

Ю.В. ПУХАРЕНКО¹, Д.А. ПАНТЕЛЕЕВ¹, М.И. ЖАВОРОНКОВ¹¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия**ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО
КЕРАМЗИТОБЕТОНА ПОД НАГРУЗКОЙ**

Аннотация. Статья посвящена исследованию особенностей деформирования и разрушения керамзитобетона, дисперсно армированного волокнами. Представлены результаты испытаний керамзитобетонных образцов, армированных высокомодульной базальтовой фиброй, а также низкомодульной синтетической микро- и макрофиброй. Рассмотрены экспериментальные данные силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фиброкерамзитобетонных образцов, полученные экспериментально в соответствии с положениями ГОСТ 29167-2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». Установлено, что армирование низкомодульными синтетическими макроволокнами может привести к повышению прочности керамзитобетона, причем более значительному даже по сравнению с армированием высокомодульными базальтовыми волокнами. Однако достижение этой прочности будет сопровождаться значительными прогибами.

Ключевые слова: фибробетон, керамзитобетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, деформации, критический коэффициент интенсивности напряжений, прочность.

Yu.V. PUKHARENKO¹, D.A. PANTELEEV¹, M.I. ZHAVORONKOV¹¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering», St. Petersburg, Russia**DEFORMABILITY OF DISPERSED REINFORCED EXPANDED CLAY
CONCRETE UNDER LOAD**

Abstract. The article is devoted to the study of the deformation and destruction characteristics of expanded clay concrete dispersively reinforced with fibers. The article presents the test results of expanded clay concrete samples reinforced with high-modulus basalt fiber, as well as low-modulus synthetic micro- and macrofiber. The article considers the experimental data on the strength and energy characteristics of crack resistance of fiber expanded clay concrete samples, obtained experimentally in accordance with the provisions of GOST 29167-2021 «Concrete. Methods for determining crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading». It was found that reinforcement with low-modulus synthetic macrofibers can lead to an increase in the strength of expanded clay concrete, and a more significant one even in comparison with reinforcement with high-modulus basalt fibers. However, achieving this strength will be accompanied by significant deflections.

Keywords: fiber concrete, expanded clay concrete, crack resistance, fracture toughness, deformation, critical stress intensity factor, strength.

Введение

Существенной проблемой в строительстве по-прежнему остается массивность железобетонных конструкций зданий и сооружений, которую можно решить путем замены тяжелых бетонов на легкие – менее плотные, но при этом не менее надежные и эффективные [1–3]. Важнейшими характеристиками, определяющими надежность конструкции при эксплуатации под нагрузкой, являются трещиностойкость и вязкость разрушения, так как известно, что наличие в бетоне даже незначительных дефектов под действием сравнительно небольших усилий может приводить к разрушению [4–8].

© Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И., 2025

Одним из наиболее эффективным методов, позволяющих повысить трещиностойкость (вязкость разрушения) и прочность бетона, является дисперсное армирование различными волокнами [9, 10].

В последние годы проведен значительный объем исследований и получены подробные сведения о трещиностойкости дисперсно армированных бетонов, матрицей которых является тяжелый бетон [11–15]. Гораздо меньше информации по данному вопросу поступает относительно фиброармированных легких бетонов.

Целью данной работы являлось исследование влияния различных видов волокон на прочность и деформативность конструкционного керамзитобетона под нагрузкой.

Метод

При проведении экспериментальных исследований в соответствии с ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» были изготовлены и испытаны опытные образцы в виде балок размером 7х7х28 см из керамзитобетона с использованием следующих сырьевых материалов:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства АО «Сланцевский цементный завод „Цесла“» по ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;
- песок кварцевый с модулем крупности 2,2 и насыпной плотностью 1510 кг/м³ по ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;
- гравий керамзитовый (фракция 5–10 мм) с насыпной плотностью 495 кг/м³ по ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия»;
- суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов «СИНТЕФЛОУ» Мега 52».

Для дисперсного армирования керамзитобетона применялась высокомодульная базальтовая фибра длиной 12 мм и диаметром 0,017 мм, а также низкомодульная синтетическая (полипропиленовая) микрофибра «Fibrin XT» длиной 12 мм и диаметром 0,018 мм, и макрофибра «Durus S500» длиной 48 мм и диаметром 0,7 мм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Базальтовая фибра (а), синтетическая микрофибра «Fibrin XT» (б) и синтетическая макрофибра «Durus S500» (в)

Армирующие волокна вводились в готовую керамзитобетонную смесь, состав которой приведен в таблице 1. Перемешивание смеси производилось при помощи бетоносмесителя принудительного действия, при этом керамзитовый гравий вводился в последнюю очередь.

Таблица 1 – Состав исходной керамзитобетонной смеси (матрицы)

Сырьевые материалы	Расход материалов, кг/м ³
портландцемент	437
кварцевый песок	748
керамзитовый гравий	394
суперпластификатор	1,75
вода	216

Формование образцов из приготовленной фибробетонной смеси производилось на стандартной лабораторной виброплощадке с гармоническими колебаниями. Для набора прочности свежесформованные образцы помещались в камеру нормального твердения, в которой выдерживались 28 суток до начала испытаний.

Для определения характеристик трещиностойкости изготовленных образцов использовалось разработанное на кафедре ТСМиМ СПбГАСУ устройство (рисунок 2), позволяющее получать диаграммы деформирования дисперсно армированного керамзитобетона в виде графиков зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок, с помощью которых, в соответствии с положениями ГОСТ 29167–2021, определялись силовые и энергетические характеристики трещиностойкости исследуемого материала [16, 17].



Рисунок 2 – Установка для определения характеристик трещиностойкости бетона

Результаты и обсуждение

Полученные физико-механические характеристики матрицы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики неармированного керамзитобетона

Средняя плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	Модуль упругости, E , МПа	Предел прочности при сжатию, $R_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе, $R_{изг}$, МПа
1685	20314	33,7	3,45

Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов представлены на рисунках 3–5.

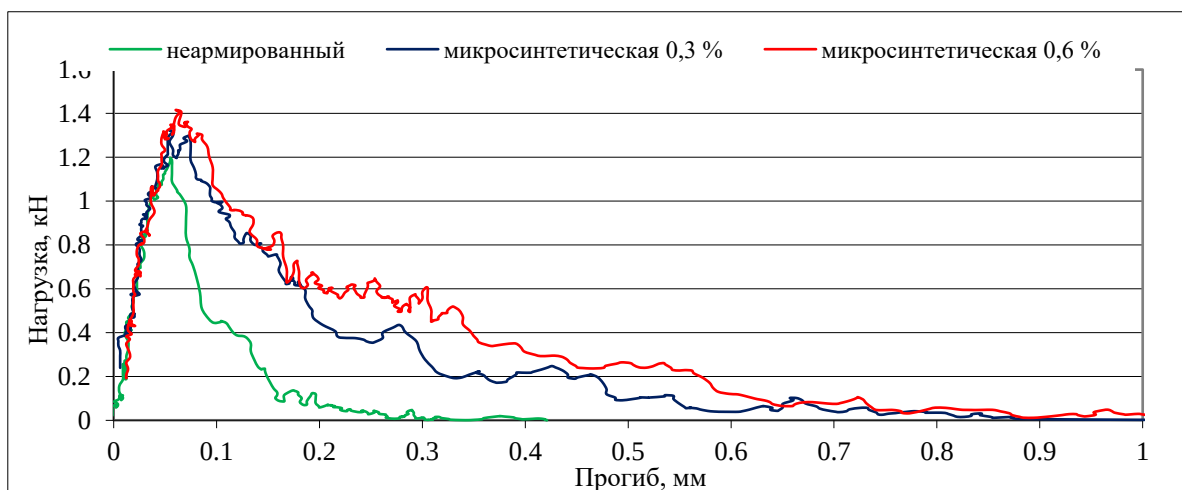


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных микрофиброй «Fibrin XT»

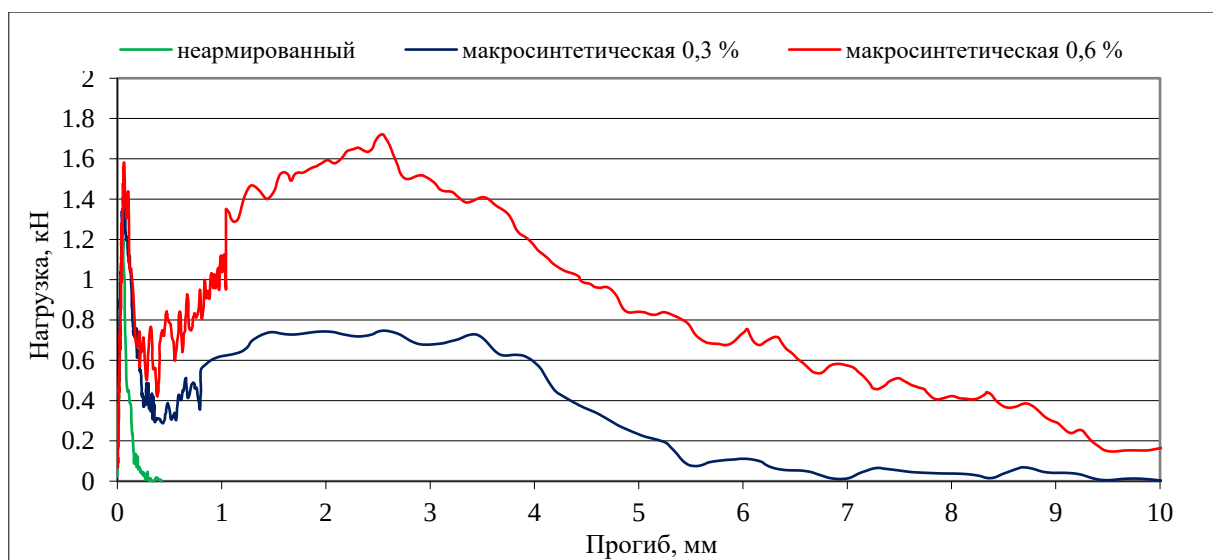


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных макрофиброй «Durus S500»

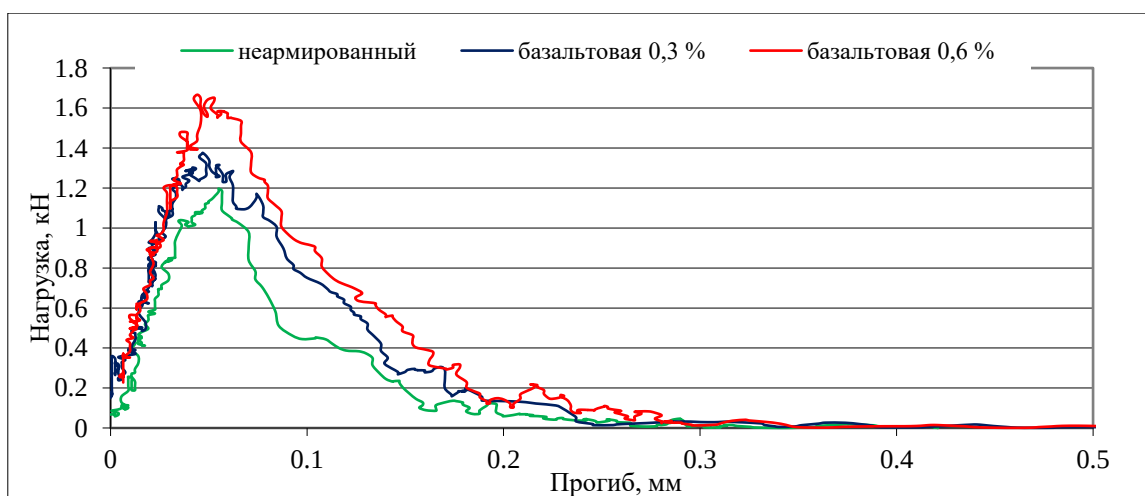


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных базальтовой фиброй

Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости керамзитобетонных и фиброкерамзитобетонных образцов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости

Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости	Вид и содержание фибры						
	неармированный	микросинтетическая (0,3 об. %)	микросинтетическая (0,6 об. %)	макросинтетическая (0,3 об. %)	макросинтетическая (0,6 об. %)	базальтовая (0,3 об. %)	базальтовая (0,6 об. %)
Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, G_i , Дж/м ²	14,2	16,6	19,1	20,2	21,0	15,8	16,8
Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, G_f , Дж/м ²	26,8	73,5	107,2	1057,6	2897,1	39,8	52,9
Критический коэффициент интенсивности напряжений, K_c , МПа·м ^{0,5}	0,54	0,54	0,55	0,60	0,64	0,66	0,68
J -интеграл, Дж/м ²	10,29	12,20	13,09	12,57	14,20	11,14	12,05
Предел прочности на растяжение при изгибе, $R_{изг}$, МПа	3,45	3,75	4,10	4,21	5,09	4,07	4,98

На рисунке 6 представлены диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных высокомодульной базальтовой и низкомодульной синтетической микро- и макрофиброй в количестве 0,3 % и 0,6 % по объему, по которым видно, что неармированный керамзитобетонный образец после появления магистральной трещины (при разрушающей нагрузке равной 1,2 кН и прогибу равному 0,06 мм) разрушается хрупко: наблюдается резкое нисхождение кривой деформирования.

Диаграммы деформирования керамзитобетонных образцов, армированных низкомодульной синтетической микрофиброй, а также и макрофиброй, в начале координат практически повторяют график неармированного керамзитобетонного образца. Однако после разрушения керамзитобетонной матрицы при достижении образцом прогиба, равного 0,06–0,08 мм, диаграммы приобретают более плавный нисходящий характер, что свидетельствует о включении в работу армирующих волокон, обеспечивающих повышение вязкости разрушения композита (G_f). При этом, использование макрофибры, за счет ее более высокого сцепления с матрицей, связанного с развитой боковой поверхностью и жесткой заделкой волокна, приводит к более заметному результату. Керамзитобетонные образцы, армированные высокомодульной базальтовой фиброй, подобно неармированным образцам, разрушаются хрупко.

В отличие от тяжелого фибробетона, в котором коэффициент интенсивности напряжений (K_c) остается неизменным при любом содержании низкомодульных синтетических волокон, их присутствие в составе керамзитобетона приводит к некоторому увеличению этой характеристики, свидетельствующем о повышении трещиностойкости композита, что может быть связано с меньшей плотностью и модулем упругости матрицы. Наибольшей трещиностойкостью закономерно обладают керамзитобетонные образцы, армированные базальтовой фиброй, так как ее модуль упругости значительно больше модуля упругости бетона.

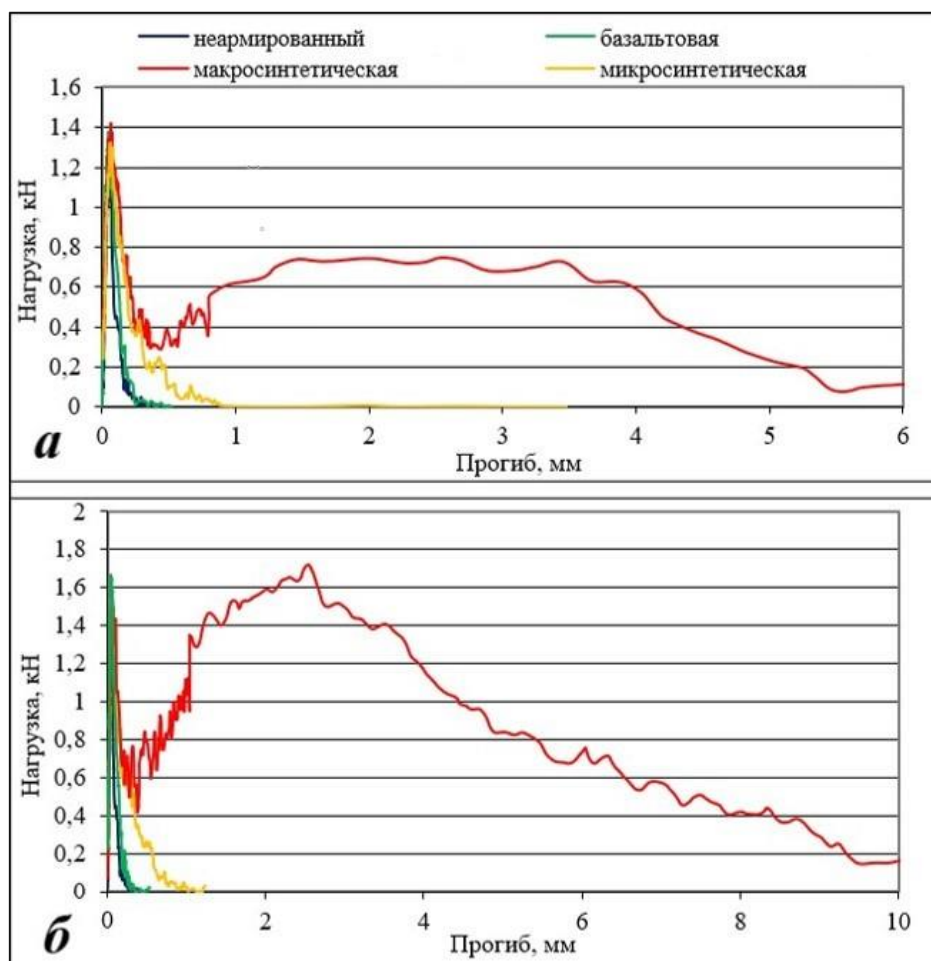


Рисунок 6 – Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов:
а – объемное содержание волокон 0,3 %; б – объемное содержание волокон 0,6 %

На кривой деформирования керамзитобетонного образца, армированного синтетической макрофиброй в количестве 0,6 % по объему, помимо пика в конце участка упругой зоны, соответствующего достижению образцом критических напряжений, можно заметить еще один перегиб, свидетельствующий о начале вытягивания армирующих волокон из керамзитобетонной матрицы. Начиная с этого момента, нагрузка, действующая на образец с трещиной, перераспределяется преимущественно на волокна, в результате чего они приобретают некоторое удлинение. Материал оказывается в состоянии предельного равновесия, когда прилагаемая нагрузка уравнивается усилиями сцепления волокон с матрицей. Момент разрушения границ раздела и нарушения сцепления характеризуется появлением на диаграмме второго максимума, после которого следует нисходящая ветвь, характеризующая энергозатратный процесс вытягивания волокон, заканчивающийся разрушением образца. При этом прочность на растяжение при изгибе образца составляет 5,09 МПа, что на 47,5 % больше, чем у неармированного керамзитобетонного образца и даже больше, чем у керамзитобетона, армированного высокомодульной базальтовой фиброй. Однако, следует отметить, что такая прочность достигается при прогибе, равном 2,6 мм, в то время как при армировании базальтовой фиброй его величина составляет 0,045 мм.

Заключение

Проведенные исследования показали, что вопреки общепринятой точке зрения использование низко модульных волокон, а именно полипропиленовой макрофибры, для

дисперсного армирования легкого бетона может оказаться более эффективным по сравнению с неметаллическими высокомодульными, даже в плане повышения прочности. Однако достижение этой прочности сопровождается значительным прогибом, образованием и развитием трещин, что безусловно необходимо учитывать при физико-механическом моделировании процессов деформирования и разрушения фиброармированных легких бетонов.

Благодарности

Статья публикуется по результатам выполнения гранта НПР СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») 2025 года.

Acknowledgments

This article is published based on the results of research supported by the 2025 grant from Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимова И.Н., Макридин Н.И. Технологические особенности формирования структуры и свойств конструкционных легких бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 2. С. 45–48.
2. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Особенности механического поведения и структурных изменений конструкционного керамзитобетона // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3 (40). С. 50–57.
3. Раупов Ч.С., Шермухамедов У.З., Маликов Г.Б. Сопоставление границ микротрещинообразования с длительной прочностью конструктивного керамзитобетона // Путевой навигатор. 2022. № 52 (78). С. 34–43.
4. Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г. Определение границ образования микротрещин в зависимости от плотности керамзитобетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 4 (52). С. 129–136. DOI: 10.25987/VSTU.2018.52.4.012
5. Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г. Методики определения границ микротрещинообразования // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 7 (70). С. 22–30. DOI: 10.18720/CUBS.70.2
6. Абдуманов А., Валиев Р.М., Каримов С.Н. Влияние структуры на вязкость разрушения керамзитобетона // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2010. Т. 53. № 6. С. 437–441.
7. Безгоднов И.М., Заикин С.П. Полные диаграммы деформирования высокопрочного керамзитобетона // Технологии бетонов. 2020. № 7-8 (168-169). С. 33–37.
8. Митасов В.М., Коянкин А.А. О единстве подхода представления диаграмм деформирования разновозрастных и разнопрочных бетонов в сборно-монолитных конструкциях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 80–85.
9. Chiadighikaobi P.C., Jean P.V., Sserunjogi N. Performance evaluation of basalt fiber on the deflection strength of expanded clay concrete beam // Construction economics. 2020. № 6 (66). Pp. 66–79.
10. Москалькова Ю.Г., Ржевущая В.А. Полипропиленовая фибра как фактор снижения полных усадочных деформаций керамзитобетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 1 (73). С. 11–23. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001
11. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5 (113). С. 379–387.
12. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Морозов В.И., Жаворонков М.И. Влияние крупного заполнителя на энергетические и силовые характеристики сталефибробетона // Строительство и реконструкция. 2022. № 3 (101). С. 110–118. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-101-3-110-118
13. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СибАДИ. 2022, Т. 19, № 5 (87). С. 752–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761
14. Колчунов В.И., Кузнецова К.Ю., Федоров С.С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плоскотянутых конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 3 (95). С. 15–26. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
15. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностойкости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137.
16. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволоочной фиброй // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 2. С. 143–147. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-143-147

17. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 301–310. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.301-310

REFERENCES

1. Maksimova I.N., Makridin N.I. Tekhnologicheskie osobennosti formirovaniya struktury i svoystv konstrukcionnyh legkih betonov // Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. 2012. № 2. Pp. 45–48. (rus)
2. Maksimova I.N., Makridin N.I., Polubarova Yu.V. Osobennosti mekhanicheskogo povedeniya i strukturnykh izmenenij konstrukcionnogo keramzitobetona // Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. 2019. № 3 (40). Pp. 50–57. (rus)
3. Raupov Ch.S., Shermukhamedov U.Z., Malikov G.B. Sopostavlenie granic mikrotreshchinoobrazovaniya s dlitel'noj prochnost'yu konstruktivnogo keramzitobetona // Putevoj navigator. 2022. № 52 (78). Pp. 34–43. (rus)
4. Semenyuk S.D., Moskal'kova Yu.G. Opredelenie granic obrazovaniya mikrotreshchin v zavisimosti ot plotnosti keramzitobetona // Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury. 2018. № 4 (52). Pp. 129–136. DOI: 10.25987/VSTU.2018.52.4.012 (rus)
5. Semenyuk S.D., Moskal'kova Yu.G. Metodiki opredeleniya granic mikrotreshchinoobrazovaniya // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij. 2018. № 7 (70). Pp. 22–30. DOI: 10.18720/CUBS.70.2 (rus)
6. Abdumanonov A., Valiev R.M., Karimov S.N. Vliyanie struktury na vyazkost' razrusheniya keramzitobetona // Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. 2010. T. 53. № 6. Pp. 437–441. (rus)
7. Bezgodov I.M., Zaikin S.P. Polnye diagrammy deformirovaniya vysokoprochnogo keramzitobetona // Tekhnologii betonov. 2020. № 7-8 (168-169). Pp. 33–37. (rus)
8. Mitasov V.M., Koyankin A.A. O edinstve podhoda predstavleniya diagramm deformirovaniya raznovozrastnykh i raznoprochnykh betonov v sborno-monolitnykh konstrukciyakh // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2020. № 4 (55). Pp. 80–85. (rus)
9. Chiadighikaobi P.C., Jean P.V., Sserunjogi N. Performance evaluation of basalt fiber on the deflection strength of expanded clay concrete beam // Construction economics. 2020. № 6 (66). Pp. 66–79.
10. Moskal'kova Yu.G., Rzhnevskaya V.A. Polipropilenovaya fibra kak faktor snizheniya polnykh usadochnykh deformatsij keramzitobetona // Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury. 2024. № 1 (73). Pp. 11–23. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001 (rus)
11. Sizyakov I.D. Treshchinostojkost' betona so stekloplastikovoju i stal'noj fibroj // Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 5 (113). Pp. 379–387. (rus)
12. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Morozov V.I., Zhavoronkov M.I. Vliyanie krupnogo zapolnitelya na energeticheskie i silovye harakteristiki stalefibrobetona // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2022. № 3 (101). Pp. 110–118. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-101-3-110-118 (rus)
13. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Ocenka effektivnosti dispersnogo armirovaniya betonov po pokazatelyam prochnosti i treshchinostojkosti // Vestnik SibADI. 2022, T. 19, № 5 (87). Pp. 752–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761 (rus)
14. Kolchunov V.I., Kuznecova K.Yu., Fedorov S.S. Model' kriteriya treshchinostojkosti i prochnosti plosoknapryazhennykh konstrukcij iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2021. № 3 (95). S. 15–26. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26 (rus)
15. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Razvitie metoda ispytaniya treshchinostojkosti stalefibrobetona // Ekonomika stroitel'stva. 2023. № 9. Pp. 132–137. (rus)
16. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Diagrammy deformirovaniya cementnykh kompozitov, armirovannykh stal'noj provolochnoj fibroj // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2018. № 2. Pp. 143–147. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-143-147 (rus)
17. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Sovershenstvovanie metodov opredeleniya silovykh i energeticheskikh harakteristik treshchinostojkosti fibrobetona // Vestnik MGSU. 2019. T. 14. Vyp. 3. Pp. 301–310. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.301-310 (rus)

Информация об авторах:

Пухаренко Юрий Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии».

E-mail: tsik54@yandex.ru.

Пантелеев Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии».
E-mail: dm-pant@yandex.ru.

Жаворонков Михаил Ильич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии».
E-mail: sith07@list.ru.

Information about authors:

Pukharensky Yuri V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering», St. Petersburg, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Consulting Professor of the Department of Technology of Building Materials and Metrology.
E-mail: tsik54@yandex.ru.

Panteleev Dmitrii A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering», St. Petersburg, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies of Building Materials and Metrology.
E-mail: dm-pant@yandex.ru.

Zhavoronkov Mikhail I.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering», St. Petersburg, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies of Building Materials and Metrology.
E-mail: sith07@list.ru.

Статья поступила в редакцию 22.03.2025
Одобрена после рецензирования 09.06.2025
Принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted 22.03.2025
Approved after reviewing 09.06.2025
Accepted for publication 11.06.2025