ISSN 2618-9283

СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.24412/2618-9283-

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTION SAFETY

05 2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

www.seismo-construction.ru

Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений
Научно-технический журнал

«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» – сетевое научно-техническое рецензируемое издание, охватывающее весь спектр вопросов в области проектирования, строительства, эксплуатации объектов в сейсмически опасных районах России и стран СНГ.

Миссия журнала – развитие строительной науки в области сейсмостойкого строительства; публикация материалов и результатов фундаментальных исследований и достижений ученых специалистов в области надежности и безопасности зданий и сооружений.

В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) (с 15 февраля 2023);

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки) (с 15 февраля 2023).

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки).

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В действующем Перечне от 15.06.2026 г. под номером 2539. Категория Перечня ВАК – К2, «Белый список» – 2 категория.

С 24 мая 2021 года журнал входит в Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, рецензии, информационные материалы.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI**: 10.37153/2618-9283

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-72754 от 17.05.2018 года. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издатель – Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС) (http://raee.su).

Учредитель – А.А. Бубис.

Сайт сетевого издания: http://seismoconstruction.ru

Адрес Издателя и редакции: 109428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-75-82; 8-916-959-31-27; e-mail: info@raee.su

Периодичность: 6 раз в год.

Даты выхода в свет: февраль, апрель, июнь, август, октябрь, декабрь.

Earthquake engineering. Constructions safety
Scientific and technical journal

«Earthquake engineering. Constructions safety» is a network scientific and technical peer-reviewed publication covering the entire range of issues in the field of design, construction and operation of facilities in seismically dangerous areas of Russia and the CIS countries.

The mission of the journal is to develop the science of earthquake-resistant construction; to publish materials and results of fundamental research and achievements of scientists in the field of reliability and safety of buildings and structures.

The journal publishes articles on the following scientific specialties and related branches of science:

2.1.1 – Building structures, buildings and structures (technical sciences);
2.1.2 – Foundations, underground structures (technical sciences);
2.4.9 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences) (from February, 15, 2023);
1.6.1 – General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (geological and mineralogical sciences) (from February, 15, 2023);
1.6.7 – Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences).

Included in the List of peer-reviewed scientific publications, where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences, approved by Supreme Attestation Commission (VAK) of the Ministry of education and science.

In the current List of 10.06.2026 it is under the 2539 position. VAK list category – C2, "Whitelist": category К2.

Since May 14, 2021 included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal accepts for publication: original articles, reviews, discussion materials, comments, reviews, informational materials.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI:** 10.37153/2618-9283
Certificate of registration EL № FS 77-72711 dated 17.05.2018. Registered by the Federal service for supervision of communications, information technologies and mass communications (Roskomnadzor).
Publisher: Russian Association for earthquake-resistant construction and protection from natural and manmade hazards (RAEE) (http://raee.su).
The Founder: Alexander A. Bubis.
Website of the online publication: http://seismocons truction.ru
Address of the Publisher and **editorial office**: 109428, Moscow, ul. 2-ya Institutskaya, house 6, building 3; Phone: 8-499-174-75-82; 8(916)959-51-27; e-mail: info@raee.su
Frequency: 6 times a year.
Release dates: February, April, June, August, October, December.

Главный редактор
Ведяков И.И., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН
(Москва, Российская Федерация)
Заместитель главного редактора
Бубис А.А., кандидат технических наук
(Москва, Российская Федерация)
Ответственный секретарь редколлегии
Смирнова Л.Н., кандидат технических наук
(Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Акулов Н.И., доктор геолого-минералогических наук
(Иркутск, Российская Федерация)
Алешин А.С., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)
Бегалиев У.Т., доктор технических наук, профессор
(Бишкек, Кыргызская Республика)
Белаш Т.А., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)
Нада Акира, доктор, профессор
(Токио, Япония)
Вознесенский Е.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Гусев Б.В., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН
(Москва, Российская Федерация)
Захаров В.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Ильичев В.А., доктор технических наук, профессор, академик РАСН
(Москва, Российская Федерация)
Клементе Паоло, доктор, профессор
(Рим, Италия)
Кривцов Ю.В., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Лапин В.А., кандидат технических наук, профессор
(Алматы, Республика Казахстан)
Немчинов Ю.И., доктор технических наук, профессор
(Киев, Республика Украина)
Погрузинская Фарсанги Исан, доктор, профессор
(Керман, Иран)
Павленко О.В., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)
Римшин В.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Семенов В.А., доктор технических наук, профессор

(Москва, Российская Федерация)
Гонких Г.П., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Уздин А.М., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)
Хакимов Ш.А., кандидат технических наук, профессор
(Ташкент, Республика Узбекистан)
Хачян Э.Е., доктор технических наук, профессор
(Ереван, Республика Армения)
Чеверев В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)
Чимелларо Джан Паоло, associate professor
(Турин, Италия)
Эрцен И., доктор, профессор
(Любляна, Республика Словения)

«EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTION SAFETY»

Editor-in-Chief
Vedyakov I.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
(Moscow, Russian Federation)
Deputy editor-in-Chief
Bubis A.Z., Cand. Sci. (Engineering)
(Moscow, Russian Federation)
Executive Secretary
Smirnova L.N., Cand. Sci. (Engineering)
(Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Akulov N.I., Dr. Sci. (Geology), Professor (Irkutsk, Russian Federation)
Alekhin A.S., Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor
(Moscow, Russian Federation)
Begaliev U.T., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Bishkek, Republic of Kyrgyzstan)
Belash T.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Saint Petersburg, Russian Federation)
Wada Akira, PhD, Professor Emeritus (Tokyo, Japan)
Voznesenskii E.A., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)
Gusev B.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
Zakharov V.S., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)
Il'ichev V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)
Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)
Krivtsov Yu.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)
Lapin V.A., Cand. Sci. (Engineering), Professor (Almaty, Republic of Kazakhstan)
Nemchinov Yu.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Kiev, Ukraine)
Norpozhejad Farsangi Ehsan, PhD of Civil Engineering, Professor
(Kerman, Iran)
Pavlenko O.V., Dr. Sci. (Mathematics and Physics) (Moscow, Russian Federation)
Rimshin V.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)
Semenov V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)
Tonkikh G.P., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)
Urgin A.M., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Saint Petersburg, Russian Federation)
Khalimov Sh., PhD (Engineering), Professor (Tashkent, Republic of Uzbekistan)
Khachiyan E.E., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Yerevan, Republic of Armenia)
Cheverev V.G., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)
Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)
Emri Igor, PhD, Professor (Ljubljana, Republic of Slovenia)

СОДЕРЖАНИЕ
№5 2026

Теоретические и экспериментальные исследования

Лаалай Файсал, Ведяков Михаил Иванович, Бережной Дмитрий Валерьевич, Сабитов Динар Салихзанович, Султанов Ленар Усманович **9**
Численное исследование деформационных характеристик стеклопластика с бетоном в условиях циклического воздействия

Стельмах Сергей Анатольевич, Оганесян Самсон Эдуардович, Шилов Александр Андреевич, Развеева Ирина Федоровна, Погребняк Анастасия Анатольевна **22**
Исследование ударной стойкости полимерного бетона, дисперсно армированного растительными волокнами

Изображение на обложке из: https://sputnik.by/20240719/trinadtsat-chelovek-pogibli-iz-za-zemletryaseniya-v-yaponii-1109490025.html

12+
ISSN 2618-9283
(c) РАСЭ, 2026

CONTENTS
No. 5–2026

Theoretical and experimental studies

Laalai Faisal, Mikhail I. Varyukhov, Dmitry V. Berezhnoy, Linar S. Salatov, Lenar U. Sultanov **9**
Numerical investigation of the frictional characteristics of the glass-fiber-reinforced plastic-concrete interface under dynamic interaction conditions

Sergey A. Shelyakh, Samson A. Ogannesyan, Alexander A. Shilov, Irina F. Razveeva, Anastasia A. Pogrebnyak **22**
Study of the impact resistance of geopolymer concrete dispersely reinforced with plant fibers

The image on the cover is from https://sputnik.by/20260729/trinadtsat-chelovek-pogibli-iz-za-zemletryaseniya-v-yaponii-1109490025.html

12+
ISSN 2618-9283
(c) ГАСС, 2026

УДК. 624.9
DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-09-21

Теоретические и экспериментальные исследования

Численное исследование функционных характеристик стеклопластика с бетоном в условиях динамического взаимодействия

Лаалай Файсал[1], Ведяков Михаил Иванович[2], Бережной Дмитрий Валерьевич[1], Сабитов Линар Шамилович[3,4], Султанов Ленар Усманович[1]

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет.
Казань, Российская Федерация

[2] ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»
Москва, Российская Федерация

[3] Казанский государственный энергетический университет
Казань, Российская Федерация

[4] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Арматура из стеклопластика представляет собой перспективный материал для применения в условиях повышенной коррозионной агрессивности. Он не только снижает массу конструкций, но и обеспечивает их высокую прочность и коррозионную стойкость.
Цель. Целью исследований является верификация теоретических, экспериментальных и численных исследований в различных программных комплексах, реализующих метод конечных элементов.
Материалы и методы. В данной статье проводится исследование, направленное на определение максимальной силы вырывания стеклопластиковой арматуры из бетона В30 с использованием метода испытания на растяжение (pull-out).
Результаты. Основное внимание уделяется анализу зоны трещинообразования в месте пересечения бетона и стеклопластиковой арматуры. Для численного моделирования механических характеристик бетона В30, армированного стекловолокном, применялись две современные программы конечно-элементного анализа: ABAQUS 6.12 и ANSYS 14.5.
Выводы. Представлен сравнительный анализ результатов, полученных с использованием указанных программных комплексов, что позволяет сделать обоснованные выводы о надежности и эффективности применения стеклопластиковой арматуры в строительных конструкциях.

Ключевые слова: арматура, стеклопластик, конечные элементы, бетон, трещина, динамические нагрузки, ABAQUS 6.12, ANSYS 14.5

Для цитирования: Лаалай Ф., Ведяков М.И., Бережной Д.В., Сабитов Л.С. Султанов Л.У. Численное исследование функционных характеристик стеклопластика с бетоном в условиях динамического взаимодействия // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2026. № 5. С. 00–00. **DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-09-21**

@ Laalai F., Vedyakov M.I., Berezhnoy D.V., Sabitov L.S., Sultanov L.U. 2026

Вклад авторов
Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Theoretical and experimental studies

Numerical investigation of the frictional characteristics of the glass-fiber-reinforced plastic–concrete interface under dynamic interaction conditions

Laalai Faisal[1], Mikhail I. Vedyakov [2], Dmitry V. Berezhnoy [1], Linar S. Sabitov [3,4], Lenar U. Sultanov [1]

[1] Kazan (Volga Region) Federal University. Kazan, Russian Federation
[2] V.A. Kucherenko Central Research Institute for Building Structures (TSNIISK), JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation
[3] Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russian Federation
[4] National Research Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. Glass-fiber reinforced polymer (GFRP) rebar is a promising material for use in highly corrosive environments. It not only reduces structural weight but also ensures high strength and corrosion resistance.

Aim. The aim of this study is to verify theoretical, experimental, and numerical analyses conducted using various software packages based on the finite element method.

Materials and methods. This article investigates the maximum pull-out force required to extract GFRP rebar from B30 concrete, utilizing the pull-out test method.

Results. Particular attention is paid to analyzing the cracking zone at the interface between the concrete and the GFRP rebar. Two modern finite element analysis software packages – ABAQUS 6.12 and ANSYS 14.5 – were used to numerically model the mechanical characteristics of B30 concrete reinforced with glass fiber.

Conclusions. A comparative analysis of the results obtained using these software packages is presented, enabling well-founded conclusions regarding the reliability and effectiveness of using GFRP rebar in structural applications.

Keywords: reinforcement, glass fiber-reinforced polymer (GFRP), finite elements, concrete crack, dynamic loads, ABAQUS 6.12, ANSYS 14.5

For citation: Laalai F., Vedyakov M.I., Berezhnoy D.V., Sabitov L.S., Sultanov L.U. Numerical study of the frictional characteristics of GFRP and concrete under dynamic interaction. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2026, no. 5, pp. 009–021. [In Russian]
DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-09-21

Author contribution statement
All authors contributed equally to the publication.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Введение
Современные композитные материалы с армированным стекловолокном (GFRP) эффективны в бетонных конструкциях, но их потенциал ограничен при наличии трещин. Исследование разработало трехмерную модель на основе метода конечных элементов в программных комплексах ABAQUS 6.12 и ANSYS 14.5 для анализа поведения соединений GFRP с бетоном класса B30. Модель верифицирована экспериментально, что обеспечило высокую достоверность данных. Исследование способствует развитию методов численного моделирования и оптимизации бетонных конструкций с использованием композитов, улучшая их эксплуатационные характеристики и долговечность.

Экспериментальные исследования
Эксперимент по методике извлечения бруска из куба (KILEM /GFB/1B) по ГОСТ 31938-2012 включал пять образцов стеклопакетов толщиной 6 мм. Испытания проводились на установке с мобильной и стационарной платформами, скорость перемещения клапана составляла 1 мм/минуту. Результаты фиксировались с помощью циферблатных индикаторов. Образцы мелкозернистого бетона класса B30 размером 100x100x300 мм использовались для оценки силы адгезии по тангенциальным напряжениям [1].

Постановка задачи
Взаимодействие между этими двумя материалами может быть встроено или задано поведением склеивания. Вложенный вариант соответствует поведению идеального соединения, которое подразумевает жесткое соединение между стержнем и бетонными узлами. Одним из вариантов является моделирование взаимодействия бетона и стеклопластиковой арматуры (GFRP) с использованием закона проскальзывания сцепления. Доступны два варианта моделирования поведения адгезии на границе раздела (стеклопластик-бетон): когезионный элементы и контакт со сцепленным поведением. Использовать когезионное поведение на основе поверхности проще, чем когезионные элементы, и оба дают одинаковые результаты. Для более сложных взаимодействий лучше выбрать когезионный элемент. В этом случае поведенческий поверхностный элемент выбирается из-за простоты контактного взаимодействия. Соотношение напряжения и проскальзывания, предложенное [2]

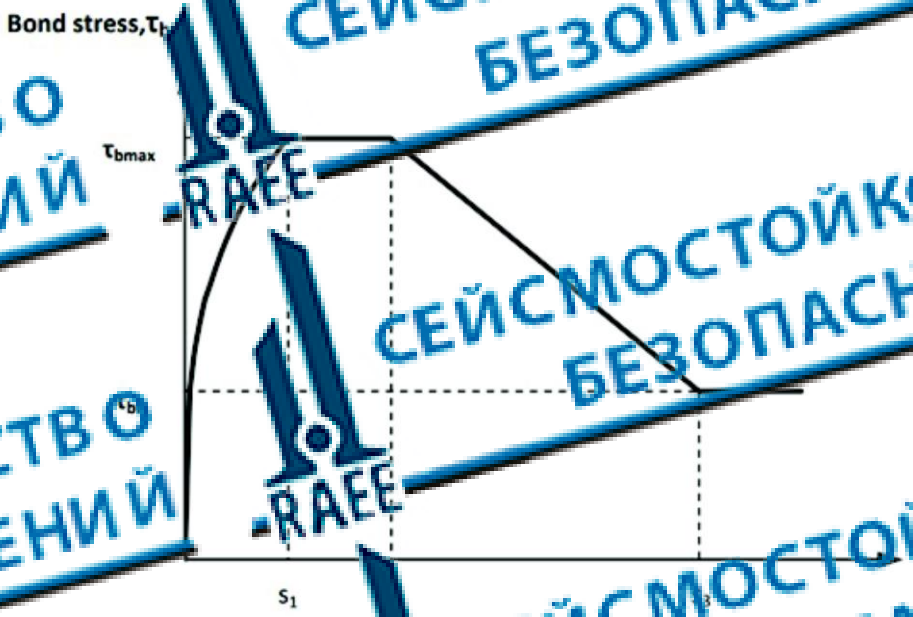


Рисунок 1 – Bond slip model предложенная [2]
Figure 1 – Bond slip model suggested by [2]

Теоретической основой моделирования взаимодействия арматуры с бетоном является концепция сцепления, которая позволяет прогнозировать поведение системы при различных нагрузках и условиях эксплуатации. На рис. 1 представлена модель проскальзывания сцепления, разработанная [2]. В этой модели начальная стадия проникновения ребер арматуры в растворную матрицу характеризуется восходящей частью кривой, которая достигает максимального напряжения. За этим максимумом следует плато, характерное для монолитного бетона, что свидетельствует о достижении предельной прочности сцепления. Наконец, нисходящая часть кривой отражает снижение прочности сцепления при сдвиге бетонных перекрытий между ребрами до достижения постоянного остаточного уровня, соответствующего пределу прочности фрикционной связи.

В строительстве обычно изучается, как арматура (металлические стержни) взаимодействует с бетоном. Для этого используют метод, заключающийся в наблюдении за сопротивлением бетона во время смещения арматуры вдоль него. Этот метод называется механическими теориями связывания, и показывает, как смещение арматуры (s) влияет на силы сцепления между арматурой и бетоном.

$$\tau_{bs} = f(s) \quad (1)$$

$$\tau_{bs} = \beta_1 \beta_2 \frac{s}{1+\alpha s} \quad (2)$$

Эта связь показана на рис. 2 [3], где α и β – параметры сцепления.

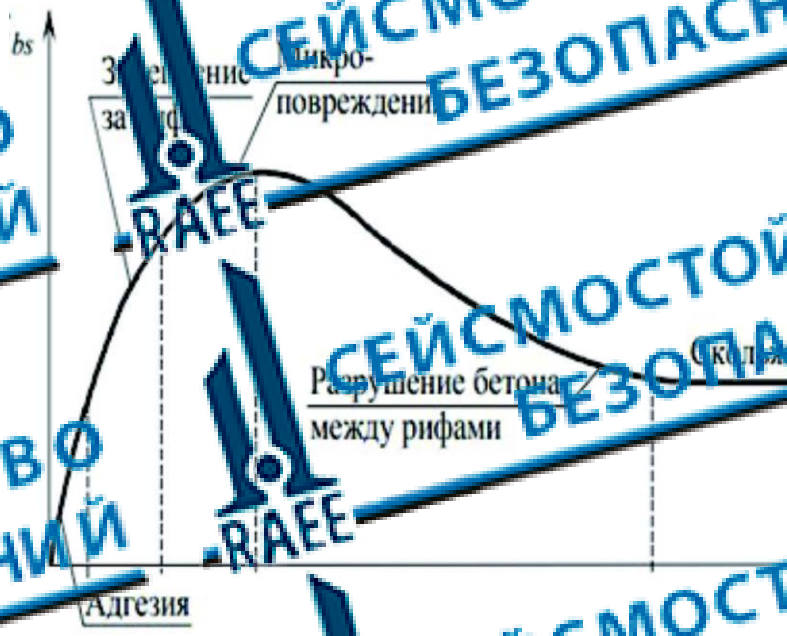


Рисунок 2 – Стадии работы бетона в зоне сцепления с профилированной арматурой [3]
Figure 2 – Stages of concrete operation in the area of adhesion to profiled reinforcement [3]

В.Л. Нилитиным [4] был предложен деформационный закон сцепления:

$$\tau_{bs} = k\varepsilon_g \quad (3)$$

где ε_g определяется как:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_a - \varepsilon_c(x) \quad (4)$$

ε_a – деформаций арматура, ε_c – деформация бетона.

Экспериментами В.Г. Диаковского показано [5], что традиционная зависимость не применима к канатному армированию. Это привело к критическому анализу и развитию деформационного подхода, результатом которого стал оригинальный закон сцепления

$$\tau_{bs} = a_D \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_0}\left(\ln \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_0}\right)^{\frac{b_D-1}{b_D}} \quad (5)$$

Где a_D и b_D – характеристики сцепления; ε_0 – начальная относительная деформация предварительного натяжения каната.

В программе конечных элементов (ABAQUS, ANSYS) предусмотрено два метода моделирования взаимодействия интерфейсов, а именно когезионный элемент и когезионный контакт [6,7]. Метод когезионного контакта использовался для определения когезионных свойств поверхности раздела между стекловолокном и бетоном. Критерий закона отрыва при растяжении для получения моделей возможных повреждений на границе раздела с использованием критерия повреждения при сдвиге и растяжении [6,7].

В смешанном режиме будет лучше описать реакцию интерфейса между стекловолокном и бетоном с помощью σ_I, δ_I, обозначая напряжения и относительные перемещения в нормальном режиме, а σ_{II} и δ_{II} указывают напряжения и относительные перемещения в режиме чистого сдвига. Конкретно выражения отображены в виде

уравнений (6) и (7). Относительное смещение в смешанном режиме определяется, как показано в уравнении (8).

$$\delta_I = max(\delta_1, \delta_2) \quad (6)$$

$$\delta_{II} = \sqrt{\delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (7)$$

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} \quad (8)$$

Где δ_1 обозначает нормальное смещение на границе раздела, а δ_2 и δ_3 обозначают тангенциальное смещение на этой границе. Для определения начала повреждения интерфейса применялся квадратичный критерий, который представлен в уравнении (9). Смещение, вызывающее повреждение δ_m^e, описывается уравнением (10).

$$\left(\frac{max(\sigma_I,0)}{\sigma_I^{max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{II}^{max}}\right) = 1 \quad (9)$$

$$\delta_m^e = 1/\sqrt{\left(\frac{K_I cosI}{\sigma_I^{max}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II} cosII}{\sigma_{II}^{max}}\right)^2} \quad (10)$$

$$cosI = \delta_I/\delta_m \quad (11)$$

$$cosII = \sigma_{II}/\delta_m \quad (12)$$

$$K_I = \sigma_I^{max}/\delta_I^{max} \quad (13)$$

$$K_{II} = \sigma_{II}^{max}/\delta_{II}^{max} \quad (14)$$

Где σ_I^{max} и σ_{II}^{max} представляют пиковые напряжения в чисто нормальной и чисто сдвиговой модах, δ_I^{max} и δ_{II}^{max} обозначают относительные перемещения, соответствующие пиковым напряжениям в чисто нормальной и чисто сдвиговой модах. Кроме того, $cosI$ и $cosII$ являются направленными косинусами, как показано в уравнениях (11) и (12). δ_m указывает эффективную величину граничного смещения в смешанном режиме при нагружении, δ_I и δ_{II} указывают значения относительного смещения, соответствующие значениям эффективного смещения разделения в чисто нормальном режиме и чисто сдвиговых поверхностях, во время смешанного режима. Кроме того, K_I и K_{II} обозначают межфазную нормальную жесткость и жесткость на сдвиг и выражаются уравнениями (13) и (14). Для развития повреждения используется форма Benzeggagh-Kenane (B-K) на основе энергии [32] с конкретным выражением, выраженным в виде уравнения (15).

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^a + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^a = 1 \quad (15)$$

$$G_I = \frac{1}{2\sigma_I^Y \delta_m^f cosI} \quad (16)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2\sigma_{II}^Y \delta_m^f cosII} \quad (17)$$

$$G_{Ic} = \frac{1}{2\sigma_I^{max}\delta_I^f} \quad (18)$$

$$G_{IIc} = \frac{1}{2\sigma_{II}^{max}\delta_{II}^f} \quad (19)$$

$$\sigma_I^Y = K_I \delta_m^f cosI \quad (20)$$

$$\tau_{II} = K_{II}\delta_m^{II}\cos II \quad (21)$$

Где G_I и G_{II} обозначают критические скорости энерговыделения смешанной моды, соответствующие скоростям энерговыделения на чисто нормальной и чисто сдвиговой поверхностях. Конкретные выражения показаны в уравнениях (16) и (17), G_{Ic} и G_{IIc} представляют собой скорости выделения критической энергии в режимах чистого нормального и чистого сдвига, как показано в уравнениях (18) и (19). Далее δ_I^f и δ_{II}^f обозначают значения относительных перемещений разрушения границы раздела в чисто нормальном и чисто сдвиговом режимах. Кроме того, σ_I^f и σ_{II}^γ указывают на напряжения текучести, соответствующие точке инициации повреждения в чисто нормальном режиме и чисто сдвиговых поверхностях во время смешанного режима и выражаются в уравнениях (20) и (21). Кроме того, δ_m^f представляет относительное смещение, соответствующее полному разделению границы раздела в смешанном режиме, а α указывает параметр формы Бенеггagh-Kenane (B-K).

Деградация жесткости интерфейса была описана путем введения параметра повреждения D, который выражается следующим образом:

$$D = \frac{\sigma_m^f(\delta_m - \delta_m^e)}{\delta_m(\sigma_m^f - \delta_m^e)} \quad (22)$$

Так, в приведенном выше уравнении всего семь неизвестных параметров: $\delta_I^f, \delta_{II}^f, \sigma_I^{max}, \sigma_{II}^{max}, \delta_I^{max}, \delta_{II}^{max}$. В этом исследовании в соответствии с полученной кривой связи скольжения и параметрическим анализом модели конечных элементов, $\sigma_I^{max} = \sigma_{II}^{max} = \overline{\tau_u}$, $\delta_I^{max} = \delta_{II}^{max} = s_u$ [9], $\delta_I^f = s_r$, α =2 [9, 10] могут лучше имитировать результаты испытаний.

Моделирование методом конечных элементов

В этом исследовании для проверки прочности материалов мы используем специальные компьютерные программы, такие как ABAQUS 6.12 и ANSYS 14.5. Эти программы очень популярны среди ученых и позволяют решать разные задачи. Мы создали трехмерную модель, используя маленькие шестиугольные элементы, которые могут менять свою форму. Мы выбрали такую конфигурацию после тщательного анализа, чтобы наша модель была максимально точной и эффективной. Это помогает нам лучше понять, как материалы ведут себя под нагрузкой.

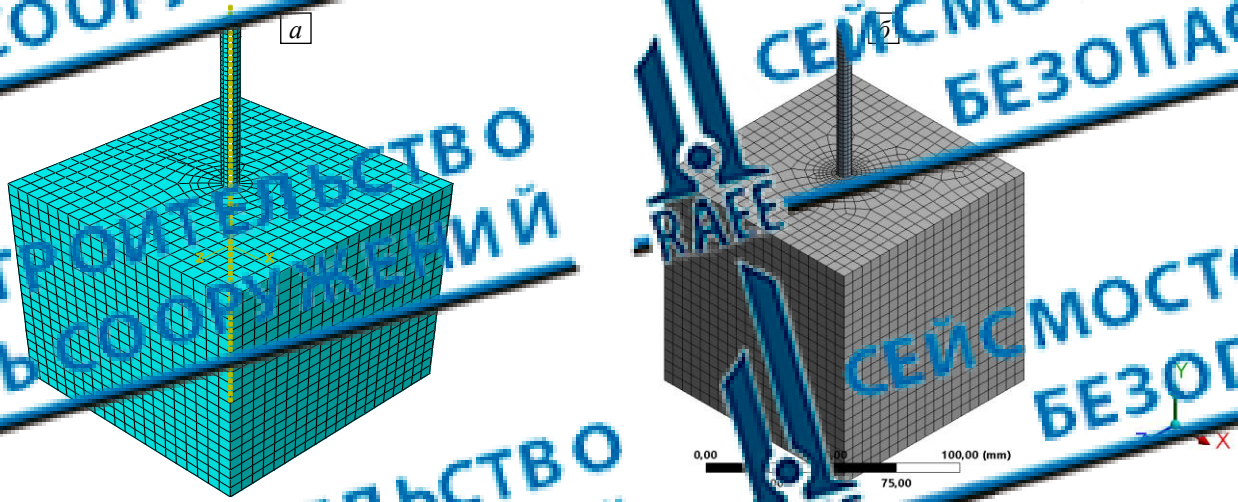


Рисунок 3 – *а)* сетка из бетона (ABAQUS 6.12); *б)* сетка из бетона (ANSYS 14.5)
Figure 3 – *a)* concrete mesh (ABAQUS 6.12); *b)* concrete mesh (ANSYS 14.5)

Таблица 1 – Свойства материала [10]
Table 1 – Properties of the material [10]

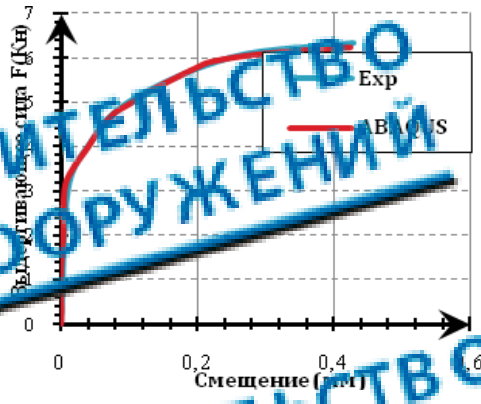
Материалы	Модуль Юнга / МПа	массовая плотность/(Кг/м^3)	Коэффициент Пуассона
Бетон В30	32000	2300	0.2
Стекловолокно	56000	2200	0.22

Анализ результатов и примеры

На основании анализа экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на скольжение композитных материалов, используемых в судостроении (а именно стеклопластика) по сравнению с традиционными бетонными конструкциями, можно констатировать, что численные модели, реализованные в программных комплексах ABAQUS и ANSYS, демонстрируют высокую степень корреляции с экспериментальными результатами. Данный вывод свидетельствует о верификации и надежности применяемого методологического подхода к оценке фрикционных характеристик материалов в условиях динамического взаимодействия с водной средой.

Таблица 2 – Результаты таблицы испытаний – численное моделирование
Table 2 – Test table results – numerical modeling

Экспериментальный			ABAQUS			ANSYS		
Выдергивающее усилие *F*, кН	Максимальное смещение стержня до выдергивания Δ, мм	Касательные напряжения τ, мПа	Выдергивающее усилие *F*, кН	Максимальное смещение стержня до выдергивания Δ, мм	Касательные напряжения τ, мПа	Выдергивающее усилие *F*, кН	Максимальное смещение стержня до выдергивания Δ, мм	Касательные напряжения τ, мПа
6.32	0.428	11.178	6.23	0.453	11.17	0.2567	0.450	11.12



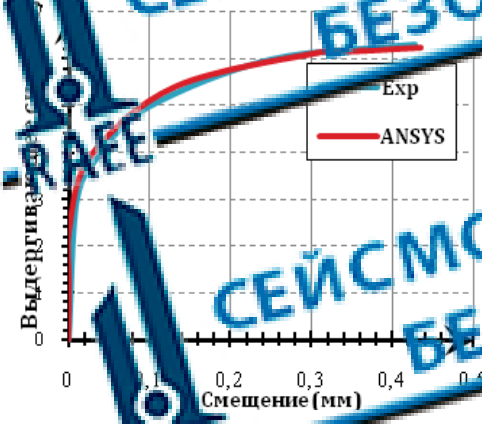


Рисунок 4 – Экспериментальные и численные результаты (ABAQUS, ANSYS) для бетона В30

Figure 4 – Experimental and numerical results (ABAQUS, ANSYS) for B30 concrete

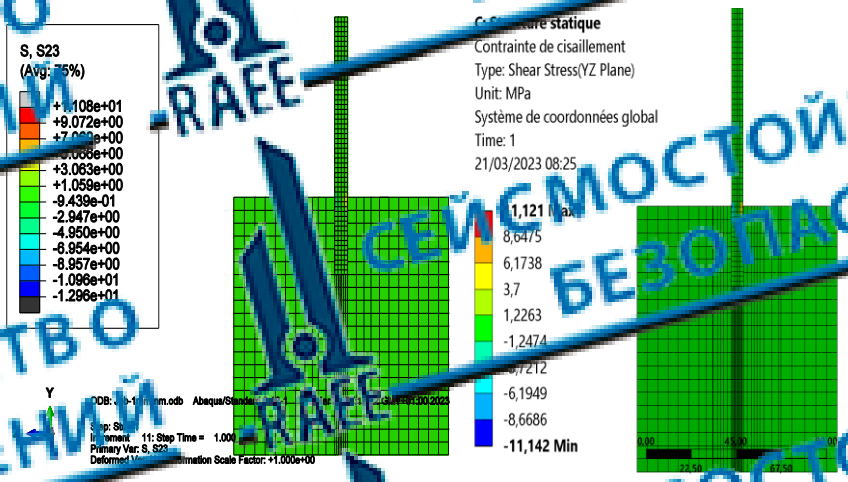


Рисунок 5 – Касательные напряжения (ABAQUS, ANSYS)
Figure 5 – Shear stresses (ABAQUS, ANSYS)

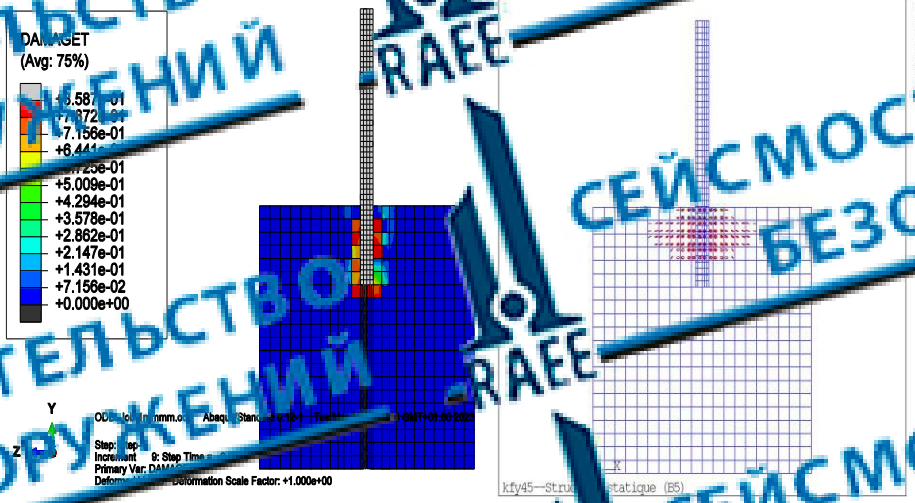


Рисунок 6 – Эволюция трещины бетона B30 на (ABAQUS, ANSYS)
Figure 6 – Evolution of concrete crack B30 (ABAQUS, ANSYS)

Выводы

В данной статье представлено тщательное исследование, демонстрирующее удовлетворительное согласование теоретических выводов с экспериментальными наблюдениями и данными. Разработанная нелинейная конечно-элементная модель, реализованная с использованием передовых вычислительных инструментов (ANSYS 14.5 и ABAQUS 6.12), позволяет проводить детальный анализ механического поведения высокопрочного бетона класса B30, армированного композитным материалом на основе стеклопластика (GFRP).

Список литературы

1. Зиннуров Т.А., Писаренов А.А., Сабиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Яковлев Д.Г. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. Том 7. № 4. 2015. С. 1–12 http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf. DOI: 10.15862/11TVN415
2. Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations experimental results and analytical model. Berkeley: University of California, 1983, p. 169. DOI:10.18419/opus-8473
3. Попов А.М., Самошкин А.С., Тихомиров В.М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 1. Экспериментальные и аналитические методы // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. Вып. 2 (57). 2021. С. 53–60. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_53
4. Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Мамонтов С.А., Коломейкова И.И., Печников А.С., Никитин В.С. Аналитическое исследование величины сцепления цементного геля между арматурой и бетоном // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. Т. 26. Вып. 3. 2020. С. 483–495. DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.483-495
5. Диаковский В.Г. Деформационные характеристики и расчет усилий взаимодействия арматурных канатов с бетоном: автореф. дисс. … канд. техн. наук. Новосибирск, 1987. 20 с.
6. Николюкин А.Н. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной арматуры: автореф. дис. … канд. техн. наук. Тамбов, 2021. 00 с.
7. Wei J., Yang Q., Yu Y., Wang Q., Zhu L., Chen F. Study of Bond–Slip Behavior and Constitutive Model of a New M-Section Steel-Skeleton Concrete. *Materials,* 2022, 15, 6776. https:// doi.org/10.3390/ma15196776
8. Nasiri E., Liu Y. The Out-of-Plane Behaviour of Concrete Masonry Infills Bounded by Reinforced Concrete Frames. *Engineering Structures*, 2019, pp. 406-430. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.098
9. Simulia ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.14; Dassault Systèmes Simulia Corp.: Johnston, RI, USA, (2013)
10. Jiang W.-G, Hallett S.R, Green B.G., Wisnom M.R. A Concise Interface Constitutive Law for Analysis of Delamination and Splitting in Composite Materials and Its Application to Scaled Notched Tensile Specimens. *Int. J. Numer. Methods Eng.,* 2007, 69, 1982–1995.7
11. Bui Q.V. A Modified Benzeggagh-Kenane Fracture Criterion for Mixed-Mode Delamination. *Journal of Composite Materials*, 2011, pp. 389–413 DOI: 10.1177/0021998310376105
12. Zaroti M.A., Elmadawy M. Effect of glass-fiber rods on the ductile behavior of reinforced concrete beams. *Alexandria Engineering Journal* (2018), DOI:10.1016/j.aej.2018.03.012
13. Luna Molina F.J., Fernández-Ruiz M.A., Hernández Montes E., Alonso-Alonso M.C. Bond strength of galvanized steel: experimental and numerical study based on pull-out tests. Conference: *Third International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering*. University of Seville (Spain) pp. 143-158. ISBN: 978-84-606-9356-7
14. Dassault and Systemes, Abaqus 6.13 CAE User's manual, (2013).
15. Gopinath S., Ramachandra Murthy A., Iyer N.R., Shahul Ameed E.K. Constitutive Modeling and Numerical Simulation Of FRP Confined Concrete Specimens. *Kuwait Journal of Civil Engineering*, 2014, pp. 31–36. DOI:10.2478/sjce-2014-0005
16. Budahazy V., Dunai L., Parameter-refreshed Chaboche model for mild steel cyclic plasticity behavior. *Periodica Polytechnica Civil Engineering,* 2013, DOI:10.3311/PPci.7170
17. Najafgholipour M., Dehghan S.M., Dooshabi A., Aruabian E., Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017, pp. 1200–1225. DOI:10.1590/1679-78253682

18. Quayyum S. Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete, B.Sc. Bangladesh University Engineering & Technology, Bangladesh (2006)
19. Xiong Y., Wang K., Li Z., Yang Z. Effect of Coating Thickness on Bond Behaviors of Polymer Cement Coated Plain Steel Bar with Concrete and Finite Element Modeling. *The Open Civil Engineering Journal,* 2016, pp. 571–577. DOI:10.2174/1874149501610010571
20. Hongshuai L., Zhenqing W., Bo Zhou, Tong L. Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on composite based on cohesive zone model. *Material & Design*, 2012, pp. 138–145. DOI:10.1016/j.matdes.2012.03.037
21. Dongpo W., Dongsheng W., Chaojun O., Siming H. Simulation analysis of large-diameter post-installed anchors in concrete. *Construction and Building Materials*, 2017, pp. 558–565. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.149
22. Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Collaboration of polymer composite reinforcement and cement concrete, *Journal of Physics Conference Series* (2018) DOI:10.1088/1742-6596/991/1/012044

References

1. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Yakovlev I.G. Numerical modeling of the adhesion of composite reinforcement to concrete // Internet journal "SCIENCE" Vol. 7, No. 4 (2015) http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf (free access). Cap. from the screen. Language Russian, English DOI: 10.15862/11TVN415
2. Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Experimental results and analytical model. Berkeley: University of California, 1983, p. 159. DOI: 10.18419/opus-8473
3. Popov A.M., Sanochkin A.S., Tikhomirov V.M. Research Methods of Reinforcement with Concrete Interaction. Part 1. Experimental and Analytical Methods. Bulletin of the Siberian State University of Communications, 2021, pp. 53–60. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_53 [In Russian].
4. Nikolyukin A.N., Yartsev V. P., Matsnev S. A., Kolomnikova I. S., Pechnikov A. S., Nikitin N.O. The Analytical Study of the Value of Adhesion of Cement Gel between Reinforcement and Concrete. Bulletin of the Tambov State University, 2020, pp. 483–495. DOI:10.17277/vestnik.2020.03.pp.483-495 [In Russian].
5. Dyakovsky V.G. Deformation characteristics and calculation of efforts of interaction of reinforcing ropes with concrete: abstract of the thesis. dis. … cand. tech. Sciences. Novosibirsk, 1988. 20 p.
6. Nikolyukin A. Simulation of joint work of reinforcement with concrete on the example of composite reinforcement, author. dis. … cand. tech. Sciences. Tambov, 2021, 90 p.
7. Wei J., Yang Q., Yu. Y., Wang Q., Zhou L., Chen F. Study of Bond–Slip Behavior and Constitutive Model of a New Mortise-Tenon Steel-Section Concrete. *Materials* 2022, 15, 6776. https:// doi.org/10.3390/ma15196776
8. Nasiri E., Liu Y. The Out-of-Plane Behaviour of Concrete Masonry Infills Bounded by Reinforced Concrete Frames. *Engineering Structures*, 2019, pp. 406–420 DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.098
9. Simulia (A3) ABAQUS Standard User's Manual; Version 6.14; Dassault Systèmes Simulia Corp.: Johnston, RI, USA, (2013)
10. Jiang W.-G, Hallett, S.R, Green, B.G, Wisnom, M.R. A concise interface Constitutive Law for Analysis of Delamination and Splitting in Composite Materials and Its Application to Scaled Notched Tensile Specimens. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 2007, 69, 1982–1995.7
11. Bui Q.V. A Modified Benzeggagh-Kenane Fracture Criterion for Mixed-Mode Delamination. *Journal of Composite Materials*, 2011, pp. 389–413 DOI: 10.1177/0021998310376105

12. Zareef M.A., Elmadany M. Effect of glass-fiber rods on the ductile behavior of reinforced concrete beams. *Alexandria Engineering Journal*, (2018), DOI:10.1016/j.aej.2018.03.012
13. Luna Molina F.J., Hernández-Ruiz M.A., Hernández-Montes E., Alonso-Alonso M.C. Bond strength of galvanized steel: experimental and numerical study based on pull-out tests. Conference: Third International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering. University of Seville (Spain), pp. 143–158. ISBN: 978-84-606-93567
14. Dassault and Systèmes. Abaqus 6.13 CAE User's manual, (2013)
15. Gopinath S., Ramachandra Murthy A., Iyer N.R., Shahulhameed E.K. Constitutive Modeling and Numerical Simulation of FRP Confined Concrete Specimens. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2014, pp. 31–36, DOI:10.2478/sjce-2014-0015
16. Budahazy V., Dunai L., Parameter-refreshed Chaboche model for mild steel cyclic plasticity behavior, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2013. DOI:10.3311/PPci.7170
17. Najafgholipour M., Dehghan S.M., Dooshabi A., Arsalan N., Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode. *Latin American Journal of Solids and Structures,* 2017, pp. 1200–1225. DOI:10.1590/1679-78253682
18. Quayyum S. Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete. M.Sc. Bangladesh University Engineering & Technology, Bangladesh (2006)
19. Xiong Y., Wang K., Liu Z., Yang L. Effect of Coating Thickness on Bond Behaviors of Polymer Cement Coated Plain Steel Bar with Concrete and Finite Element Modeling. *The Open Civil Engineering Journal,* 2016, pp. 571–577. DOI:10.2174/1874149501610010571
20. Hongshuai L., Zhenqing W., Bo Z., Tong L. Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on composite based on cohesive zone model. *Material & Design*, 2013, pp. 138–147. DOI:10.1016/j.matdes.2012.03.037
21. Dongpo W., Dongsheng W, Chaojun O., Siming H. Simulation analysis of large-diameter post-installed anchors in concrete. *Construction and Building Materials*, 2017, pp. 558–565. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.149
22. Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Collaboration of polymer composite reinforcement and cement concrete, *Journal of Physics: Conference Series* (2018) DOI:10.1088/1742-6596/991/1/012044

Информация об авторах / Information about authors

Лаалай Фэйсал, аспирант кафедры «Механика сплошных сред», ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия, laalaifaicel1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7637-317X

Laalai Faicel, PhD student, Department of Continuum Mechanics, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, laalaifaicel1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7637-317X.

Ведяков Михаил Иванович, инженер ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Россия, vedyakov.misha@yandex.ru https://orcid.org/0009-0000-9692-8513

Mikhail I. Vedyakov, engineer, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation vedyakov.misha@yandex.ru https://orcid.org/0009-0000-9692-8513

Бережной Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Механика сплошных сред», ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия, berezhnoi.dmitri@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5783-4401

Dmitry V. Berezhnoi, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Continuum Mechanics, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, berezhnoi.dmitri@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3785-4401

Сабитов Линар Салихович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация SabitovLS@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7381-9752

Linar S. Sabitov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, FSBEI HE National Research Moscow State Construction University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russian Federation SabitovLS@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7381-9752

Султанов Ленар Уманович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики сплошных сред, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ), Казань, Россия, Lenar.Sultanov@kpfu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-4221

Lenar U. Sultanov, Dr.Sci.(Phys.-Math.), Professor of the Department of Continuum Mechanics, Kazan Federal University (KFU), Kazan, Russia, Lenar.Sultanov@kpfu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-4221

УДК 691.33
DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-22-38

Теоретические и экспериментальные исследования

Исследование ударной стойкости геополимерного бетона, дисперсно армированного растительными волокнами

Стельмах Сергей Анатольевич[1], Оганесян Самсон Эдуардович[1], Шилов Александр Андреевич[1], Развеева Ирина Федоровна[1], Погребняк Анастасия Анатольевна[1]
[1] Донской государственный технический университет.
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Геополимерные бетоны привлекают к себе большое внимание в строительном секторе благодаря своей экологичности и эффективному использованию в них отходов промышленности. Такие технические решения могут быть эффективны в сейсмически опасных районах.

Цель. Цель исследования заключалась в разработке дисперсно армированных геополимерных бетонов с улучшенной прочностью на сжатие и стойкостью к ударным воздействиям.

Материалы и методы. Для дисперсного армирования применялась комбинация из растительных стеблевых и плодовых волокон, которые вводились в композит в количестве 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 % и 3,0 % от массы вяжущего компонента. Армированные геополимерные композиты оценивались по показателям «прочность на сжатие», «ударная энергия» и «коэффициент ударной вязкости».

Результаты. Результаты испытаний показали, что добавление растительных волокон в оптимальных количествах от 0,5 % до 2,5 % улучшало прочностные свойства геополимерного бетона. Наиболее эффективным является процент дисперсного армирования, равный 1 %. Прочность на сжатие выросла на 14 %. Начальная ударная энергия W_1 и ударная энергия разрушения W_2 увеличились на 60 % и 125 % в сравнении с контрольными значениями ударной энергии композита без растительных волокон. Значение коэффициента ударной вязкости при 1 % растительных волокон увеличилось на 40,6 %. Структура изломов геополимерных композитов оценивалась под сканирующим электронным микроскопом после ударных воздействий. Геополимерные композиты имеют однородную структуру с множественными микротрещинами, также зафиксированы скопления продуктов реакций гидратации. Граница раздела фаз «геополимерная матрица – растительное волокно» представлена округлой областью с вытянутым растительным волокном.

Выводы. Разработанные геополимерные бетоны с растительными волокнами более устойчивы к ударным воздействиям и могут применяться в сейсмостойком гражданском, промышленном и дорожном строительстве при изготовлении различных конструктивных элементов.

Ключевые слова: геополимерный бетон, растительные волокна, ударная прочность, прочность на сжатие, структура геополимерного бетона.

© Stelmakh S.A., Oganesyan S.E., Shilov A.A., Razveeva I.F., Pogrebnyak A.A., 2026

Для цитирования: Стельмах С.А., Оганесян С.Э., Шилов А.А., Развеева И.Ф., Погребняк А.А. Исследование ударной стойкости геополимерного бетона, дисперсно армированного растительными волокнами // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.* 2026. №5. С. 22–38. **DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-22-38**

Вклад авторов
Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00535, https://rscf.ru/project/25-29-00535/.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Theoretical and experimental studies

Study of the impact resistance of geopolymer concrete dispersely reinforced with plant fibers

Sergey A. Stelmakh[1], Samvel E. Oganesyan[1], Alexander A. Shilov[1], Irina F. Razveeva[1], Anastasia A. Pogrebnyak[1]
[1]Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Introduction. Geopolymer concretes are attracting considerable attention in the construction sector due to their environmental friendliness and the efficient use of industrial waste in their production. Such technical solutions can be effective in seismically active regions.

Aim. The goal of the study was to develop fiber-reinforced geopolymer concretes with improved compressive strength and impact resistance.

Materials and methods. For dispersed reinforcement, a combination of plant sisal and flax fibers was used; these were added to the composite in amounts of 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %, and 3.0 % of the mass of the binding component. The reinforced geopolymer composites were evaluated based on the following indicators: "compressive strength", "impact energy", and "impact toughness coefficient".

Results. Test results have shown that adding plant fibers in optimal amounts ranging from 0.5 % to 2.5 % improves the strength properties of geopolymer concrete. The most effective percentage of dispersed reinforcement is 1 %. Compressive strength increased by 14 %. The initial impact energy W1 and the impact energy of failure W2 increased by 60 % and 125 %, respectively, compared to the control values of the impact energy of the composite without plant fibers. The impact toughness coefficient value increased by 40.6 % at 1 % plant fibers. The fracture structure of geopolymer composites was assessed using a scanning electron microscope after impact impacts. Geopolymer composites have a homogeneous structure with multiple microcracks; accumulations of hydration reaction products have also been recorded. The phase boundary "geopolymer matrix – plant fiber" is represented by a rounded area with elongated plant fibers.

Conclusions. The developed geopolymer concretes with plant fibers are more resistant to impact and can be used in earthquake resistant civil, industrial and road construction in the manufacture of various structural elements.

Keywords: geopolymer concrete, plant fibers, impact resistance, compressive strength, structure of geopolymer concrete.

For citation: Stelmakh S.A., Oganesyan S.E., Shilov A.A., Razveeva I.F., Pogrebnyak A.A. Study of the impact resistance of geopolymer concrete dispersely reinforced with plant fibers. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2026, no. 5, pp. 22-38. [in Russian]
DOI: 10.37153/2618-9283-2026-5-22-38

Author contribution statement
All authors contributed equally to the publication.

Funding
The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-29-00535, https://rscf.ru/project/25-29-00535/.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Введение

Геополимерный бетон в настоящее время является перспективным экологичным строительным материалом. Данный вид бетона получают путем щелочной активации алюмосиликатных компонентов, богатых оксидом кремния и алюминия. В процессе реакций полимеризации алюмосиликатные компоненты взаимодействуют с сильнощелочными растворами и образуют неорганические соединения с полукристаллической трехмерной структурой [1, 2]. Основным и наиболее популярным сырьем для изготовления геополимербетонов выступают отходы промышленности – зола-уноса, молотый доменный гранулированный шлак и микрокремнезем. Однако процесс изготовления геополимерных бетонов недостаточно сложен и требует проведения большого количества исследований, направленных на оценку химического состава и свойств потенциальных сырьевых компонентов и подбора оптимальной рецептуры [3]. Множество современных исследований в данной тематике посвящено разработке новых видов геополимерных бетонов, модифицированных различными видами добавок. Например, в исследовании [4] авторами были разработаны геополимерные бетоны на основе золы-уноса, микрокремнезема и различных видов щелочных активаторов (гидроксида натрия, гидроксида калия и силиката натрия). Сочетание золы-уноса и микрокремнезема позволяет получить геополимерные композиты с наилучшей прочностью на сжатие и изгиб. Термическая обработка геополимерных композитов с высоким содержанием золы-уноса значительно увеличивает прочность на сжатие через 7 дней по сравнению с аналогичными смесями, обрабатываемыми при комнатной температуре [5]. Включение порошка из отходов бетона в геополимерные композиты на основе золы-уноса улучшает их прочность и микроструктуру [6]. Сочетание гранулированного доменного шлака и золы в соотношении 60:40 позволяет получить геополимерные бетоны с прочностью на сжатие на 15-20% выше контрольной смеси [7]. Переработанный заполнитель, полученный из дорожного покрытия, может эффективно применяться в геополимерном бетоне и при оптимальном подборе рецептуры обеспечивает композит с прочностью на сжатие 56,27 МПа и прочностью на изгиб 5,54 МПа [8]. Добавка 20% отходов горнодобывающей промышленности улучшает

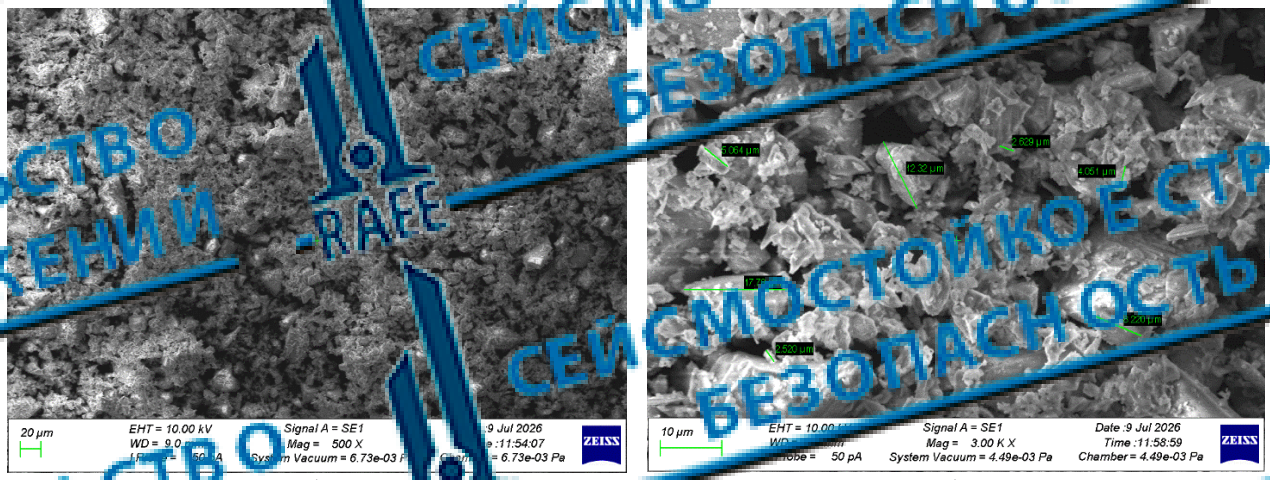
прочностные свойства и долговечность геополимерных бетонов на основе золы-уноса и шлака [9]. Оптимизация геополимерных бетонных смесей, выполненная в работе [10], показала, что сочетание алюмосиликатных компонентов в соотношении 50 % золы-уноса, 40 % шлака и 10 % кремнезема является наиболее эффективным, а полученные композиты обладают высокими прочностными свойствами.

Одним из способов улучшения свойств геополимерных бетонов является дисперсное армирование различными видами волокон, в том числе и натуральными волокнами растительного происхождения [11, 12]. Растительные волокна являются возобновляемым сырьевым материалом, а их сочетание с экологичной технологией геополимерных бетонов полностью соответствует концепции устойчивого развития и видится как актуальное и перспективное направление [13]. В работе [14] армирование 0,4 % джутовым волокном повышает прочность на растяжение при раскалывании геополимерного бетона на [illegible] % и прочность на изгиб 29,1 %. Армирование геополимерных бетонов льняным волокном улучшает их устойчивость к растрескиванию [15]. Ударная стойкость геополимерного бетона с добавлением 1 % волокон кенафа, кокосового волокна и волокна масличной пальмы увеличилась на 12,1 %, 98,33 % и 88,33 % соответственно [16]. Добавка конопляных и сизалевых волокон увеличивает прочность на сжатие геополимерных бетонов на 9,1 % и прочность на изгиб на 19 %, повышает их деформативность и способность перекрывать трещины [17]. Стойкость геополимерных композитов к хлоридам, сульфатам и кислотам улучшалась благодаря способности волокон кенафа перекрывать трещины [18]. Кокосовые волокна в оптимальных количествах увеличивают прочность на растяжение при раскалывании и прочность на изгиб на 35,7 % и 33,3 % соответственно [19]. В исследовании [20] авторами была изучена возможность применения волокон из листьев ананаса и по результатам эксперимента было доказано, что добавление 3 % волокон улучшает прочностные свойства геополимерного бетона. Аналогичные полезные эффекты от применения растительных волокон в технологии геополимерных бетонов также были зафиксированы и в работах других авторов [21–23]. По результатам проведенного литературного обзора и установленных научных пробелов рождается научная новизна исследования, которая заключается в разработке экологичных геополимерных композитов, дисперсно армированных комбинацией из сизалевых и льняных волокон, и установлении новых зависимостей свойств и структуры композитов от параметров дисперсного армирования. Такие технические решения могут быть эффективны в сейсмически опасных районах. Цель исследования заключается в получении геополимерных бетонов с улучшенной прочностью на сжатие и стойкостью к ударным воздействиям. В задачи работы входило определение физико-механических свойств сырьевых компонентов, подбор оптимальной рецептуры геополимерного бетона, изготовление серии экспериментальных образцов геополимерных бетонов, дисперсно армированных комбинаций растительных волокон в различных дозировках, и проведение лабораторных испытаний по определению их прочности на сжатие и стойкости к ударным воздействиям.

Материалы и методы

Для изготовления экспериментальных образцов геополимерных бетонов применялись следующие сырьевые материалы:

1) молотый доменный гранулированный шлак (МДГШ) (Мечел-Материалы, г. Челябинск, Россия). Химический состав: CaO – 40,1 %; SiO_2 – 37,8 %; Al_2O_3 – 6,8 %; MgO – 12,1 %; FeO – 0,2 %; Na_2O – 0,1 %; K_2O – 0,2 %; TiO_2 – 0,1 %; MnO – 0,5 %; S – 0,2 %. Изображения частиц МДГШ представлены на рис. [illegible].



а) *б*)

Рисунок 1 – МДГШ: *а*) с увеличением 500 ×; *б*) с увеличением 300 ×
Fig. 1 – GGBFS: a) with 500× magnification; b) with 300 × magnification

2) кварцевый песок (КП) (ООО «Строй-Строй», г. Ростов-на-Дону, Россия). Свойства: насыпная плотность – 1371 кг/м^3; истинная плотность – 2638 кг/м^3; содержание пылевидных и глинистых частиц – 1 %; модуль крупности – 2,63;

3) гранитный щебень (ГЩ) (гранит, г.п. Каменногорское, Россия). Свойства: насыпная плотность – 1445 кг/м^3; истинная плотность – 2661 кг/м^3; дробимость – 11,8 %; размер зерен 5–10 мм;

4) щелочные активаторы. Раствор гидроксида натрия (NaOH) с концентрацией 8М и натриевое жидкое стекло ($Na_2O(SiO_2)_n$) (ТЕСННІМ, г. Кропоткин, Россия). Свойства NaOH: массовая доля гидроксида натрия – 99,1 %; массовая доля углекислого натрия – 0,26 %; массовая доля хлористого натрия – 0,032 %. Свойства $Na_2O(SiO_2)_n$: массовая доля диоксида кремния – 29,63 %; массовая доля оксида натрия 9,65 %; силикатный модуль – 3,0;

5) пластифицирующая добавка Полипласт Линамикс ПК (Полипласт, г. Новомосковск, Россия). Свойства: pH – 5; плотность – 1,05 г/см^3;

6) растительные волокна (РВ) двух видов: сизалевое волокно и льняное волокно. Свойства сизалевого волокна (СВ): длина волокна – 10–25 мм; плотность волокна – 1,45 г/см^3; предел прочности на растяжение – 410–430 МПа. Свойства льняного волокна (ЛВ): длина волокна – 10–25 мм; плотность волокна – 1,17 г/см^3; предел прочности на растяжение – 370–400 МПа.

Геополимерные бетоны изготавливались в соответствии с рецептурой, представленной в таблице 1, а также с учетом ранее выполненного исследования [24]. Осуществлялось комбинированное дисперсное армирование двумя видами растительных волокон с соотношением ½ СВ и ½ ЛВ по массе. Растительные сизалевые и льняные волокна совместно вводились в состав геополимерных бетонов в количестве 0 %; 0,5 %; 1,0 %; 1,5 %; 2,0 %; 2,5 %; 3,0 % от массы вяжущего компонента МДГШ.

Таблица 1 – Рецептурные составы геополимерных композитов с расходом на 1 м^3
Table 1 – Recipe formulations of geopolymer composites with consumption per 1 m^3

Тип состава	МДГШ (кг)	КП (кг)	ГЩ (кг)	NaOH (л)	$Na_2O(SiO_2)_n$ (л)	ПК (кг)	СВ (кг)	ЛВ (кг)
0РВ	410	448	1214	100	90	4,1	0,00	0,00
0,5РВ	410	448	1214	100	90	4,1	1,03	1,03
1,0РВ	410	448	1214	100	90	4,1	2,05	2,05
5РВ	410	448	1214	100	90	4,1	3,08	3,08

2,0РВ	410	18	1214	100	90	4,1	4,10	4,10
2,5РВ	410	18	1214	100	90	4,1	5,13	5,13
3,0РВ	410	14	1214	100	90	4,1	6,15	6,15

Процедура изготовления экспериментальных образцов геополимерных бетонов включала в себя следующие основные этапы. Вначале все сырьевые компоненты дозировались в соответствии с рецептурой, представленной в таблице 1. Раствор гидроксида натрия NaOH с молярностью 8М готовился за сутки до применения. Затем сырьевые компоненты засыпались в лабораторный бетоносмеситель в последовательности МДГШ, КП и ГЩ и перемешивались в сухом состоянии. Далее вливались щелочные активаторы с пластифицирующей добавкой, и вся смесь перемешивалась 60 секунд. Растительные волокна вводились в три этапа в процессе перемешивания смеси для обеспечения их более равномерного распределения. После введения растительных волокон геополимерная бетонная смесь перемешивалась еще 60 секунд. Готовая геополимерная смесь загружалась в металлические формы-кубы с размерами 70 × 70 × 70 мм. Формы с геополимерной смесью уплотнялись на лабораторной виброплощадке 60 секунд. Через 2 суток образцы геополимеров извлекались из форм и твердели в естественных условиях при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 60 ± 5 %. Через 28 суток дисперсно армированные геополимерные композиты испытывались на прочность на сжатие и ударную вязкость.

Прочность на сжатие геополимерных композитов, дисперсно армированных растительными волокнами, определялась на образцах-кубах по ГОСТ 10180. Испытание на удар геополимерных композитов осуществлялось на автоматическом ударном копре ПМА. Масса бойка составляла 5 кг, а высота его падения была равна 0,5 м. Одна серия испытаний включала в себя испытание шести образцов композитов с размерами 70 × 70 × 70 мм. Процедура испытаний проводилась с соблюдением следующих этапов:

1) вначале образец композита устанавливался в ступку на поворотный столик копра;

2) затем боек свободно опускался с высоты 0,5 м, чтобы ударить по верхней поверхности образца;

3) после удара поверхность образца тщательно осматривалась на наличие трещин; при появлении первой трещины регистрировалось количество ударов, которое принималось за начальное число ударов до появления первой трещины и обозначалось как N_1;

4) после регистрации N_1 удары продолжались до разрушения образца, которое сопровождалось появлением множественных глубоких трещин и сколов, и фиксировалось значение N_2, характеризующее число ударов разрушения образца.

Начальная ударная энергия (W_1), приводящая к образованию первой трещины и ударная энергия, приводящая к разрушению геополимерного бетона (W_2), рассчитывались по формулам (1) и (2). Значения W_1 и W_2 для каждой экспериментальной серии рассчитывались как среднеарифметическое значение результатов испытаний шести образцов.

$$W_1 = N_1 \cdot m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$W_2 = N_2 \cdot m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

где W_1 – ударная энергия (первая трещина) (Дж);
W_2 – ударная энергия (разрушение образца) (Дж);
N_1 – начальное число ударов до появления первой трещины;
N_2 – число ударов до разрушения образца;
m – масса ударного бойка (5 кг);
g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²);

h – высота падения ударного бойка (0,5 м).

Коэффициент ударной вязкости рассчитывался как отношение количества ударов N_2 к числу ударов N_1 по формуле (3).

$$\mu = \frac{N_2}{N_1} \quad (3)$$

Оценка микроструктуры дисперсно армированных геополимеров была выполнена на сканирующем электронном микроскопе «ZEISS CrossBeam 340», оснащенном рентгеновским микроанализатором «Oxford Instruments X-Max 80 Carl Zeiss Microscopy GmbH» (завод), (Йена, Германия).

Всего было изготовлено семь экспериментальных составов геополимерных бетонов с различным количеством растительных волокон. На каждый состав приходилось три образца-куба 70 × 70 × 70 мм для определения прочности на сжатие и шесть образцов-кубов 70 × 70 × 70 мм для определения ударной энергии. Всего было изготовлено шестьдесят три экспериментальных образца.

Результаты и обсуждение

Результаты определения прочности на сжатие дисперсно армированных растительными волокнами геополимерных бетонов представлены на рис. 2.

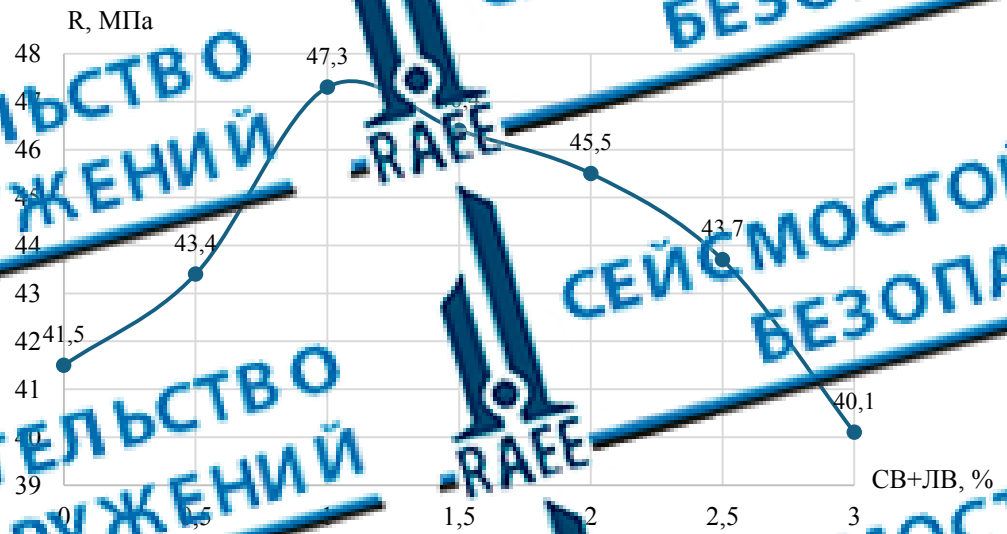


Рисунок 2 – Зависимость прочности на сжатие геополимерного бетона от содержания растительных волокон

Figure 2 – The relationship between the compressive strength of geopolymer concrete and the content of plant fibers

Как видно из рис. 2, включение в состав геополимерного бетона комбинации растительных волокон в количестве от 0,5 % до 2,5 % обеспечивает повышение прочности на сжатие. Максимальное значение прочности на сжатие 47,3 МПа зафиксировано для состава 1,0РВ. В сравнении с контрольным составом прирост прочности на сжатие составил 14,0 %. Приросты прочности на сжатие для составов типа 0,5РВ; 1,5РВ; 2,0РВ и 2,5РВ составили 4,6 %, 11,8 %, 9,6 % и 5,3 % соответственно. Состав 3,0РВ с 3 % растительного волокна имеет минимальное значение прочности на сжатие 40,1 МПа, что ниже, чем у контрольного состава на 3,4 %.

Далее на рис. 3 и в таблице 2 представлены результаты испытаний на ударную стойкость геополимерного бетона, изготовленного с применением растительных волокон.

Таблица 2 – Ударная стойкость геополимерных дисперсно армированных бетонов
Table 2 – Impact resistance of geopolymer dispersed reinforced concretes

Вид состава	Количество ударов до появления первой трещины (*N*1), шт	Ударная энергия (первая трещина) (W_1), Дж	Количество ударов до разрушения образца (N_2), Дж	Ударная энергия (разрушение образца) (W_2) Дж	Коэффициент ударной вязкости μ
0РВ	10	245,3	32	784,8	3,2
0,5РВ	12	294,3	48	1177,2	4,0
1,0РВ	16	392,4	72	1765,8	4,5
1,5РВ	15	367,9	63	1545,1	4,2
2,0РВ	14	343,4	60	1471,5	4,3
2,5РВ	13	318,9	54	1324,4	4,2
3,0РВ	13	318,8	45	1103,6	3,5

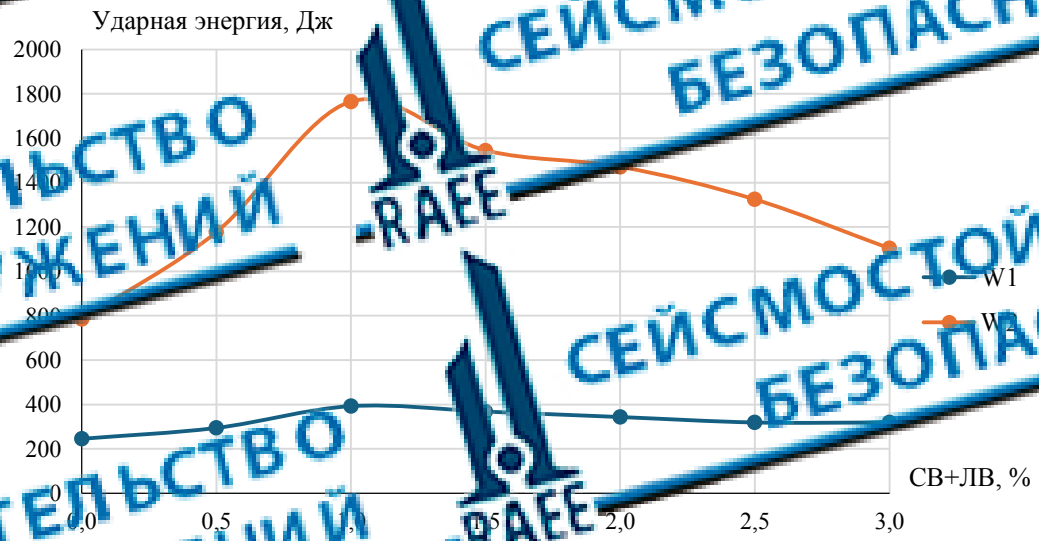
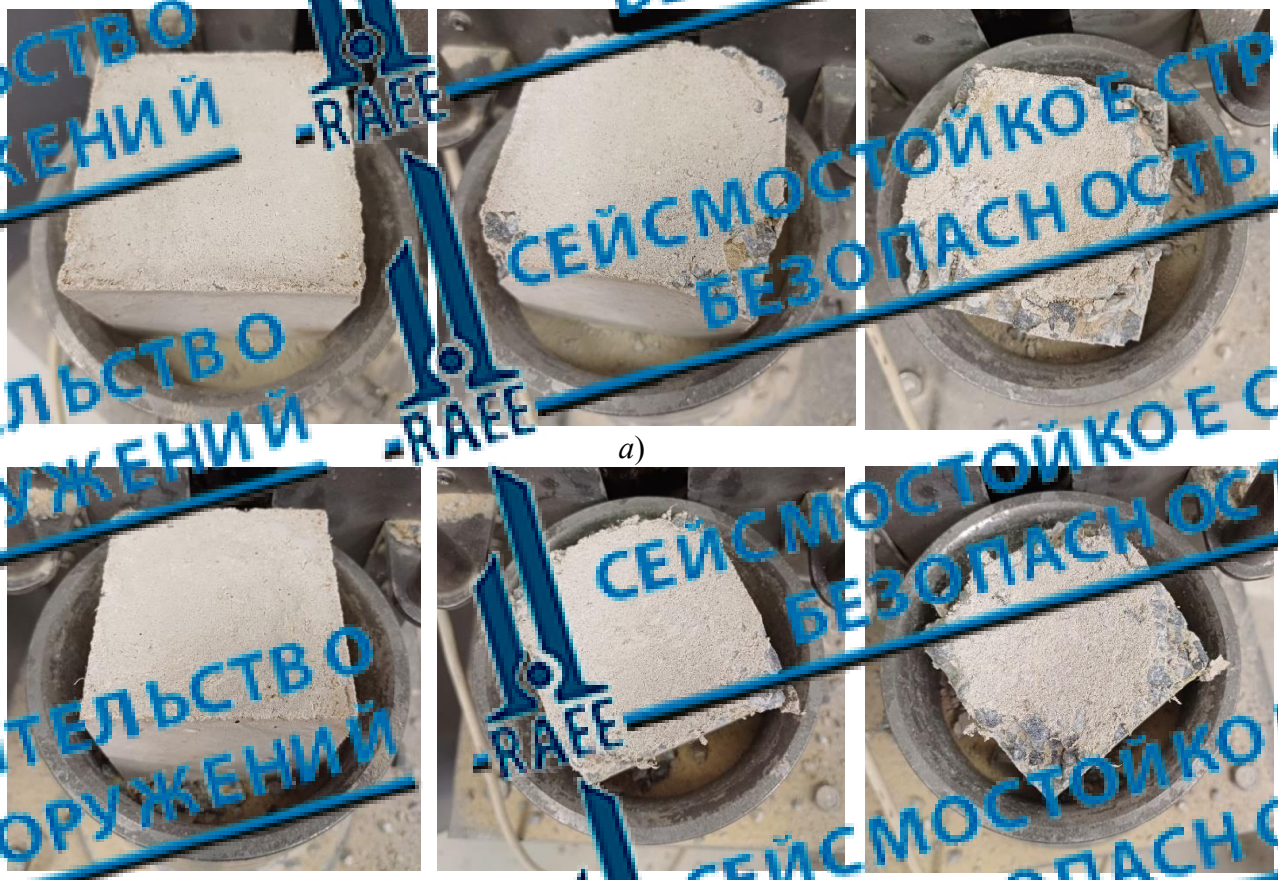


Рисунок 3 – Зависимость ударной энергии W_1 и W_2 геополимерного бетона от содержания растительных волокон
Figure 3 – Dependence of the impact energy W_1 and W_2 of geopolymer concrete on the content of plant fiber

Для геополимерного композита контрольного состава начальная энергия удара первой трещины составляет 245,3 Дж, а энергия разрушения составляет 784,8 Дж. Как видно на рисунке 3, ударная энергия W_1 и W_2 увеличивается при добавлении растительных волокон в количестве от 0,5 % до 2,5 %. Наибольшей стойкостью к ударным воздействиям обладает состав типа 1,0РВ. Так, значение W_1 составляет 392,4 Дж, значение W_2 составляет 1765,8 Дж, что выше значений ударной энергии контрольного состава на 60 % и 125 % соответственно. Также для состава 1,0РВ зафиксировано наибольшее значение коэффициента ударной вязкости (μ = 4,5). Увеличение энергии удара при дисперсном армировании растительными волокнами в оптимальном количестве объясняется связующим эффектом волокон, которые образуют разветвленную трехмерную сеть в структуре геополимерной матрицы, что повышает сплошность и целостность структуры всего композита [25]. На рисунке 4 представлен внешний вид экспериментальных

образцов геополимерного бетона контрольного состава без фибры и с растительной фиброй, подвергнутых ударным воздействиям.

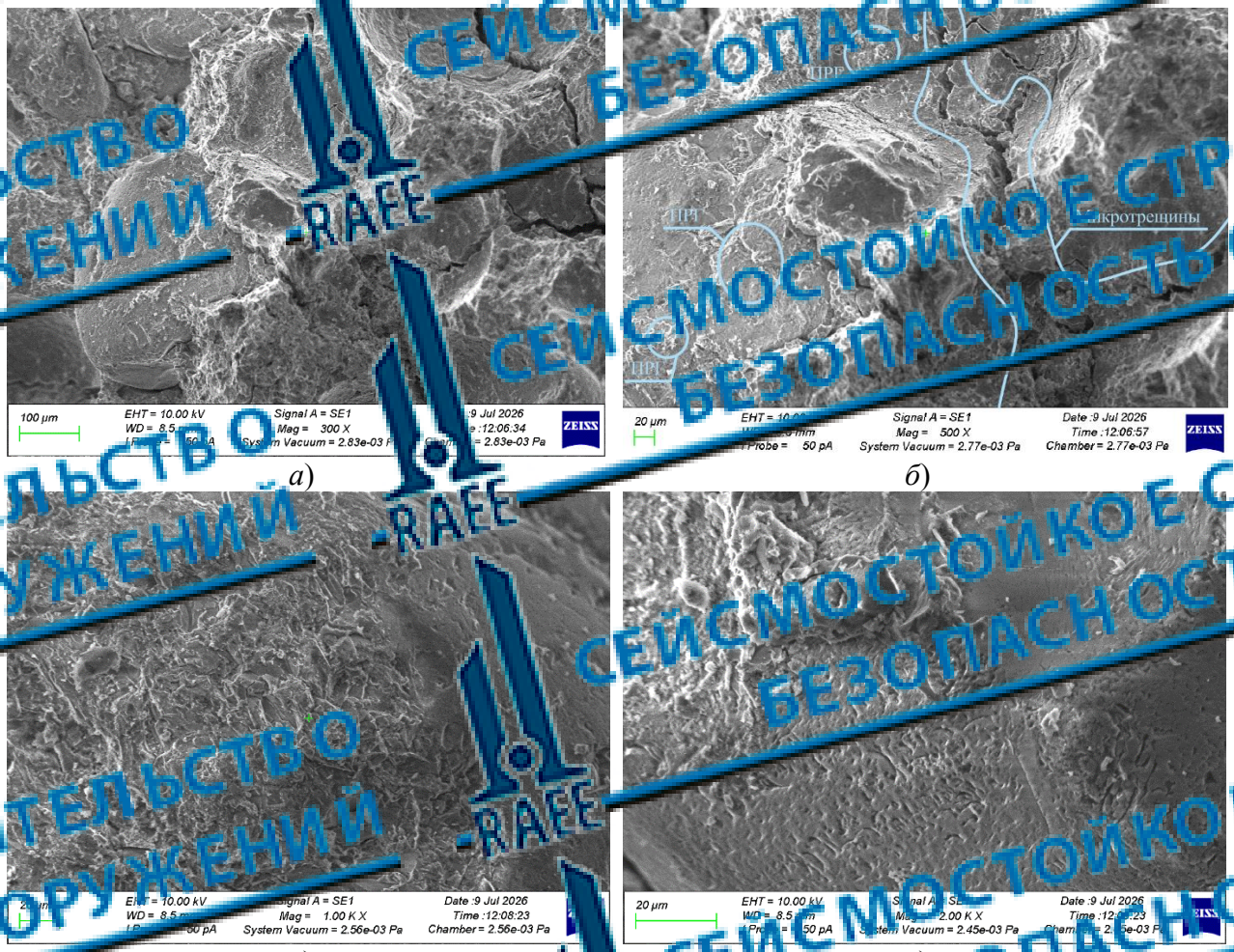


а)

Рисунок 4 – Разрушение образцов геополимерных бетонов, подвергнутых ударным воздействиям: *а*) контрольный состав 0RV без фибры; *б*) состав 1.0РВ с фиброй
Figure 4 – Failure of geopolymer concrete samples subjected to impact: *a*) control composition 0RV without fiber; *b*) composition 1.0RV with fiber

Рис. 4 демонстрирует характерные повреждения образцов геополимерных бетонов. После ударных воздействий образцы-кубы преимущественно разрушаются по краям вблизи углов.

Дополнительно выполнены исследования микроструктуры образцов геополимерных бетонов после ударных воздействий. Морфологические изменения структуры геополимерного бетона контрольного состава и бетона с 1 % растительных волокон представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.



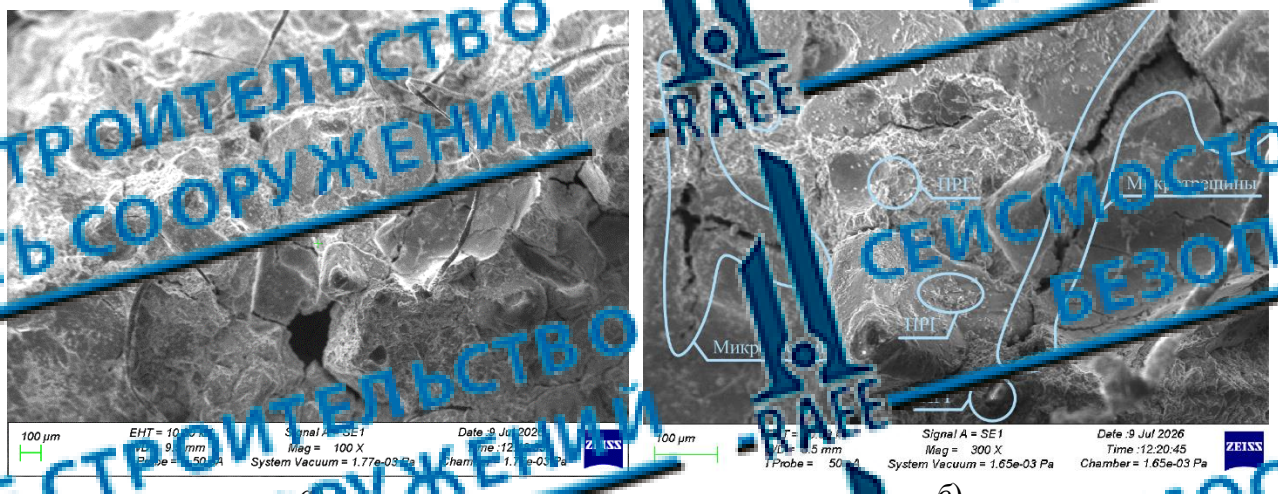
а) *б*)

в) *г*)

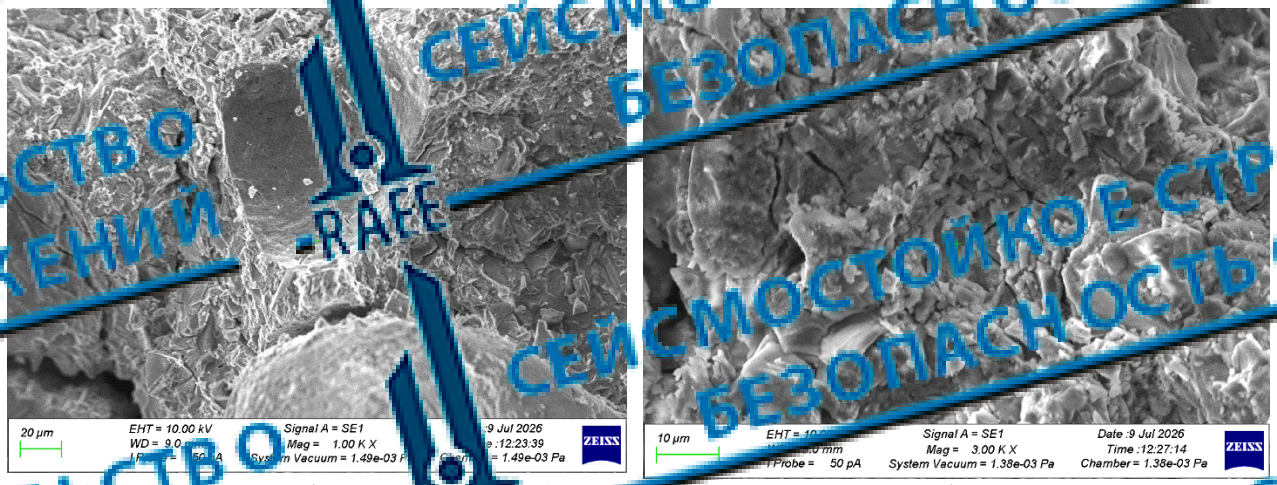
Рисунок 5 – Изображения структуры геополимерного бетона контрольного состава 0РВ с увеличением: *а*) 300 ×; *б*) 500 ×; *в*) 1000 ×; *г*) 2000 ×

Figure 5 – Images of the structure of geopolymer concrete of the control composition 0RV at different magnifications: *a*) 300 ×; *b*) 500 ×; *c*) 1000 ×; *d*) 2000 ×

Микроструктура геополимерного бетона контрольного состава после ударных воздействий представлена множественными микротрещинами, пересекающими геополимерную матрицу в различных направлениях. На поверхности зерен заполнителей наблюдаются скопления продуктов реакций геополимеризации (ПРГ).



а) *б*)



в) *г*)

Рисунок 6 – Изображения структуры геополимерного бетона состава типа 1,0РВ с увеличением: *а*) 100 ×; *б*) 300 ×; *в*) 1000 ×; *г*) 3000 ×

Figure 6 – Images of the structure of geopolymer concrete of type 1,0RV composition at the following magnifications: *a*) 100 ×; *b*) 300 ×; *c*) 1000 ×; *d*) 3000 ×

Микроструктура дисперсно армированного геополимерного бетона состава 1,0РВ после ударных воздействий также представлена множественными микротрещинами, пересекающими геополимерную матрицу в различных направлениях. На поверхности излома наблюдаются скопления продуктов реакций гидратации, а граница раздела фаз «геополимерная матрица – растительное волокно» представлена четкой структурой областью с вытянутым растительным волокном, что указывает на работу волокна в процессе механического воздействия.

Дисперсное армирование комбинацией растительных волокон повышает прочность на сжатие и ударную стойкость геополимерного бетона во многом за счет следующих основных механизмов:

– перераспределение напряжений при действием сжимающих нагрузок: равномерно распределенные в объеме геополимерной матрицы сизалевые и льняные растительные волокна берут на себя часть внутренних напряжений, перераспределяют их и сглаживают пики напряжений в слабых структурных зонах геополимерной матрицы [27, 28];

– задержка распространения трещин при ударных воздействиях: в момент ударного воздействия в геополимерной матрице растительные волокна, находящиеся в зоне удара, зарождения трещин, блокируют распространение трещин и рассеивают энергию удара по всему объему композита [29].

Армирование геополимерных бетонов комбинацией из сизалевых и льняных волокон в диапазонах от 0,5 % до 2,5 % является оптимальным и обеспечивает повышение прочности на сжатие и ударной стойкости. Включение растительных волокон в количестве более 2,5 % нецелесообразно, так как фиксируется снижения прочности на сжатие и ударной энергии разрушения. При слишком высоких дозировках растительные волокна не могут равномерно распределиться в структуре композита, спутываются и образуют слабые зоны, в результате чего нарушается структурная однородность геополимерного бетона и снижается его прочность [30–34]. Дисперсно армированные геополимерные бетоны более устойчивы к ударным воздействиям и могут применятся в сейсмостойком гражданском, промышленном и дорожном строительстве при изготовлении различных конструктивных элементов.

Заключение

В ходе выполненных исследований были разработаны экологичные геополимерные композиты с растительными волокнами и повышенной ударной стойкостью. Для композитов определялись и рассчитывалась прочность на сжатие, ударная энергия и коэффициент ударной вязкости. Кроме того, была исследована микроструктура геополимерных композитов после ударных воздействий.

1. Дисперсное армирование геополимерного бетона комбинацией растительных волокон в количестве от 0,5 % до 2,5 % повышает прочность на сжатие. Максимальная прочность на сжатие 47,3 МПа достигается при 1,0 % растительных волокон. В сравнении с контрольным составом прирост прочности на сжатие составил 14 %.

2. Растительные волокна в геополимерной матрице препятствуют распространению трещин и, тем самым, повышают стойкость композита к ударным воздействиям. Наибольшую стойкость к ударным воздействиям продемонстрировал состав 1,0РВ. Начальная ударная энергия первой трещины W_1 и ударная энергия разрушения W увеличилась на 60 % и 125 % соответственно. Значение коэффициента ударной вязкости увеличилось на 40,6 %.

3. Геополимерные бетоны после ударных воздействий имеют однородную структуру с развитой сетью микротрещин. На поверхности зерен заполнителей зафиксированы скопления продуктов реакций геополимеризации. Граница раздела фаз «геополимерная матрица – растительное волокно» композита представлена округлой областью с вытянутым растительным волокном.

Список литературы

1. Ruhaf S., Lahar I. Ultra-High Performance Geopolymer Concrete: Materials, Performance Characteristics, Durability and Microstructural Insights. *J. Compos. Sci.* 2026, 10, p. 327. https://doi.org/10.3390/jcs10060327

2. Sankara R.T., Ramamohana R.B. A review of geopolymer concrete: An eco-friendly substitute for traditional concrete. *Next Materials,* 2026, volume 13, https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.10337...

3. Гулич И. А., Мыльников В. Е., Кондратьев О. Б. Геополимерные бетоны с использованием доменных шлаков // *Прикаспийский научный журнал*. 2025. № 4(76). С. 163–171.

4. Hamed Y.R., Kocha M.M., Elshikh M.M.Y., Elshami A.A., Matthana M.H.S., Youssf O. Performance of Sustainable Geopolymer Concrete Made of Different Alkaline Activators. *Infrastructures*, 2025, 10, p. 41 https://doi.org/10.3390/infrastructures10020041

5. Al-Qutaifi S., Rashid R.M., Kawoosh A. Cost-Effective Perspective of Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Under Different Curing Regimes. *Constr. Mater.,* 2025, 5, p. 81. https://doi.org/10.3390/constmater5040081.

6. Sakkhanan N., Ampol W., Piyavut F., Phatthanon V., Jindarat E., Ubolluk R., Chai J., Prinya C., Vanchai S. Effect of water concrete powder on reaction products, microstructure, and mechanical properties of high- and low-calcium fly ash–based geopolymer pastes. *Construction and Building Materials,* 2026, vol. 541. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147860.

7. Guruprasad T.N., Prashanth M.H., Narasimhan G.L. Development and characterisation of an optimum one-part geopolymer concrete mix with high mechanical strength. *Progress in Engineering Science,* 2026, vol. 3. https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100323.

8. Hung N.T., Son H.T., Thu H.T.T. Multi-objective optimization of ambient-cured one-part geopolymer roller-compacted concrete incorporating 100 % pavement-derived recycled concrete aggregate. *Results in Engineering,* 2026, vol. 32, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.112295.

9. Selvakumar G., Ravichandran P.T. Ambient-cured sodium carbonate-activated geopolymer concrete incorporating marine tile waste: Mechanical, durability, and microstructural evaluation. *Next Materials,* 2026. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.102888.

10. Anilkumar Preethisha K.S., Bhargavi C. Studies on Optimization of Fly Ash, GGBS and Precipitated Silica in Geopolymer Concrete. *Constr. Mater.,* 2025, 5, p. 29. https://doi.org/10.3390/constrmater5020029.

11. Shyamkumar M., Pachaivannan P., Chella G.C. A comprehensive review on multilayered natural-fibre composite reinforcement in geopolymer concrete. *Cleaner Materials,* 2025, Volume 16. https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100310.

12. Hussein M.H., Alyousef R., Al-Ajarmeh M.S., Alaskar A., Mahdi K.A., Salmia B., Ali M. Advancing the sustainability of fiber-reinforced geopolymer concrete using natural plant fibers: A comprehensive review of properties and impacts. *Structures,* 2025, vol. 77. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109201.

13. Li Z., Li J., Lu W., Zhang Y. Research Progress and Application Prospects of Plant Fibers in Geopolymer Concrete: A Review. *Materials,* 2025, 18, 2542. https://doi.org/10.3390/ma18102342.

14. Mohammed A.D.A.A., Rouainhui W., Huseien G.F. Mechanical Properties of Natural Jute Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete: Effects of Various Lengths and Volume Fractions. *J. Compos. Sci.,* 2024, 8, 450. https://doi.org/10.3390/jcs8110450.

15. Ullah S., Benfratello S., Sapienza S., Filippo C., Palizzolo L. Mechanical Behavior and Modeling of Flax Fiber-Reinforced Geopolymers in Comparison with Other Natural Fiber Composites. *Fibers,* 2026, 14, 27. https://doi.org/10.3390/fib14020027.

16. Ige S. A., Noor M. A. S. L. M., Castara S. Engineering properties of natural fibre-reinforced one-part geopolymer concrete. *Construction and Building Materials,* 2024, Volume 456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139161.

17. Shyamkumar M., Pachaivannan P., Kavitha A. Mechanical and durability performance of multilayered hemp–sisal fiber reinforced geopolymer concrete for sustainable construction. *Structures*, 2025, Volume 81. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110328.

18. Al-Ghazali N. A., Farah N. A., Ali N., Khalina A., Nor A. M. M., Ghasan F. H. Experimental study on durability properties of kenaf fibre-reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials,* 2023, Volume 396, 132160, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132160.

19. Aimin A.M., Rosenn R. Engineering Performance of Geopolymer Concrete with Coir Husk Ash and Cocoa Cellulose Fibers. *Int. J. Pavement Res. Technol.,* 2026. https://doi.org/10.1007/s42947-026-00813-7.

20. Linhares J. J.A.T., Marvila M.T., da Silva Amaral Pereira I. et al. Characterization of lignocellulosic fibers from pineapple leaf with alkaline treatment for application in geopolymeric mortars. *Mater Struct.,* 2025, 58, 229. https://doi.org/10.1617/s11527-025-02735-5.

21. Briki L., Kessal O., Belkadi A.A. et al. Performance of geopolymer composites reinforced with treated date palm and polypropylene fibers. *Sci Rep.*, 2026, 16. https://doi.org/10.1038/s41598-024-70457-7.

22. Sanfilippo C., Fiore V., Calabrese L. et al. Impact of Surface Treatment on the Strengthening of Geopolymer Composites Reinforced with Short Sisal Fibers. *Fibers*, 2024, 76. https://doi.org/10.1007/s11837-024-06700-5.

23. ABO T.M., Assonfack H.L., Fekoua J.N.N. et al. Banana fibre reinforced geopolymer matrices: pore structure, mesoscale and insulating properties. *Innov. Infrastruct. Solut.* 2025, 10, 383. https://doi.org/10.1007/s41062-025-02165-w.

24. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Oganesyan S., Shakhalieva D.M., Chernil'nik A., Shcherban' N., Pogrebnyak A. The Influence of Sisal and Flax Fibers on the Mechanical Properties, Water Absorption, and Microstructure of Geopolymer Composites. *J. Compos. Sci.,* 2026, 10, 400. https://doi.org/10.3390/jcs10080400.

25. Wang X., Wu Z., Chen W. Experimental Study on the Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced All-Lightweight Concrete Beams under Single and Hybrid Mixing Conditions. *Buildings,* 2023, 13, 12[illegible] https://doi.org/10.3390/buildings13051251.

26. Shiyang Q., Dongxigen P., Baolin P., Chaohui Y., Zirui Fa., Yunting W. Study on the crack resistance of concrete reinforced with flax fiber and multi-walled carbon nanotubes. *Construction and Building Materials,* 2025, Volume 488, 141884, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141884.

27. Beskopylny A.N., Shcherban E.M., Stel'makh S.A., Chernilnik A., Elshaeva D., Ananova O., Mailyan L.D., Mailyan V.A. Optimization of the Properties of Eco-Concrete Dispersedly Reinforced with Hemp and Flax Natural Fibers. *J. Compos. Sci.* 2025, *9*, 56. https://doi.org/10.3390/jcs9020056

28. Joachim J., Oettel V. Experimental Investigations on the Application of Natural Plant Fibers in Ultra-High-Performance Concrete. *Materials*, 2024, 17, 3519. https://doi.org/10.3390/ma17143519

29. Wei X., Qin Z., Wang S., Ma S., Shi M., Fa J., Li G. Experimental study on dynamic impact mechanical properties and fracture resistance mechanism of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering,* 2025, Volume 112, 113654, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113654.

30. Chaocong W., Ruizhen S., Jun L., Zizheng Y., Chengqing W. Sustainable reinforcement of dry ultra-high performance concrete using renewable sisal fibres with surface treatment and hybridisation. *Journal of Building Engineering,* 2026, Volume 126, 116322, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.116322.

31. Maryem B., Hanane M. A., Taoufik C. Influence of date palm fiber incorporation on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials,* 2026, Volume 507, 147079, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147079.

33. Temesgen E. A. Experimental investigation on the compressive strength of plate fiber-reinforced concrete (JFRC). *Results in Engineering,* 2026, Volume 31, 111396, ISSN 2590-1230. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111396.

34. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Mailyan L.R., Meskhi B., Shilov A.A., Beskopylny N., Chernil'nik A. Enhancing Performance of Concrete Dispersedly Reinforced with Basalt Fibers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 9102. https://doi.org/10.3390/app12189102.

Reference

1. Luhar S., Luhar, I. Ultra-High-Performance Geopolymer Concrete: Materials, Performance Characteristics, Durability and Microstructural Insights. *J. Compos. Sci.*, 2026, *10*, 327. https://doi.org/10.3390/jcs10060327

2. Sankara R. T., Ramamohana R. B. A review of geopolymer concrete: An eco-friendly substitute for traditional concrete. *Next Materials,* 2026, Volume 13, 1[illegible]5373, ISSN 2949-8228. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.105373.

3. Gulin I. A., Myl'nikov V. V., Kondrashkin O. B. Geopolimernye betony s ispol'zovaniem domennykh shlakov. *Povolzhskii nauchnyi zhurnal,* 2025, No. 4(76), p. 163-171. [In Russian]

4. Hamed Y.R., Keshta M.M., Elshikh M.M.Y., Elshami A.A., Mathana M.H.S., Yousif O. Performance of Sustainable Geopolymer Concrete Made of Different Alkaline Activators. *Infrastructures*, 2025, 10, 41. https://doi.org/10.3390/infrastructures10020041.

5. Al-Qutaifi S., Rashid R.M., Nawoosh A.S. Cost-Effective Perspective of Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Under Different Curing Regimes. *Constr. Mater.,* 2025, 5, 81. https://doi.org/10.3390/constrmater5040081.

6. Sakchai N., Ampol W., Pivawat P., Phaithun N., Jindarat E., Ubolluk R., Chai J., Prinya C., Vanchai S. Effect of waste concrete powder on reaction products, microstructure, and

mechanical properties of high- and low-calcium fly ash–based geopolymer pastes. *Construction and Building Materials,* 2026, Volume 511, 147860, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147860.

7. Guruprasad T., Yashanth M.H., Narasimhan C.M. Development and characterisation of an optimum one-part geopolymer concrete mix with high mechanical strength. *Progress in Engineering Science,* 2026, Volume 3, 100323, ISSN 2950-4252. https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100323.

8. Hung N.T., Son H.T., Thu-Ha T.T. Multi-objective optimization of ambient cured one-part geopolymer roller-compacted concrete incorporating 100 % pavement derived recycled concrete aggregate. *Results in Engineering,* 2026, Volume 32, 112295, ISSN 2590-1230. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.112295.

9. Selvakumar G, Vijayalandran P.T. Ambient-cured sodium carbonate-activated geopolymer concrete incorporating fine tile waste: Mechanical, durability, and microstructural evaluation. *Next Materials,* 2026. 102888. ISSN 2949-8228. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.102888.

10. Anilkumar, Sreekeshava K.S., Bhargavi C. Studies on Optimization of Fly Ash, GGBS and Precipitated Silica in Geopolymer Concrete. *Constr. Mater.,* 2025, 5, 29. https://doi.org/10.3390/constrmater5020029.

11. Shyamkumar M., Pachaivannan P., Chella G. C. A comprehensive review on multilayered natural-fibre composite reinforcement in geopolymer concrete. *Cleaner Materials,* 2025, Volume 16, 100310, ISSN 2772-3976, https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100310.

12. Hussein M. H., Alyaa A. A., Mand K. A., Salmia B., Ali M. Advancing the sustainability of fiber-reinforced geopolymer concrete using natural plant fibers: A comprehensive review of properties and impacts. *Structures,* 2025, Volume 77, 109210, ISSN 2352-0124, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109201.

13. Li Z., Li J., Lu W., Zhang Y. Research Progress and Application Prospects of Plant Fiber in Geopolymer Concrete: A Review. *Materials,* 2025, 18, 2342. https://doi.org/10.3390/ma18102342.

14. Mohammed A.D.A.A., Ronghui W., Huseien G.F. Mechanical Properties of Natural Jute Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete: Effects of Various Lengths and Volume Fractions. *J. Compos. Sci.,* 2024, 8, 450. https://doi.org/10.3390/jcs8110450.

15. Ulian S., Benfratello S., Sanfilippo A., Palizzolo L. Mechanical Behavior and Modeling of Flax Fiber-Reinforced Geopolymers in Comparison with Other Natural Fiber Composites. *Fibers,* 2026, 14, 27. https://doi.org/10.3390/fib14020027.

16. Ige S. A., Nor H. A. S. L., Mostafa S. Engineering properties of natural fibre reinforced one-part geopolymer concrete. *Construction and Building Materials,* 2024, Volume 456, 139161, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139161.

17. Shyamkumar M., Pachaivannan P., Kavitha A. Mechanical and durability performance of multilayered hemp–sisal fiber-reinforced geopolymer concrete for sustainable construction. *Structures,* 2025, Volume 78, 110328, ISSN 2352-0124. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110328.

18. Al-Ghazali N.A., Farah N. A. A. A., Khalid A., Noor A. M. N., Ghassan F. H. Experimental study on durability properties of kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials,* 2023, Volume 396, 132160, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132160.

19. Ajmin A.M., Roselin R. Engineering Performance of Geopolymer Concrete with Corn Husk Ash and Coconut Cellulose Fibers. *Int. J. Pavement Res. Technol.,* 2026. https://doi.org/10.1007/s42947-026-00813-7.

20. Linhares J. J. A. T., Marvila M. T., da Silva Amaral Pereira I. et al. Characterization of lignocellulosic fibers from pineapple leaf with alkaline treatment for application in geopolymeric mortars. *Mater Struct,* 2025, 58, 220. https://doi.org/10.1617/s11527-025-02735-5.

21. Briki L., Kessal O., Belhadi A.A. et al. Performance of geopolymer composites reinforced with treated date palm and polypropylene fibers. *Sci. Rep.*, 2026, 16, 20096. https://doi.org/10.1038/s41598-026-50457-7.

22. Sanfilippo G., Azzore V., Calabrese L. et al. Impact of Surface Treatment on the Strengthening of Geopolymer Composites Reinforced with Short Sisal Fibers. *JOM*, 2024, 76, 4514–4525. https://doi.org/10.1007/s11837-024-06700-5.

23. ABO T.M., Alsoniack H.L., Fekoua J.N.N. et al. Banana fibre reinforced geopolymer matrices: pore structure, mesoscale and insulating properties. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2025, 10, 583. https://doi.org/10.1007/s41062-025-02169-w.

24. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Oganesyan S., Shakhalieva D.M., Chernil'nik A., Shcherban' A., Pogrebnyak A. The Influence of Sisal and Flax Fibers on the Mechanical Properties, Water Absorption, and Microstructure of Geopolymer Composites. *J. Compos. Sci.*, 2026, 10, 400. https://doi.org/10.3390/jcs10080400.

25. Wang X., Wu Q., Chen Z. Experimental Study on the Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced Al Lightweight Concrete Beams under Single and Hybrid Mixing Conditions. *Buildings*, 2023, 13, 1251. https://doi.org/10.3390/buildings13051251.

26. Shiyang Q., Chonggen P., Xiaolin P., Chaohui Y., Zhuli Fa., Yunting W. Study on the crack resistance of concrete reinforced with flax fiber and multi-walled carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 2025, Volume 488, 141884, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141884.

27. Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Chernilnik A., Elshaeva D.Yu., Ananova O., Mailyan L.D., Muradyan V.M. Optimization of the Properties of Eco-Concrete Dispersedly Reinforced with Hemp and Flax Natural Fibers. *J. Compos. Sci.*, 2025, 9, 56. https://doi.org/10.3390/jcs9020056.

28. Joachim, L., Oettel, V. Experimental Investigations on the Application of Natural Plant Fibers in Ultra-High-Performance Concrete. *Materials*, 2024, 17, 3519. https://doi.org/10.3390/ma17143519

29. Wei X., Qin Z., Wang S., Ma S., Shi M., Fa J., Li G. Experimental study on dynamic impact mechanical properties and fracture resistance mechanism of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 2025, Volume 112, 113654, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113654.

30. Chaocong W., Puzzle S., Jun Z., Zizheng Y., Chengqing W. Sustainable reinforcement of dry ultra-high performance concrete using renewable sisal fibres with surface treatment and hybridisation. *Journal of Building Engineering*, 2026, Volume 126, 116322, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.116322.

31. Maryem B., Hanane M. A., Toufik C. Influence of date palm fiber incorporation on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2026, Volume 537, 147079, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147079.

33. Tenesgen E. A. Experimental investigation on the compressive strength of jute fiber–reinforced concrete (JFRC). *Results in Engineering*, 2026, Volume 31, 111396, ISSN 2590-1230. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111396.

34. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Mailyan L.R., Meskhi B., Shilov A.A., Beskopylny N., Chernil'nik A. Enhanced Performance of Concrete Dispersedly Reinforced with Sisal Fibers. *Appl. Sci.*, 2022, 12, 9102. https://doi.org/10.3390/app12189102.

Информация об авторах / Information about the authors

Стельмах Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного

технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-0364-5504
sergej.stelmax@mail.ru

Sergey A. Stelmakh, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Construction of Unique Buildings and Structures at the Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0364-5504
sergej.stelmax@mail.ru

Оганесян Самсон Эдуардович, аспирант кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID: 0009-0007-7168-2642
7408114@mail.ru

Samson E. Oganesyan, graduate student of the Department of Construction of Unique Buildings and Structures at the Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. ORCID: 0009-0007-7168-2642
7408114@mail.ru

Шилов Александр Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID: 0000-0003-0323-0517
alexandr_shilov@inbox.ru

Alexander A. Shilov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Construction of Unique Buildings and Structures at the Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0323-0517
alexandr_shilov@inbox.ru

Развеева Ирина Федоровна, старший преподаватель кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-4593-817X
razveevai@mail.ru

Irina F. Razveeva, senior lecturer of the Department of Construction of Unique Buildings and Structures at the Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4593-817X
razveevai@mail.ru

Погребняк Анастасия Анатольевна, аспирант, преподаватель кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-5514-6072
afedchishena@mail.ru

Anastasia A. Pogrebnyak, graduate student, teacher of the Department of Construction of Unique Buildings and Structures at the Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5514-6072
afedchishena@mail.ru