang, S. Cui, F. Gao, Y. Jiao, R. Tao, Technical optimization and life cycle assessment of environment-friendly superplasticizer for concrete engineering, *Chemosphere* 281 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130955>.
12. Muthukumar, M., Mohan, D., 2004. Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments. *J. Appl. Polym. Sci.* 94 (3), 1107–1116.
13. Khalid M. Y, Al Rashid A, Arif Z. U, Akram N, Arshad H, Garcia Marquez FP. Characterization of failure strain in fiber reinforced Composites: under on-Axis and off-Axis loading. *Crystals* 2021;11:216. <https://doi.org/10.3390/cryst11020216>.
14. Dobiszewska M, Schindler AK, Pichór W. Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Constr Build Mater* 2018;177:222–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>.
15. Peng Y, Zhang J, Liu J, Ke J, Wang F. Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Constr Build Mater* 2015;101:482–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046>.
16. Travush V. I., Karpenko N. I., Erofeev V. T., Vatin N. I., Erofeeva I. V., Maksimova I. N., Kondrashchenko V. I., Kesarijskij A. G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer // *Magazine of Civil Engineering*. Volume 95, Issue 3, 2020. – P. 42–48.
17. Saran, ASA, Magudeaswaran P, Mohammed MK. Concrete Microstructure- A Review, vol. 2; 2016.
18. Elsharief A, Cohen MD, Olek J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cem Concr Res* 2003;33:1837–49. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9).
19. Xie Ping J. J, Beaudoin R. B. Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface. *Cem Concr Res* 1991. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90059-Q).
20. Liao K. Y., Chang P. K., Peng Y. N., Yang C. C. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:977–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.019>.
21. Neville A. M. , Brooks J. J. Properties of concrete 2010. <https://doi.org/10.4135/9781412975704.n88>.
22. Erofeev V. T., Vatin N. I., Maximova I. N., Tarakanov O.V., Sanyagina Y. A., Erofeeva I. V., Suzdaltsev O. V. Powder-activated concrete with a granular surface texture // *International journal for computational civil and structural engineering*. – 2022. – № 4. – Т. 18. – P. 49–61.
23. Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater* 2015;101:741–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
24. Tam C. M., Tam V. W. Y., Ng K. M. Optimal conditions for producing reactive powder concrete. *Mag Concr Res* 2010;62:701–16. <https://doi.org/10.1680/mac.2010.62.10.701>.
25. Hassan A. M. T, Jones S. W, Mahmud G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC). *Constr Build Mater* 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>.
26. Chan Y. W., Chu S. H.. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:1167–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.

27. Kang S. T., Lee Y., Park Y. D., Kim J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.012>.
28. Ma J., Orgass M., Dehn F., Schmidt D., Tue N. V. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with or without coarse aggregates. *Proc Int Symp Ultra High Perform Concr* 2004:205–12.
29. Zdeb T. An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes. *Constr Build Mater* 2017;131:758–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.026>.
30. Рабинович Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны. – М. : Стройиздат, 1989. – 176 с.
31. Zhang, L., Zhang, M., Wang, K., Shi, J., Chen, W., Yan, K. Axial compressive behavior of steel-reinforced reactive powder concrete short columns (2022) *Structures*, 46, pp. 433-444.
32. Bu, L., Tang, D. Experimental Study and Numerical Analysis on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with RPC Reinforcement Mesh (2022) *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 38 (4), pp. 601-609.
33. Xu, S., Wu, P., Zhou, F., Li, Q., Zeng, T., Jiang, X. Experimental investigation and numerical prediction on resistance of reactive powder concrete to multiple penetration (2021) *Baozha Yu Chongji / Explosion and Shock Waves*, 41 (6), art. no. 063301.
34. Guo, M., Gao, R. Relationships among the characteristic tensile strain, curing age, and strength of reactive powder concrete (2021) *Materials*, 14 (10), art. no. 2660, .
35. Jia, F., He, K., Wang, W., An, M., Lu, Z. Splitting tensile bonding strength of Reactive Powder Concrete to normal concrete (2016) *Tiedao Xuebao / Journal of the China Railway Society*, 38 (3), pp. 127-132.
36. Cheng, J., Luo, X., Zhuang, Y., Xu, L., Luo, X. Experimental study on dynamic response characteristics of RPC and RC micro piles in SAJBs (2019) *Applied Sciences (Switzerland)*, 9 (13), art. no. 2644, .
37. Ju, Y., Shen, H., Wang, D., Zheng, W. Experimental study on crack resistance of reactive powder concrete beam-column joints (2019) *ZhongnanDaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50 (5), pp. 1203-1209.
38. Cui, B., Wang, K.-K., Zhou, Q.-F., Deng, K.-L., Wei, L.-Y. Experiment on Static and Fatigue Performances of Assembled Concrete-steel Link in Assembled Composite Bridge Deck (2018) *ZhongguoGongluXuebao/China Journal of Highway and Transport*, 31 (12), pp. 106-114.
39. Zhao, C., Wang, K., Zhou, Q., Deng, K., Cui, B. Full-Scale Test and Simulation on Flexural Behavior of Dovetail-Shaped Reactive Powder-Concrete Wet Joint in a Composite Deck System (2018) *Journal of Bridge Engineering*, 23 (8), art. no. 04018051.
40. Pan, W.-H., Fan, J.-S., Nie, J.-G., Hu, J.-H., Cui, J.-F. Experimental Study on Tensile Behavior of Wet Joints in a Prefabricated Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin Reactive-Powder Concrete Layer (2016) *Journal of Bridge Engineering*, 21 (10), art. no. 04016064.
41. Han, L.Z., Zhang, J.Q., Nie, J.G. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2014) *Advanced Materials Research*, 900, pp. 473-482.
42. Zhang, Y., Yan, G., An, M., Zhong, T. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2009) *Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*, 33 (1), pp. 81-85.
43. Yan, R., Du, H., Xu, Y. Mechanical and thermal expansion properties of RPC with steel fibers after exposure to elevated temperatures (2018) *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*, 0.
44. Jin, L., He, P., Fu, Q., Chen, M. Relationship of macro cracks and microstructure of RPC component (2014) *Jiangsu DaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 35 (4), pp. 452-456 and 462.
45. Zhang, M., Zeng, B. Reliability-based calibration of material partial factor of prestressed reactive powder concrete members (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48, pp. 88-97.
46. Cao, X., Peng, J.-C., Jin, L.-Z. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam (2014) *Wuhan LigongDaxueXuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, 36 (1), pp. 116-122.
47. Deng, Z., Chen, C., Chen, X. Experimental research on the shear behaviors of hybrid fiber reinforced RPC beams (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48 (5), pp. 51-60.
48. Deng, Z., Zhou, D., Cheng, S. The shear bear capacity of reactive powder concrete beam with high strength stirrup (2014) *Harbin GongchengDaxueXuebao/Journal of Harbin Engineering University*, 35 (12), pp. 1512-1518.
49. Ji, W., Zhou, C. Shear lag analysis of prestressed RPC box girder (2007) *ZhongguoTiedaoKexue/China Railway Science*, 28 (1), pp. 19-22.
50. He, F., Huang, Z.-Y., Yi, W.-J. Acid-resistance performance of reactive powder concrete (2011) *Journal of Natural Disasters*, 20 (2), pp. 44-49. 4922-21.
51. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design of simple-supported reactive powder concrete railway bridge with span of 32m (2011) *Advanced Materials Research*, 163-167, pp. 904-907.
52. Lu, S.-S., Zheng, W.-Z. Calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars (2010) *Harbin GongyeDaxueXuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, 42 (4), pp. 536-540.

53. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design and experimental study of low-height reactive powder concrete beams (2009) Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal, 42 (5), pp. 96-102.
54. Yan, Z., Ji, W., An, M. Experimental study and full-range analysis of Reactive Powder Concrete T-beams (2009) Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University, 33 (1), pp. 86-90.
55. Панфилов Д. А. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах / Д. А. Панфилов, А. А. Пищулев, К. И. Гимадетдинов. - (Техническое регулирование). - Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - № 3. - С. 80-84.
56. Безгодов И. М., Дмитренко Е. Н. Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 99-104. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104.
57. Рахманов В. А., Сафонов А. А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – № 3. – С. 121–125.
58. Галустов К. З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций / К. З. Галустов. – М.: Физматлит, 2006. – 248 с.
59. Максимова И. Н. Структура и конструкционная прочность цементных композитов: монография / И. Н. Максимова, Н. И. Макридин, В. Т. Ерофеев, Ю. П. Скачков // Москва: Издательство АСВ, 2017. – 400 с.
60. Bragov A. M., Gonov M. E., Lomunov A. K., Balandin V. I. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Chapter 23 In: B. E. Abali and I. Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials, 2020, vol 130. – P. 403–412.
61. Bragov A. M., Konstantinov A. Yu., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Gonov M. E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // Procedia Structural Integrity 28 (2020) 2174–2180.
62. Bragov A. M., Gonov M. E., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Modin I. A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics, 2021, 47(6) 962-967.
63. Gonov M., Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress // Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications. – 2021. – P. 193–211.
64. Gonov M. E., Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lomunov A. K., Filippov A. R. Features of High-Speed Deformation and Fracture of Fine-Grained Concrete Under Tensile Stress // Chapter 5. In: Altenbach H., Eremeyev V. A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. – 2022. – P. 193–211.
65. Варламов А. А., Римшин В. И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 436 с.
66. Pavluk A., Gomon S., Ziatyuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasnii O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen. – 2023. – 65(2). – P. 109–121.
67. Бакушев С. В. Аппроксимация диаграмм деформирования билинейными функциями // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. № 2 (283). – С. 2–11.
68. Бакушев С. В. Аппроксимация диаграмм деформирования квадратичными функциями // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. № 3 (290). – С. 2–14.
69. Bertron A., Duchesne J. Attack of cementitious materials by organic acids in agricultural and agrofood effluents // RILEM State-of-the Art Reports. – 2013.
70. Vupputuri S., Fathepure B. Z., Wilber G. G. and 4 more. Isolation of a sulfur oxidizing Streptomyces sp. from deteriorating bridge structures and its role in concrete deterioration // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2015.
71. Dubravka B., Marijana S., Igor C. Review of microbial corrosion of concrete // Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society. – 2010.
72. Strokova V., Nelyubova V., Rykunova M. and 1 more, Strength and structure of cement stone exposed to domestic chicken coop // Journal of Physics: Conference Series. – 2019.
73. Lapcharatsangroj L., Chalida U.-T. Trial to Determine Durability and Serviceability for Swine Farm in Thailand // MATEC Web of Conferences. – 2018.
74. Barbhuiya S., Kumala D. Behaviour of a sustainable concrete in acidic environment // Sustainability (Switzerland). – 2017.
75. Wei S., Jiang Z., Liu H. and 2 more. Microbiologically induced deterioration of concrete - A review // Brazilian Journal of Microbiology. – 2013.
76. Lanzón, M., García-Ruiz, P. A. Deterioration and damage evaluation of rendering mortars exposed to sulphuric acid // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010,
77. Wei S., Sanchez M., Trejo D. and 1 more. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2010.
78. De Belie N. Microorganisms versus stony materials: A love hate relationship // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010.

79. Yousefi A., Allahverdi A., Hejazi P. Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2014.
80. George R. P., Ramya S., Ramachandran D. and 1 more. Studies on Biodegradation of normal concrete surfaces by fungus *Fusarium* sp. // *Cement and Concrete Research*. – 2013.
81. Soleimani S., Ormeci B., Isgor O. B. Growth and characterization of *Escherichia coli* DH5 α biofilm on concrete surfaces as a protective layer against microbiologically influenced concrete deterioration (MICD) // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2013.
82. Li H., Liu D., Lian B. and 2 more. Microbial Diversity and Community Structure on Corroding Concretes // *Geomicrobiology Journal*. – 2012.
83. Fiertak M., Stanaszek-Tomal E., Kozak A. The growth of fungi and their effect on the behaviour of cement polymer composites // *Advances in Cement Research*. – 2015.
84. Geweely N. S. I. Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over the River Nile, Egypt // *Biodegradation*. – 2011.
85. Биологическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов и др. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. — 193 с.
86. Pereyra A. M., Gonzalez M. R., Rodrigues T. A. and 2 more. Enhancement of biocorrosion resistance of epoxy coating by addition of Ag/Zn exchanged a zeolite // *Surface and Coatings Technology*. – 2015.
87. Munzer C., Belhaj E., Meylheuc T. and 2 more. Effects of bioadmixture on surface characteristics of cement pastes // *Materiaux et Techniques*. – 2015.
88. Vipulanandan C., Liu J. Polymer Coatings for Concrete Surfaces: Testing and Modeling // *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition*. – 2012.
89. Viktoria Il'ina, Valeria Strokova, Vladimir Erofeev, Irina Stepina. Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // *Architecture and Engineering Journal*, Vol 9, № 3, 2024. – P. 53–62.
90. Безгодов, И.М. Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона / И.М. Безгодов, Е.Н. Дмитренко // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2019. – №8. – С.99-104.
91. Черноусов Н.Н. Исследование механики работы мелкозернистого шлакобетона при осевом растяжении и сжатии / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // *Строительные материалы*. – 2014. – № 12. – С. 59–63.
92. Маилян, Д.Р. Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев, С.В. Халезин, А.А. Горцевской // *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. – 2018. – №2.

REFERENCES

1. Karpenko N. I., Kruglov V. M., Soloviev L. Yu. Nonlinear deformation of concrete and reinforced concrete. - Novosibirsk: Publishing house of SUSPS, 2001. - 276 p.
2. Sheikin A. E., Chekhovsky Yu. V., Brusser M. I. Structure and properties of cement concrete. Moscow: Stroyizdat, 1979. - 344 p.
3. Grushko I. M. Tensile strength of concrete / I. M. Grushko, A. G. Ilyin, S. T. Rashevsky. - Kharkov: Publishing house of Kharkov University, 1973. - 155 p.
4. Polystructural theory of composite building materials / V. I. Solomatov, V. N. Vyrovoy, A. N. Bobryshev, et al. - Tashkent: Fan, 1991. - 342 p.
5. Iskhakov, I., Frolov, I., Ribakov, Y., 2022. Experimental verification of theoretical stress-strain model for compressed concrete considering the post-peak stage // *Materials* 15(17), 6064.
6. Y. Feng, Y. Su, N. Lu, S. Shah, Meta concrete: exploring the novel functionality of concrete using nanotechnology, *Eng. Sci.* (2020), <https://doi.org/10.30919/es8d816>.
7. S. Barbhuiya, B.B. Das, Water-soluble polymers in cementitious materials: a comprehensive review of roles, mechanisms, and applications, *Case Stud. Constr. Mater.* 19 (2023) e02312, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02312>.
8. N. P. Tran, T. N. Nguyen, T. D. Ngo, The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: a systematic review, *Constr. Build. Mater.* 360 (2022) 129562, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129562>.
9. Javadi A., Jamil T., Abouzari-Lotf, E., Soucek, M. D., & Heinz, H. (2021). Working mechanisms and design principles of comb-like polycarboxylate ether superplasticizers in cement hydration: quantitative insights for a series of well-defined copolymers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(25), 8354–8371.
10. L. Xia, M. Zhou, T. Ni, Z. Liu. Synthesis and characterization of a novel early-strength polycarboxylate superplasticizer and its performances in cementitious system, *J. Appl. Polym. Sci.* 137 (2020) 48906.
11. X. Liu, G. Lai, J. Guan, S. Qian, Z. Wang, S. Cui, F. Gao, Y. Jiao, R. Tao, Technical optimization and life cycle assessment of environment-friendly superplasticizer for concrete engineering, *Chemosphere* 281 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130955>.

12. Muthukumar, M., Mohan, D., 2004. Optimization of mechanical properties of concrete polymer and mix design recommendation based on design of experiments. *J. Appl. Polym. Sci.* 94(3), 1107–1116.
13. Khalid M. Y, Al Rashid A, Arif Z. U, Akram N, Arshad H, Garcia Marquez FP. Characterization of failure strain in fiber reinforced Composites: under on-Axis and off-Axis loading. *Crystals* 2021;11:216. <https://doi.org/10.3390/cryst11020216>.
14. Dobiszewska M, Schindler AK, Pichór W. Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Constr Build Mater* 2018;177:222–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>.
15. Peng Y, Zhang J, Liu J, Ke J, Wang F. Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Constr Build Mater* 2015;101:482–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046>.
16. Travush V. I., Karpenko N. I., Erofeev V. T., Vatin N. I., Erofeeva I. V., Maksimova I. N., Kondrashchenko V. I., Kesarijskij A. G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer // *Magazine of Civil Engineering*. Volume 95, Issue 3, 2020. – P. 42–48.
17. Saran, ASA, Magudeaswaran P, Mohammed MK. Concrete Microstructure- A Review, vol. 2; 2016.
18. Elsharief A, Cohen MD, Olek J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cem Concr Res* 2003;33:1837–49. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9).
19. Xie Ping J. J, Beaudoin R. B. Effect of aggregate size on transition zone properties at the Portland cement paste interface. *Cem Concr Res* 1991. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90059-Q).
20. Liao K. Y., Chang P. K., Peng Y. N., Yang C. C. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:977–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.019>.
21. Neville A. M., Brooks J. J. Properties of concrete 2010. <https://doi.org/10.4135/9781412975704.n88>.
22. Erofeev V. T., Vatin N. I., Maximova I. N., Tarakanov O. V., Sanyagina Y. A., Erofeeva I. V., Suzdaltsev O. V. Powder-activated concrete with a granular surface texture // *International journal for computational civil and structural engineering*. – 2022. – No. 4. – T. 18. – P. 49–61.
23. Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater* 2015;101:741–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
24. Tam C. M., Tam V. W. Y., Ng K. M. Optimal conditions for producing reactive powder concrete. *Mag Concr Res* 2010;62:701–16. <https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.10.701>.
25. Hassan A. M. T, Jones S. W, Mahmud G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Constr Build Mater* 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>.
26. Chan Y. W., Chu S. H.. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:1167–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.
27. Kang S. T., Lee Y., Park Y. D., Kim J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.012>.
28. Ma J., Orgass M., Dehn F., Schmidt Du, Tue N. V. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with or without coarse aggregates. *Proc Int Symp Ultra High Perform Concr* 2004:205–12.
29. Zdeb T. An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes. *Constr Build Mater* 2017;131:758–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.026>.
30. Rabinovich F. N. Dispersion-reinforced concrete. - Moscow: Stroyizdat, 1989. - 176 p.
31. Zhang, L., Zhang, M., Wang, K., Shi, J., Chen, W., Yan, K. Axial compressive behavior of steel-reinforced reactive powder concrete short columns (2022) *Structures*, 46, pp. 433–444.
32. Bu, L., Tang, D. Experimental Study and Numerical Analysis on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with RPC Reinforcement Mesh (2022) *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 38 (4), pp. 601–609.
33. Xu, S., Wu, P., Zhou, F., Li, Q., Zeng, T., Jiang, X. Experimental investigation and numerical prediction on resistance of reactive powder concrete to multiple penetration (2021) *Baozha Yu Chongji / Explosion and Shock Waves*, 41 (6), art. no. 063301.
34. Guo, M., Gao, R. Relationships among the characteristic tensile strain, curing age, and strength of reactive powder concrete (2021) *Materials*, 14 (10), art. no. 2660, .
35. Jia, F., He, K., Wang, W., An, M., Lu, Z. Splitting tensile bonding strength of Reactive Powder Concrete to normal concrete (2016) *Tiedao Xuebao / Journal of the China Railway Society*, 38 (3), pp. 127–132.
36. Cheng, J., Luo, X., Zhuang, Y., Xu, L., Luo, X. Experimental study on dynamic response characteristics of RPC and RC micro piles in SAJBs (2019) *Applied Sciences (Switzerland)*, 9 (13), art. no. 2644, .
37. Ju, Y., Shen, H., Wang, D., Zheng, W. Experimental study on crack resistance of reactive powder concrete beam-column joints (2019) *ZhongnanDaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50 (5), pp. 1203–1209.
38. Cui, B., Wang, K.-K., Zhou, Q.-F., Deng, K.-L., Wei, L.-Y. Experiment on Static and Fatigue Performances of Assembled Concrete-steel Link in Assembled Composite Bridge Deck (2018) *ZhongguoGongluXuebao/China Journal of Highway and Transport*, 31(12), pp. 106–114.

39. Zhao, C., Wang, K., Zhou, Q., Deng, K., Cui, B. Full-Scale Test and Simulation on Flexural Behavior of Dovetail-Shaped Reactive Powder-Concrete Wet Joint in a Composite Deck System (2018) *Journal of Bridge Engineering*, 23 (8), art. no. 04018051.
40. Pan, W.-H., Fan, J.-S., Nie, J.-G., Hu, J.-H., Cui, J.-F. Experimental Study on Tensile Behavior of Wet Joints in a Prefabricated Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin Reactive-Powder Concrete Layer (2016) *Journal of Bridge Engineering*, 21(10), art. no. 04016064.
41. Han, L.Z., Zhang, J.Q., Nie, J.G. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2014) *Advanced Materials Research*, 900, pp. 473-482.
42. Zhang, Y., Yan, G., An, M., Zhong, T. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2009) *Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*, 33 (1), pp. 81-85.
43. Yan, R., Du, H., Xu, Y. Mechanical and thermal expansion properties of RPC with steel fibers after exposure to elevated temperatures (2018) *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*, 0.
44. Jin, L., He, P., Fu, Q., Chen, M. Relationship of macro cracks and microstructure of RPC component (2014) *Jiangsu DaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 35 (4), pp. 452-456 and 462.
45. Zhang, M., Zeng, B. Reliability-based calibration of material partial factor of prestressed reactive powder concrete members (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48, pp. 88-97.
46. Cao, X., Peng, J.-C., Jin, L.-Z. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam (2014) *Wuhan LigongDaxueXuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, 36 (1), pp. 116-122.
47. Deng, Z., Chen, C., Chen, X. Experimental research on the shear behaviors of hybrid fiber reinforced RPC beams (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48 (5)
48. Deng, Z., Zhou, D., Cheng, S. The shear bear capacity of reactive powder concrete beam with high strength stirrup (2014) *Harbin GongchengDaxueXuebao/Journal of Harbin Engineering University*, 35 (12), pp. 1512-1518.
49. Ji, W., Zhou, C. Shear lag analysis of prestressed RPC box girder (2007) *ZhongguoTiedaoKexue/China Railway Science*, 28 (1), pp. 19-22.
50. He, F., Huang, Z.-Y., Yi, W.-J. Acid-resistance performance of reactive powder concrete (2011) *Journal of Natural Disasters*, 20 (2), pp. 44-49. 4922-21.
51. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design of simple-supported reactive powder concrete railway bridge with a span of 32m (2011) *Advanced Materials Research*, 163-167, pp. 904-907.
52. Lu, S.-S., Zheng, W.-Z. Calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars (2010) *Harbin GongyeDaxueXuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, 42 (4), pp. 536-540.
53. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design and experimental study of low-height reactive powder concrete beams (2009) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 42 (5), pp. 96-102.
54. Yan, Z., Ji, W., An, M. Experimental study and full-range analysis of Reactive Powder Concrete T-beams (2009) *Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*, 33 (1), pp. 86-90.
55. Panfilov, D. A. Review of existing concrete deformation diagrams under compression in domestic and foreign regulatory documents / D. A. Panfilov, A. A. Pishchulev, K. I. Gimadetdinov. - (Technical regulation). - Text: direct // *Industrial and civil engineering*. - 2014. - No. 3. - P. 80-84.
56. Bezgodov, I. M., Dmitrenko, E. N. Improvement of curvilinear concrete deformation diagrams // *Industrial and civil engineering*. 2019. No. 8. P. 99-104. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104.
57. Rakhmanov V. A., Safonov A. A. Development of experimental methods for assessing concrete deformation diagrams under compression // *Academia. Architecture and Construction*. - 2017. - No. 3. - P. 121-125.
58. Galustov K. Z. Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures / K. Z. Galustov. - Moscow: Fizmatlit, 2006. - 248 p.
59. Maksimova I. N. Structure and structural strength of cement composites: monograph / I. N. Maksimova, N. I. Makridin, V. T. Erofeev, Yu. P. Skachkov // Moscow: ASV Publishing House, 2017. – 400 p.
60. Bragov A. M., Gonov M. E., Lomunov A. K., Balandin VI. VI. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Chapter 23 In: B. E. Abali and I. Giorgio (eds.), *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials*, 2020, vol 130. – P. 403–412.
61. Bragov A. M., Konstantinov A. Yu., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Gonov M. E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // *Procedia Structural Integrity* 28 (2020) 2174–2180.
62. Bragov A. M., Gonov M. E., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Modin I. A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // *Materials Physics and Mechanics*, 2021, 47(6) 962-967.
63. Gonov M., Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress // *Advanced Materials Modeling for Mechanical, Medical and Biological Applications*. – 2021. – P. 193–211.

64. Gonov M. E., Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lomunov A. K., Filippov A. R. Features of High-Speed Deformation and Fracture of Fine-Grained Concrete Under Tensile Stress // Chapter 5. In: Altenbach H., Eremeyev V. A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) *Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modeling for Mechanical, Medical and Biological Applications*, vol 155. – 2022. – P. 193–211.
65. Varlamov A. A., Rimshin V. I. *Models of Concrete Behavior. General Theory of Degradation*. – Moscow: INFRA-M, 2019. – 436 p.
66. Pavluk A., Gomon S., Ziatyuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*. – 2023. – 65(2). – P. 109–121.
67. Bakushev S. V. Approximation of strain diagrams by bilinear functions // *Structural Mechanics and Analysis of Structures*. – 2019. No. 2 (283). – P. 2–11.
68. Bakushev S. V. Approximation of strain diagrams by quadratic functions // *Structural Mechanics and Analysis of Structures*. – 2020. No. 3 (290). – P. 2–14.
69. Bertron A., Duchesne J. Attack of cementitious materials by organic acids in agricultural and agrofood effluents // *RILEM State-of-the Art Reports*. – 2013.
70. Vupputuri S., Fathepure B. Z., Wilber G. G. and 4 more. Isolation of a sulfur oxidizing *Streptomyces* sp. from deteriorating bridge structures and its role in concrete deterioration // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2015.
71. Dubravka B., Marijana S., Igor C. Review of microbial corrosion of concrete // Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society. – 2010.
72. Strokova V., Nelyubova V., Rykunova M. and 1 more, Strength and structure of cement stone exposed to domestic chicken coop // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019.
73. Lapcharatsangroj L., Chalida U.-T. Trial to Determine Durability and Serviceability for Swine Farm in Thailand // *MATEC Web of Conferences*. – 2018.
74. Barbhuiya S., Kumala D. Behavior of a sustainable concrete in acidic environment // *Sustainability (Switzerland)*. – 2017.
75. Wei S., Jiang Z., Liu H. and 2 more. Microbiologically induced deterioration of concrete - A review // *Brazilian Journal of Microbiology*. – 2013.
76. Lanzón, M., García-Ruiz, P.A. Deterioration and damage evaluation of rendering mortars exposed to sulfuric acid // *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*. – 2010.
77. Wei S., Sanchez M., Trejo D. and 1 more. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2010.
78. De Belie N. Microorganisms versus stony materials: A love hate relationship // *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*. – 2010.
79. Yousefi A., Allahverdi A., Hejazi P. Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2014.
80. George R. P., Ramya S., Ramachandran D. and 1 more. Studies on Biodegradation of normal concrete surfaces by fungus *Fusarium* sp. // *Cement and Concrete Research*. – 2013.
81. Soleimani S., Ormeci B., Isgor O. B. Growth and characterization of *Escherichia coli* DH5 α biofilm on concrete surfaces as a protective layer against microbiologically influenced concrete deterioration (MICD) // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2013.
82. Li H., Liu D., Lian B. and 2 more. Microbial Diversity and Community Structure on Corroding Concrete // *Geomicrobiology Journal*. – 2012.
83. Fiertak M., Stanaszek-Tomal E., Kozak A. The growth of fungi and their effect on the behavior of cement polymer composites // *Advances in Cement Research*. – 2015.
84. Geweely N. S. I. Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over the River Nile, Egypt // *Biodegradation*. – 2011.
85. *Biological resistance of materials* / V.I. Solomatov, V.T. Erofeev, V.F. Smirnov, et al. – Saransk: Publishing house of Mordovia University, 2001. – 193 p.
86. Pereyra A. M., Gonzalez M. R., Rodrigues T. A. and 2 more. Enhancement of biocorrosion resistance of epoxy coating by addition of Ag/Zn exchanged a zeolite // *Surface and Coatings Technology*. – 2015.
87. Munzer C., Belhaj E., Meylheuc T. and 2 more. Effects of bioadmixture on surface characteristics of cement pastes // *Matériaux et Techniques*. – 2015.
88. Vipulanandan C., Liu J. *Polymer Coatings for Concrete Surfaces: Testing and Modeling* // *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition*. – 2012.
89. Viktoria Il'ina, Valeria Strokova, Vladimir Erofeev, Irina Stepina. Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // *Architecture and Engineering Journal*, Vol 9, No. 3, 2024. – P. 53–62.
90. Bezgodov, I.M. Improvement of curvilinear diagrams of concrete deformation / I.M. Bezgodov, E.N. Dmitrenko // *Industrial and civil engineering*. – 2019. – No. 8. – P. 99–104.
91. Chernousov, N.N. Study of the mechanics of fine-grained cinder concrete under axial tension and compression / N.N. Chernousov, R.N. Chernousov, A.V. Sukhanov // *Construction materials*. – 2014. – No. 12. – P. 59–63.

92. Mailyan, D.R. Deformation properties and parametric points of frame concrete / D.R. Mailyan, G.V. Nesvetaev, S.V. Khalezin, A.A. Gortsevskoy // Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don". - 2018. - No. 2.

Информация об авторах:

Ерофеев Владимир Трофимович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26), Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов.
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Гончарова Маргарита Александровна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения и дорожных технологий кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Тараканов Олег Вячеславович

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры кадастра недвижимости и права.
E-mail: tarov60@mail.ru

Светлов Дмитрий Анатольевич

ООО «Софт Протектор» (195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28, литер Ц, помещ. 1591)
доктор технических наук, директор
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Максимова Ирина Николаевна

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза, Россия,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: maksimova@pguas.ru

Ерофеева Ирина Владимировна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26), Россия,
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Кучин Вячеслав Николаевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2)
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Светлов Д.В.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул, д. 29)
аспирант
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Information about authors:

Erofeev Vladimir T.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26), Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials.
E-mail: erofeevvt@bk.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 of the Department of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Tarakanov Oleg V.

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Real Estate Cadastre and Law.
E-mail: tarov60@mail.ru

Svetlov Dmitry A.

Soft Protector LLC (195030, St. Petersburg, Khimikov St., 28, letter C, room. 1591)
Doctor of Technical Sciences, Director
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Maximova Irina N.

Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: maksimova@pguas.ru

Erofeeva Irina V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26),
Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Kuchin Vyacheslav N.

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II (199106, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 Line, 2)
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Svetlov D.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya Ulitsa, 29)
Postgraduate Student
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2025
Одобрена после рецензирования 19.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 01.11.2025
Approved after reviewing 19.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025