
Дисперсно-армированные бетоны на основе базальтового волокна

Е.Е. Ибе, Г.Н. Шibaева, Н.А. Артемьев, А.А. Миколайчик

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Россия, Абакан

Аннотация: Согласно современным нормативным требованиям, Республика Хакасия характеризуется высокой сейсмичностью, в связи с чем к зданиям и сооружениям предъявляются высокие требования по надежности и безопасности в соответствии с СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах». При проектировании необходимо значительное снижение или исключение вероятности аварийной ситуации, обеспечение необходимого запаса прочности и долговечности зданий. Добиться такого многостороннего эффекта можно, в том числе за счет внедрения технологий строительства с использованием фибробетонов.

Опыт российских и зарубежных исследователей показывает, что применение фибробетона в различных конструкциях позволяет добиться более высокой прочности на растяжение и разрыв, отсутствия усадки и устойчивости к трещинообразованию, а также высокой ударопрочности и пластичности. В связи с этим, исследование возможности применения фибробетонов в условиях Республики Хакасия является актуальным.

Целью данной работы является исследование конструкций с применением фибробетона на основе базальтовой фибры, обладающего повышенной прочностью, а также анализ напряженно-деформированного состояния моделей различных конструкций.

В статье приведены результаты определения оптимального процента армирования бетонов базальтовой фиброй на основе исследования кинетики изменения прочности при сжатии и изгибе. В работе приведены зависимости изменения прочности и усадочных деформаций от процента армирования. Показано, что наилучшими показателями характеризуются бетоны с содержанием 2% фибры. Отмечено, что не всегда увеличение процента армирования фиброй приводит к повышению прочности в связи с неравномерным распределением фибры по объему.

Авторами исследовано напряженно-деформированное состояние изгибаемых элементов (плиты, балки) на основе фибробетонов. Показано, что при использовании базальтовой фибры наблюдается снижение процента армирования рабочей арматурой железобетонных элементов от 26 до 57%.

Ключевые слова: Фибробетон, базальтовая фибра, процент армирования, изгибаемый элемент, усадка, деформация, НДС, прочность при сжатии, прочность при изгибе, экономия стали.

Введение

Начиная со второй половины XX столетия, широкое распространение получила новая разновидность железобетона – дисперсно-армированный бетон (фибробетон), роль дисперсной арматуры в котором выполняют короткие волокна (фибра).

Фибробетон – разновидность бетона, в котором достаточно равномерно распределена фибра в качестве армирующего материала. Фибра – микроарматура, равномерно армирующая бетон во всех плоскостях, повышающая класс бетона, прочность, ударостойкость и снижает образование усадочных трещин.

На основании данных [1–3] были выявлены основные свойства и показатели различных видов фибровых волокон, нашедших применение в строительстве. Результаты этих исследований представлены в таблице 1.

Как видим из таблицы, базальтовое волокно характеризуется высокими показателями прочности при растяжении и невысоким удлинением при разрыве, что позволяет оценить его как качественный компонент для фибробетонов для изгибаемых и растягиваемых элементов. Также данный материал является распространенным в Республике Хакасия.

На основании теоретических исследований фибробетонов выявлено, что благодаря таким характеристикам, как повышенная прочность, коррозионная стойкость, повышенная морозостойкость, стойкость к истиранию, устойчивость к трещинообразованию и т.д. фибробетон возможно эффективно использовать в различных конструкциях, в том числе гидротехнических [4].

Авторы [5] оптимизировали составы фибробетонов для применения в центрифугированных конструкциях для снижения возможности хрупкого разрушения.

Таблица № 1

Свойства различных видов волокон для изготовления фибры

Волокно	Плотность, г/см ³	Прочность на растяжение, МПа по данным			Модуль упругости, МПа	Удлинение при разрыве, %		
		[1]	[2]	[3]		[1]	[2]	[3]
Акриловое	1,10	210-420	–	–	2100-2150	25-45	–	–
Полипропиленовое	0,90	400-700	400-770	200-500	3500-8000	10-25	10-25	15-50
Полиэтиленовое	0,95	600-720	–	–	1400-4200	10-12	–	–
Вискозное	1,20	660-700	660-700	–	5600-5800	14-16	14-16	–
Полиамидное	0,9	720-750	720-900	–	1900-5000	24-25	5-20	–
Нейлоновое	1,1	770-840	700-840	300-700	4200-4500	16-20	16-20	5-70
Стальное	7,80	600-3150	500-1500	600-3100	190000-210 000	3-4	2-6	1,5
Асбестовое	2,60	910-3100	–	–	68000-70 000	0,6-0,7	–	–
Карбоновое	1,63	1200-4000	1200-4000	–	280000-380 000	2-2,2	2-2,2	–
Базальтовое	2,60	1600-3200	1600-3200	–	7000-13 000	1,4-3,6	1,4-3,6	–
Стеклянное	2,6	1800-3850	1800-3900	1500-2100	7000-8000	1,5-3,5	1,5-3,5	3
Углеродное	2,0	2000-3500	2500-4000	2500-3800	200000-700 000	1-1,6	1-1,6	0,5

Авторами [6, 7] показана эффективность полидисперсного армирования бетонов стальной фиброй, что позволяет повысить их прочностные и деформативные характеристики. В работах [8, 9] показано, что наименьший процент армирования стальной фиброй составляет 0,5%.

Авторы [10, 11] отмечают эффективность использования полипропиленового и углеродного волокна, в том числе для мелкозернистых бетонов.

Авторами [12] предлагается инновационная технология армирования бетонов стальной фиброй совместно с кокосовым волокном, что существенно повышает деформативные характеристики бетонов.

Также имеется множество результатов, показывающих целесообразность применения конструкций на основе фибробетонов, работающих в условиях повышенных температур [13, 14]. Опыт российских и зарубежных исследователей показывает, что применение фибробетона в различных конструкциях позволяет добиться более высокой прочности на растяжение и разрыв, отсутствия усадки и устойчивости к трещинообразованию, а также высокой ударпрочности и пластичности. В связи с этим, исследование возможности применения фибробетонов в условиях Республики Хакасия является актуальным.

При этом выявлено, что большинство результатов научных исследований в области фибробетонов имеют несогласованность с точки зрения полученных зависимостей. Также весьма актуальным является обоснование экономической эффективности использования фибробетонов путём анализа напряженно-деформированного состояния конструкций на основе фибробетонов.

Целью данной работы является исследование конструкций с применением фибробетона на основе базальтовой фибры, обладающего повышенной прочностью, а также анализ напряженно-деформированного состояния моделей различных конструкций с целью определения экономической эффективности.

В работе проведены исследования свойств фибробетонов на основе базальтового волокна для определения оптимального процента армирования фибробетонов, а также рассчитана эффективность экономии расхода арматуры в изгибаемых элементах.

Методика проведения исследований

Для обоснования целесообразности применения фибробетона, в лаборатории строительных материалов кафедры «Строительство» Хакасского Технического Института - филиала СФУ были проведены экспериментальные исследования. Были определены физико-механические свойства материалов, а также строительно-технические свойства фибробетонов.

Физико-технические свойства фибробетона определялись в соответствии с требованиями следующих стандартов:

- предел прочности на сжатие – ГОСТ 10180-2012;
- прочность на изгиб – ГОСТ 10180-2012;
- средняя плотность – ГОСТ 12730.1-78;
- усадка при высыхании – ГОСТ 25485-89;

Для изучения прочностных свойств фибробетона изготавливались образцы - кубики 10x10x10см, а также образцы балочки 4x4x16см. Образцы твердели в нормальных условиях.

Предел прочности при сжатии определялся на лабораторном прессе П-125, предел прочности при изгибе - на приборе МИИ-100.

Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на свойства фибробетонов

Результаты испытаний показали зависимость прочности при сжатии и изгибе от водоцементного отношения и процента армирования базальтовой и стальной фибры. Зависимости фибробетона с базальтовым волокном представлены на рисунках 1, 2.

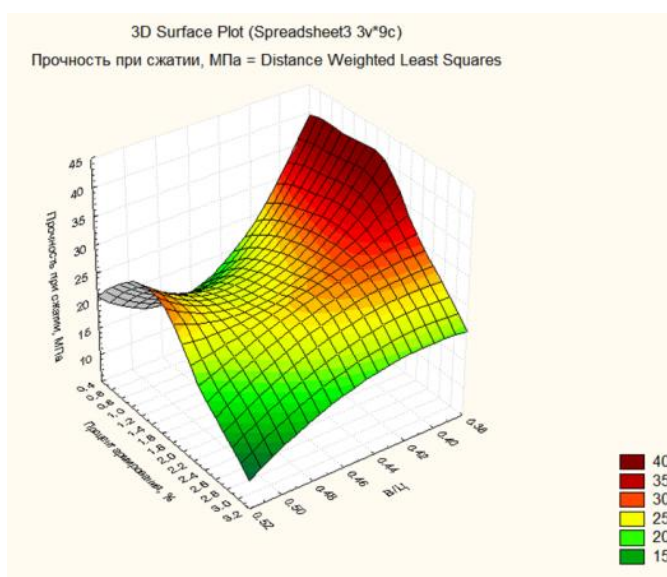


Рис. 1. – Зависимость прочности при сжатии фибробетона с базальтовой фиброй от водоцементного отношения и процента армирования

По графику можно сделать вывод о том, что прочность при сжатии повышается с понижением водоцементного отношения. Наибольшая прочность достигается при 1-2% армирования базальтовой фиброй, однако дальнейшее увеличение процента армирования приводит к снижению прочности. Прочность при сжатии при В/Ц=0,4 с процентом армирования 1% повышается по сравнению с образцом с 3% армирования на 38%, с 0,5% армирования – на 4%. Прочность при сжатии при проценте армирования базальтовой фиброй 1%, с В/Ц=0,4 увеличивается по сравнению с В/Ц=0,45 на 44%, с В/Ц=0,5 – на 36%.

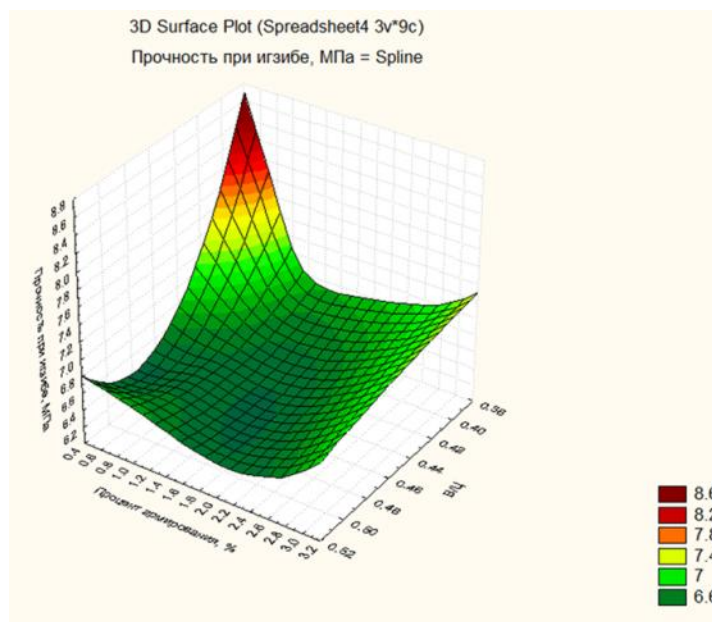


Рис.2. – Зависимость прочности при изгибе фибробетона с базальтовой фиброй от водоцементного отношения и процента армирования

В данном случае прочность при изгибе также увеличивается при снижении В/Ц. Наибольшая прочность при изгибе у образцов с процентом армирования от 0,5% до 1% и В/Ц=0,4. При увеличении В/Ц отношения с 0,4 до 0,5 прочность при изгибе падает на 5-20%.

Зависимости фибробетона со стальной фиброй представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Результаты исследования фибробетонов со стальной фиброй

№ состава	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа
1 (0,5%, В/Ц=0,5)	18,4	5,86
2 (1%, В/Ц=0,5)	19,76	7,03
3 (0,5%, В/Ц=0,4)	23,93	6,09
4 (1%, В/Ц=0,4)	25,38	7,26

Наибольшая прочность при сжатии достигается при армировании бетона стальной фиброй 1% при В/Ц=0,4. При этом прочность повышается по сравнению с бетоном со стальной фиброй 0,5% на 6%, а по сравнению с В/Ц=0,5 – на 22%.

Усадочные деформации были определены на приборе для измерения усадки с индикатором часового типа, который был изготовлен самостоятельно в лаборатории строительных материалов. Прибор представлен на рисунке 3.



Рис.3. – Установка для измерения усадки с индикатором часового типа

Линейные деформации базальтофибробетона представлены на рисунке 4. Из графика видно, что на усадочные деформации В/Ц отношение практически не влияет, но с увеличением процента армирования усадочные деформации уменьшаются.

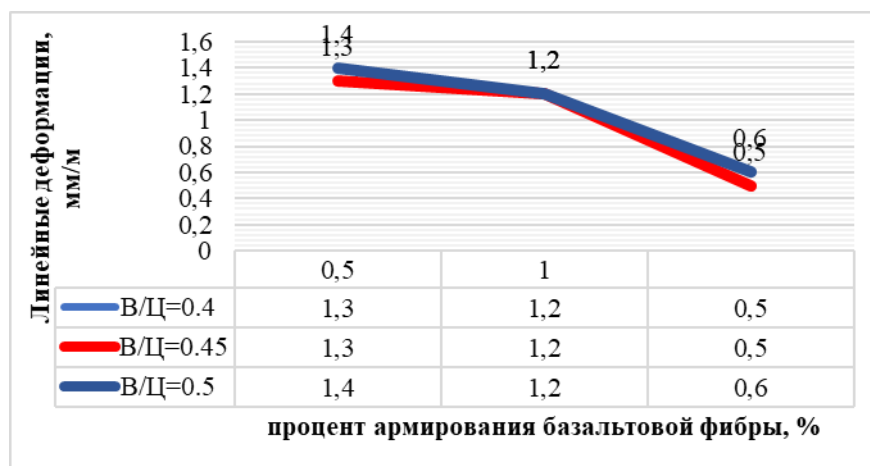


Рис.4. – Усадочные деформации базальтофибробетона

Исследование НДС изгибаемых элементов

Для обоснования возможности применения фибробетона в различных строительных конструкциях, а также эффективности и целесообразности его применения с частичной заменой арматуры, произведем расчет изгибаемых элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР и SCAD Office. Для расчета возьмем монолитную плиту и балку прямоугольного сечения.

Результаты расчета фибробетонной плиты приведены на рисунках 5-11.

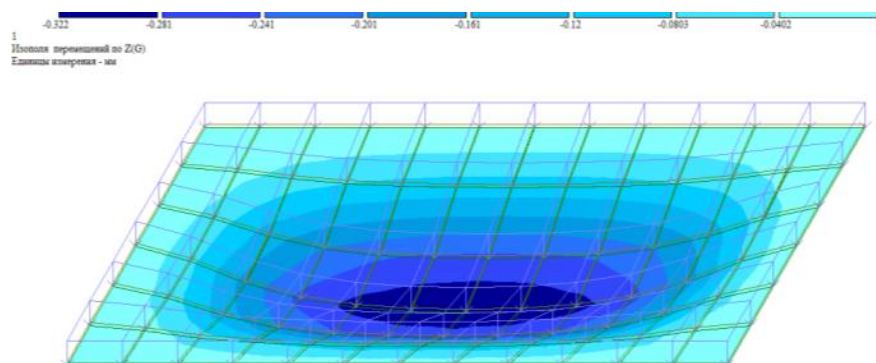


Рис.5. – Изополя напряжений по оси Z фибробетонной плиты

Из расчета видно, что перемещения по оси Z фибробетонной монолитной плиты уменьшились на 32% по сравнению с обычной бетонной плитой.

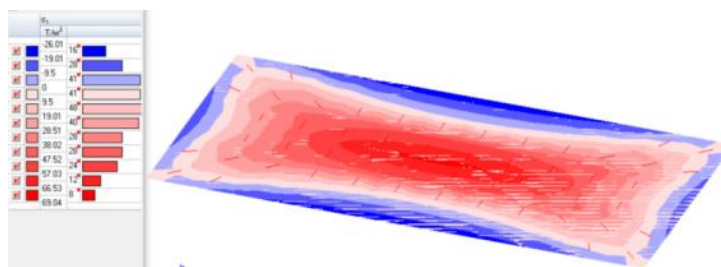


Рис.6. – Напряжения во внутреннем слое фибробетонной плиты

Напряжения во внутреннем слое бетонной плиты больше внутренних напряжений фибробетонной плиты на 33%.

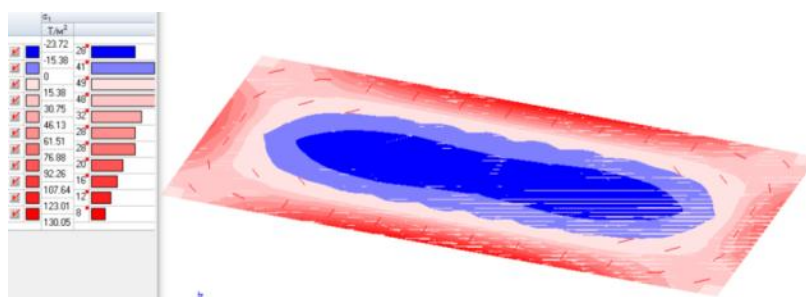


Рис.7. – Напряжения во внешнем слое фибробетонной плиты

За счет более высокого модуля упругости фибробетона и большей прочности на сжатие и растяжение, во внешнем слое плиты возникают напряжения меньше на 17%.

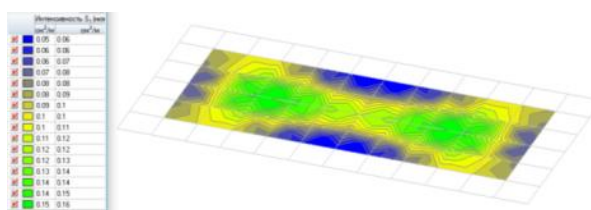


Рис.8. – Подбор нижней арматуры по X (фибробетонная плита)

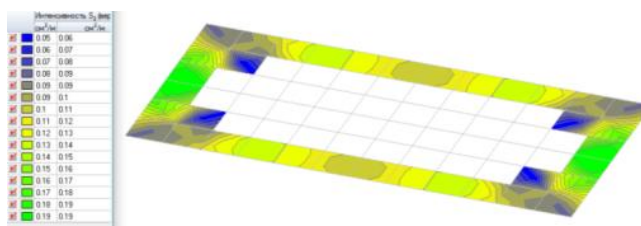


Рис.9. – Подбор верхней арматуры по X (фибробетонная плита)

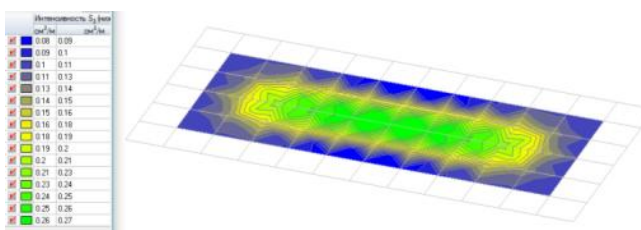


Рис.10. – Подбор нижней арматуры по Y (фибробетонная плита)

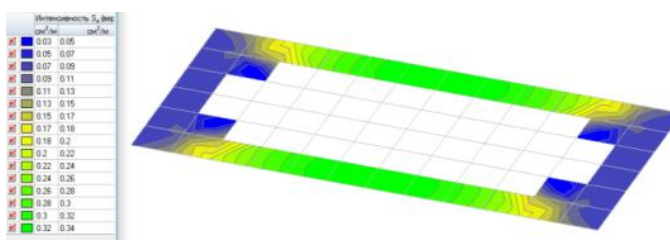


Рис.11. – Подбор верхней арматуры по Y (фибробетонная плита)

Из рисунков подбора арматуры по осям x и y , верхней и нижней арматуры, видно, что благодаря фибробетону убирается часть арматуры и уменьшается ее площадь поперечного сечения. Так нижняя арматура по оси X сокращается на 38%, верхняя по X – на 48%, нижняя по Y – на 47%, верхняя по Y – на 46%. В общем арматура в фибробетонной плите сократилась на 44,75%, практически в 2 раза.

Результаты расчета бетонной и фибробетонной балки представлены на рисунках 12, 13.

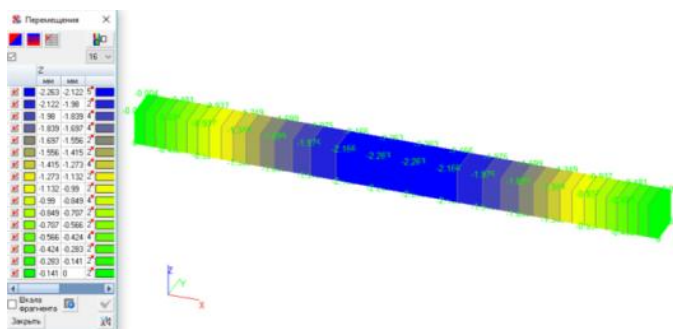


Рис.12. – Перемещения в фибробетонной балке по оси Z

Максимальные перемещения в фибробетонной балке сократились на 34%.

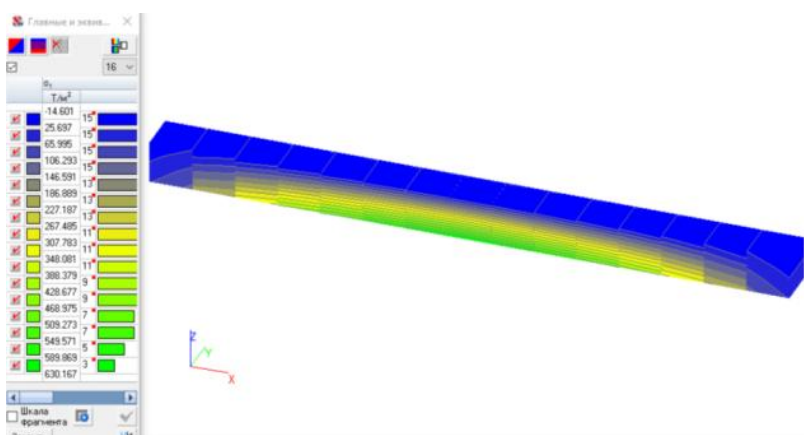


Рис.13. – Отображение главных и эквивалентных напряжений фибробетонной балки σ_1

Нормальные напряжения σ_1 в сжатой зоне сократились на 61%, а в растянутой – на 2%.

Сравнивая результаты армирования бетонной балки с результатами армирования фибробетонной балки, можно сделать вывод о том, что благодаря фибре происходит сокращение площади нижней арматуры с $A_s = 10,05\text{см}^2$ до $A_s = 7,47\text{см}^2$, что составляет 26%.

Выводы

Из проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальный процент армирования базальтовой фибры 1%, с $V/C = 0,4$, стальной фибры также 1% с $V/C=0,4$.

2. При сейсмическом воздействии, что очень актуально в нашем регионе, могут увеличиваться растягивающие напряжения, вследствие чего образуются потенциальные трещины, которые в дальнейшем могут привести к разрушению. Благодаря снижению главных и эквивалентных напряжений фибробетон способен обеспечить безопасную эксплуатацию и долговечность конструкций.

3. Сокращение армирования различных конструкций благодаря добавлению фибры: в плите сокращение площади поперечного сечения арматуры составляет – 45%; в балке – 26%; в колонне – 41%; в ж/б каркасе – 57%.

С учетом стоимости фибры экономия в денежном эквиваленте на армирование и трудоемкость арматурных работ составляет: для плиты – 11%; для балки – 7%; для колонны – 10%, для ж/б каркаса – 14%.

Литература

1. Бабков В. В. и др. Применение арочных сталефибробетонных малопроектных строений в конструкциях насыпных мостов и возможности их усиления //Строительные материалы. – 2014. – №. 1-2. – С. 75-79.
2. Войлоков И. А. Сталефибробетон в слоях износа покрытий промышленных полов //Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №. 9. – С. 58-58.
3. Гербер Д.В. Исследование влияния наномодифицированных волокон на свойства композиционных материалов с цементной матрицей // Успехи в химии и химической технологии. Том XXV №6 (122) – Москва. – 2011. – с. 22-25.
4. Ибе Е. Е., Шугурова А. В. Перспективы применения фибробетона при строительстве гидротехнических сооружений // Вестник евразийской науки. – 2017. – Т. 9. – №. 1 (38). URL: naukovedenie.ru/PDF/61TVN117.pdf
5. Нажуев М.П., Халюшев А.К., Ткач П.С., Ефимов И.И., Санин И.С., Курбанов Н.С., Орлов М.Г. Эффективность применения различных видов фибры и крупного заполнителя в виброцентрифугированных бетонах // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – №. 2. URL: esj.today/PDF/45SAVN220.pdf
6. Пухаренко Ю. В. и др. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры //Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №. 1. – С. 107–111.
7. Пухаренко Ю. В. и др. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволочной фиброй //Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – №. 2. – С. 143-147.

8. Талантова К. В., Михеев Н. М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник. – 2011. – №. 1. – С. 194–199.

9. Ключев С. В. и др. Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов //Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №. 3. – С. 7-14.

10. Голова Т. А., Андреева Н. В., Жуков А. Д. Фибробетон на основе углеродного волокна для строительства // Colloquium-journal. – Голопристанський міськрайонний центр зайнятості, 2019. – №. 9 (33). – С. 14-16.

11. Казлитина О.В. Фибробетон для монолитного строительства: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород. – 2013. – 23с.

12. Das S. et al. Effects of incorporating hybrid fibres on rheological and mechanical properties of fibre reinforced concrete //Construction and Building Materials. – 2020. – Т. 262. – p. 120561.

13. Wu H., Lin X., Zhou A. A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures //Cement and Concrete Research. – 2020. – Т. 135. – p. 106117.

14. Amin M. et al. Investigating the mechanical and microstructure properties of fibre-reinforced lightweight concrete under elevated temperatures // Case Studies in Construction Materials. – 2020. – Т. 13. – С. e00459.

References

1. Babkov V. V. i dr. Stroitel'nye materialy. 2014. №. 1-2. pp. 75-79.
2. Voylovkov I. A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2010. №. 9. pp. 58-58.

3. Gerber D.V. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. Tom XXV №6 (122). Moskva. 2011. pp. 22-25.
4. Ibe E.E., Shugurova A.V. Vestnik Evraziyskoy nauki, 2017, №1. URL: naukovedenie.ru/PDF/61TVN117.pdf
5. Nazhuev M.P., Khalyushev A.K., Tkach P.S., Efimov I.I., Sanin I.S., Kurbanov N.S., Orlov M.G. Vestnik Evraziyskoy nauki, 2020, №2. URL: esj.today/PDF/45SAVN220.pdf
6. Pukharenko Yu. V. i dr. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2016. №. 1. pp. 107-111.
7. Pukharenko Yu. V. i dr. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2018. №. 2. pp. 143-147.
8. Talantova K.V. Polzunovskiy Vestnik №1. Barnaul. 2011. pp. 194-199.
9. Klyuev S. V. i dr. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2013. №. 3. pp. 7-14.
10. Golova T. A., Andreeva N. V., Zhukov A. D. Colloquium-journal. Golopristans'kiy mis'krayonniy tsentr zaynyatosti, 2019. №. 9 (33). pp. 14-16.
11. Kazlitina O.V. Fibrobeton dlya monolitnogo stroitel'stva [Fiber concrete for monolithic construction]. Belgorod: BGTU, 2013. 23p.
12. Das S. et al. Construction and Building Materials. 2020. №. 262. pp. 120561.
13. Wu H., Lin X., Zhou A. Cement and Concrete Research. 2020. №. 135. pp. 106117.
14. Amin M. et al. Case Studies in Construction Materials. 2020. №. 13. pp. e00459.