ISSN 1993-3509 (online)
Современное промышленное и гражданское строительство. 2025. Т. 21, № 2. С. 93—102.
Modern Industrial and Civil Construction. 2025. Vol. 21, no. 2. P. 93—102.
Научная статья
УДК 691.33
doi: 10.71536/spgs.2025.v21n2.4
edn: dgjxqz

МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ФИБРОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА И ЗОЛЫ-УНОСА ТЭС

Екатерина Таеровна Бородай [1], Елена Владимировна Егорова [2], Ирина Юрьевна Петрик [3], Татьяна Петровна Киценко [4], Виктор Николаевич Губарь [5]
[1,2,3,4,5] Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,
[1] e.t.borodaj@donnasa.ru, [2] e.v.egorova@donnasa.ru, [3] i.y.petrik@donnasa.ru,
[4] t.p.kitsenko@donnasa.ru, [5] v.n.gubar@donnasa.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния количества золы-уноса ТЭС в составе композиционного вяжущего на эксплуатационные свойства бетонов, армированных полипропиленовой фиброй. Представлены составы фибробетонов с содержанием золы-уноса 5, 10 и 15 % взамен массы цемента и с содержанием фибры 400, 500 и 600 г/м^3, а также с количеством добавки суперпластификатора в пределах 0,6–1 %. Выполнено исследование морозостойкости разработанных составов фибробетонов. Анализ полученных результатов показал, что морозостойкость образцов всех составов фибробетона выше, чем у образцов тяжелого бетона контрольного состава. Наиболее высокими показателями морозостойкости характеризуются образцы составов № 1, 2 и 5 с максимальным содержанием добавки золы-уноса Зуевской ТЭС и фиброволокна. При этом для всех составов уменьшение массы образцов после испытаний не превышает 2 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 10060-2012. Исследования показали, что введение в состав фибробетона золы-уноса Зуевской тепловой электростанции позволяет получать бетон с высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: тяжелый бетон, полипропиленовая фибра, фибробетон, композиционное вяжущее, портландцемент, зола-уноса ТЭС, морозостойкость

Для цитирования: Морозостойкость фибробетона с использованием композиционного вяжущего на основе портландцемента и золы-уноса ТЭС / Е. Т. Бородай [и др.]. // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2025. Т. 21, № 2. С. 93–102. doi: 10.71536/spgs.2025.v21n2.4. edn: dgjxqz.

Original article

FROST RESISTANCE OF FIBER-REINFORCED CONCRETE USING A COMPOSITE BINDER BASED ON PORTLAND CEMENT AND THERMAL POWER PLANT FLY ASH

Ekaterina T. Borodai [1], Elena V. Yegorova [2], Irina Yu. Petrik [3], Tatyana P. Kitsenko [4], Viktor N. Gubar [5]
[1,2,3,4,5] Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,
[1] e.t.borodaj@donnasa.ru, [2] e.v.egorova@donnasa.ru, [3] i.y.petrik@donnasa.ru,
[4] t.p.kitsenko@donnasa.ru, [5] v.n.gubar@donnasa.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the effect of the amount of fly ash from thermal power plants in the composition of a composite binder on the performance properties of concrete reinforced with polypropylene fiber. The compositions of fiber-reinforced concrete are presented, which contain fly ash of 5, 10 and 15 % instead of the mass of cement, with a fiber content of 400, 500 and 600 g/m^3, as well as with a superplasticizer additive in the range of 0,6–1 %. A study of the frost resistance of the developed composition

© Бородай Е. Т., Егорова Е. В., Петрик И. Ю., Киценко Т. П., Губарь В. Н., 2025

of fiber-reinforced concrete was carried out. An analysis of the results showed that the frost resistance of samples of all fiber concrete compositions is higher than that of samples of heavy concrete of the control composition. The best results were shown by samples of formulations № 1, 2 and 5 with the maximum content of fly ash additives from the Zuyevskaya TPP and fibroblast. At the same time, for all formulations, the weight reduction of samples after testing does not exceed 2 %, which meets the requirements of GOST 10060-2012. Studies have shown that the introduction of fly ash from the Zuyevskaya thermal power plant into the fiber-reinforced concrete makes it possible to obtain concrete with high performance characteristics.

Keywords: heavy concrete, polypropylene fiber, fibreglass, composite binder, Portland cement, thermal power plant fly ash, frost resistance

For citation: Frost resistance of fiber-reinforced concrete using a composite binder based on portland cement and Thermal Power Plant fly ash / E. T. Borodai [et al.]. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2025;21(2):93–102. (In Russ.). doi: 10.71536/spgs.2025.v21n2.4. edn: dgjxqz.

Введение

Для возведения зданий и сооружений, соответствующих современным требованиям к их качеству и эксплуатационным характеристикам, необходимо обеспечить наличие качественных и долговечных строительных материалов. Одним из таких материалов является тяжелый бетон, содержащий в своем составе техногенные отходы и полипропиленовую фибру. Наличие фибры способствует снижению трещинообразования и препятствует появлению и распространению трещин, тем самым повышая водонепроницаемость, морозостойкость и долговечность бетона. Использование пластифицирующих добавок в составе бетона также способствует повышению его долговечности.

Оценка долговечности строительных материалов проводится на основе результатов лабораторных испытаний (например, испытаний на морозостойкость, водонепроницаемость, стойкость к химическому воздействию).

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время, в условиях ужесточающихся требований к долговечности и экологичности строительных материалов, актуальным является разработка составов и технологий производства бетонов, обладающих повышенной морозостойкостью и сниженным негативным воздействием на окружающую среду [1]. Бетон, эксплуатируемый в условиях циклического замораживания и оттаивания, подвергается интенсивному разрушению, связанному с увеличением объема воды при замерзании в порах и капиллярах [2]. Этот процесс приводит к возникновению внутренних напряжений, образованию микротрещин и, в конечном итоге, к снижению прочности и разрушению материала [3].

Одним из эффективных способов повышения морозостойкости бетона является армирование его дискретными волокнами (фиброй), что позволяет повысить трещиностойкость и снизить проницаемость материала [4]. Добавление фибры сдерживает развитие трещин, тем самым уменьшая доступ воды к порам и предотвращая критическое давление воды при замерзании. Также фибра уменьшает усадку бетона, предотвращая возникновение микротрещин, через которые вода может проникнуть внутрь структуры [5].

Полипропиленовая фибра является одним из наиболее распространенных и экономически эффективных видов фибры, используемых для армирования бетона. Благодаря своей химической инертности, устойчивости к коррозии и относительно низкой стоимости, полипропиленовая фибра широко применяется в различных областях строительства, в том числе и для повышения морозостойкости бетона [6].

Полипропиленовая фибра оказывает комплексное воздействие на структуру и свойства бетона, что обусловлено ее физико-механическими характеристиками и особенностями взаимодействия с цементным камнем. Основные механизмы воздействия полипропиленовой фибры на структуру и свойства бетона включают [7–9]:

1. Снижение усадочных деформаций. Полипропиленовая фибра эффективно сдерживает усадку бетона на ранних стадиях твердения,

предотвращая образование микротрещин, которые являются потенциальными путями проникновения воды в структуру бетона.

2. Повышение трещиностойкости. Полипропиленовая фибра, равномерно распределенная в объеме бетона, препятствует распространению трещин, образующихся под воздействием нагрузок или температурных деформаций. Фибра перераспределяет напряжения в зоне трещины, увеличивая энергию разрушения и повышая трещиностойкость материала.
3. Снижение проницаемости. Уменьшение размера и количества трещин, достигаемое за счет армирования полипропиленовой фибры, приводит к снижению проницаемости бетона для воды и агрессивных веществ, что, в свою очередь, повышает его морозостойкость.
4. Повышение ударной вязкости. Полипропиленовая фибра увеличивает ударную вязкость бетона, повышая его устойчивость к механическим воздействиям, которые могут приводить к образованию трещин и снижению морозостойкости.

Добавление полипропиленовой фибры позволяет увеличить количество циклов замораживания и оттаивания, которые выдерживает бетон без значительного снижения прочности. Кроме того, наблюдается улучшение микроструктуры материала, выражающееся в снижении количества крупных пор и микротрещин. Как следствие, возрастает коэффициент морозостойкости, характеризующий отношение прочности образцов после воздействия циклов заморозки-разморозки к их первоначальной прочности [10].

Эффективность применения полипропиленовой фибры для повышения морозостойкости бетона зависит от ряда факторов: тип, длина и диаметр, концентрация фибры.

Различают моноволоконную и фибриллированную полипропиленовую фибру. Фибриллированная обладает большей поверхностью контакта с цементным камнем, что способствует более эффективному сдерживанию трещин.

Оптимальная длина и диаметр фибры зависят от типа бетона и условий эксплуатации конструкции. Слишком короткая фибра не обеспечивает достаточного сдерживания трещин, а слишком длинная может затруднять перемешивание и укладку бетонной смеси [11].

Концентрация фибры должна быть оптимизирована для достижения требуемых свойств бетона. Слишком низкая концентрация не обеспечивает достаточного эффекта, а слишком высокая может ухудшить удобоукладываемость бетонной смеси и снизить ее прочность.

Другим перспективным направлением повышения долговечности бетонов является использование композиционных вяжущих, в которых часть портландцемента заменяется активными минеральными добавками, такими как зола-уноса ТЭС. Зола-уноса, являясь побочным продуктом сжигания угля на тепловых электростанциях (ТЭС), не только позволяет снизить расход цемента и себестоимость бетона, но и улучшить его некоторые свойства, включая удобоукладываемость, водонепроницаемость и долговечность. Пуццолановая активность золы-уноса приводит к образованию дополнительных гидросиликатов кальция (C-S-H), что уплотняет структуру бетона и снижает его проницаемость [12].

Использование золы-уноса в качестве частичной замены цемента оказывает комплексное воздействие на свойства бетона. Этот эффект определяется химическим и минералогическим составом золы, её тонкостью помола, а также условиями твердения бетона. Основными преимуществами использования золы-уноса являются [13; 14]:

1. Снижение тепловыделения при гидратации. Замена части цемента золой-уноса приводит к снижению интенсивности тепловыделения при гидратации, что особенно важно для массивных конструкций, где высокие температуры могут вызывать термическое трещинообразование.
2. Улучшение удобоукладываемости. Частицы золы-уноса, имеющие сферическую форму, улучшают удобоукладываемость и снижают водоотделение бетонной смеси.
3. Повышение долговечности. За счет пуццолановой реакции, зола-уноса вступает во взаимодействие с гидроксидом кальция, образуя дополнительные гидросиликаты кальция, что приводит к уплотнению структуры бетона, снижению его проницаемости и повышению устойчивости к воздействию агрессивных сред.

Несмотря на указанные преимущества, следует учитывать, что замена части цемента золой-уноса может приводить к замедлению набора

прочности в ранние сроки твердения, что необходимо учитывать при проектировании и строительстве конструкций [15].

Сочетание использования золы-уноса и фибры позволяет получить фибробетон с высокой морозостойкостью, сочетающий в себе преимущества обоих компонентов. Зола-уноса уплотняет структуру бетона и снижает его проницаемость, а фибра сдерживает развитие трещин и повышает его трещиностойкость [16].

Цель научной работы

Целью исследования является изучение морозостойкости разработанных составов фибробетона с повышенными прочностными свойствами на основе композиционного вяжущего с добавкой золы-уноса Зуевской ТЭС.

Основной материал исследования

Изучение эксплуатационных свойств фибробетонов проводилось на составах, разработанных и исследованных в предыдущей публикации [17]. Выбранные для проведения научных разработок исходные материалы предварительно были исследованы на соответствие требованиям нормативных документов. В составах бетонов применялись следующие материалы:

- вяжущее вещество – портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «ПИК-ЦЕМЕНТ» (пгт. Новоамвросиевское, ДНР) – по ГОСТ 30515-2013;
- мелкий заполнитель – песок кварцевый (П) Ясиноватского месторождения с модулем крупности 1,3 и содержанием пылевидных и глинистых примесей 3,1 % – по ГОСТ 8736-2014;
- активная минеральная добавка – зола-уноса Зуевской ТЭС (ЗУ) – по ГОСТ 25818-2017. Химический состав золы-уноса, %: SiO_2 – 53,44; Al_2O_3 – 23,40; Fe_2O_3 – 8,31; CaO – 1,66; MgO – 1,35; SO_3 – 0,17; Na_2O – 0,62; K_2O – 2,87; TiO_2 – 0,98; P_2O_5 – 0,26; ППП – 6,92;
- химическая добавка – суперпластификатор (СП) на основе водного раствора модифицированных поликарбоксилатных эфиров и лигносульфонатов SikaPlast-520 N для бетонов и растворов с высокими эксплуатационными характеристиками. Удовлетворяет требованиям ТУ 20.59.59-024-13613997-2019;
- полипропиленовое фиброволокно (Ф) Sika-Fiber PPM-12 RU (линейная плотность – 0,33–0,84 текс; длина – 12 мм; диаметр – 22–35 мкм). Произведена по ТУ 20.60.11-056-13613997-2020;
- крупный заполнитель – щебень гранитный (Щ) Тельмановского месторождения фракции 5–10 мм – по ГОСТ 8267-93.

Физико-механические испытания образцов бетона проводились на образцах с ребром длиной 100 мм по стандартным методикам согласно ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 310.4-81. Уплотнение образцов осуществлялось на стандартной лабораторной виброплощадке, время вибрации составляло 15–20 сек. Образцы твердели в камере с нормальными условиями (температура 20±3 °С, относительная влажность окружающей среды 95±5 %). Сушка образцов проводилась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105–110 °С.

Определение морозостойкости проводилось по второму базовому методу при многократном замораживании и оттаивании по ГОСТ 10060-2012 [18] (среда насыщения – 5 %-ный водный раствор хлорида натрия; среда и температура замораживания – воздушная, минус (18 ±2)°С; среда и температура оттаивания – 5 %-ный водный раствор хлорида натрия, (20 ±2)°С) после достижения бетоном проектного возраста. Этот метод подходит для бетонов дорожных и аэродромных покрытий и бетонов конструкций, эксплуатирующихся при действии минерализованной воды. Испытания проводились непрерывно.

Были разработаны 9 составов фибробетонов (таблица 1) с варьированием содержания золы-уноса в количестве 5, 10 и 15 % от массы цемента; содержания фибры в составе бетона 400, 500 и 600 г/м^3; содержания добавки суперпластификатора в пределах 0,6–1 %.

Результаты экспериментальных исследований. Выводы

Оценку морозостойкости фибробетона осуществляли по: показателям уменьшения массы образцов и визуальному осмотру (таблица 2), по изменению предела прочности при сжатии контрольных (таблица 3) и основных образцов (таблица 4).

Результаты научных исследований показывают, что морозостойкость образцов всех составов

Таблица 1. Составы фибробетона

№ состава п/п	Расход материалов, кг/м^3						
	ПЦ	ЗУ	СП	Ф	В	Щ	П
1	254	64	3	0,6	207	1 151	630
2	254	64	2	0,6	208	1 151	630
3	286	32	2	0,6	208	1 151	630
4	286	32	3	0,6	207	1 151	630
5	254	64	3	0,4	207	1 151	630
6	254	64	2	0,4	208	1 151	630
7	286	32	2	0,4	208	1 151	630
8	286	32	3	0,4	207	1 151	630
9	270	48	3	0,5	207	1 151	630
К	318	–	–	–	210	1 151	630

Таблица 2. Результаты определения морозостойкости фибробетона

№ состава	Показатели	Число циклов замораживания-оттаивания		
		50	75	100
1	Уменьшение массы, %	0,03	0,15	0,30
	Визуальные повреждения	отсутствуют		
2	Уменьшение массы, %	0,03	0,17	0,32
	Визуальные повреждения	отсутствуют		
3	Уменьшение массы, %	0,12	0,20	0,59
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
4	Уменьшение массы, %	0,14	0,21	0,60
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
5	Уменьшение массы, %	0,05	0,16	0,31
	Визуальные повреждения	отсутствуют		
6	Уменьшение массы, %	0,16	0,24	0,60
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
7	Уменьшение массы, %	0,20	0,28	0,71
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
8	Уменьшение массы, %	0,21	0,34	0,84
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
9	Уменьшение массы, %	0,18	0,32	0,55
	Визуальные повреждения	отсутствуют		шелушение поверхности
К	Уменьшение массы, %	0,20	0,68	1,75
	Визуальные повреждения	отсутствуют	шелушение поверхности	шелушение поверхности, ребер, трещины, сколы

фибробетона выше, чем у образцов тяжелого бетона контрольного состава (К). Наилучшие результаты показали образцы составов № 1, 2 и 5 с максимальным содержанием добавки золы-уноса Зуевской тепловой электростанции и фиброволокна. После визуального осмотра у этих составов отсутствовали какие-либо изменения или нарушения поверхности. При этом для всех составов уменьшение массы образцов до и после испытаний не превышает 2 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 10060-2012.

Нижняя граница доверительного интервала прочности в МПа контрольных образцов составов № 1–9 с учетом коэффициента 0,9 равна

Таблица 3. Прочность контрольных образцов фибробетона (испытания – 100 циклов замораживания и оттаивания по второму базовому методу)

Номер образца в серии	Прочность фибробетона, МПа, состава №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	К
1	37,7	38,0	32,7	34,5	35,0	30,7	31,5	32,8	34,2	33,1
2	38,0	39,2	33,2	35,2	36,1	30,9	31,4	32,9	34,9	32,9
3	38,1	39,8	34,0	35,9	36,4	31,2	32,0	33,5	35,0	32,6
4	37,2	40,2	32,2	36,0	35,8	31,7	32,3	33,1	35,7	31,5
5	37,9	39,5	31,8	34,2	37,0	32,1	31,1	32.1	34,6	32,0
6	38,6	38,9	32,8	32,9	35,2	30,0	32,0	32,2	33,0	33,7
Показатель	Значения показателей									
$X_{ср.}^{I}$, МПа	37,9	39,3	32,8	34,8	35,9	31,1	31,7	32,9	34,6	32,6
$\sigma_{п}^{I}$, МПа	0,6	0,9	0,9	1,2	0,8	0,8	0,5	0,6	1,1	0,9
V, %	1,6	2,3	2,7	3,4	2,2	2,6	1,6	1,8	3,2	2,8
X_{min}^{I}, МПа	36,4	37,0	30,5	31,7	33,8	29,0	30,4	31,4	31,8	30,3
$0{,}9X_{min}^{I}$, МПа	**32,8**	**33,3**	**27,5**	**28,5**	**30,4**	**26,1**	**27,4**	**28,3**	**28,6**	**27,3**

Таблица 4. Прочность основных образцов фибробетона (испытания – 100 циклов замораживания и оттаивания по второму базовому методу)

Номер образца в серии	Прочность фибробетона, МПа, состава №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	К
1	35,2	35,8	30,4	31,0	34,1	25,6	28,0	28,5	31,2	29,0
2	36,0	36,7	29,8	31,8	32,9	26,7	27,6	27,5	31,0	28,7
3	34,9	35,9	29,6	30,9	32,7	27,0	27,1	26,9	30,7	28,4
4	36,8	34,9	28,6	32,0	32,5	25,7	26,9	28,0	32,7	27,5
5	35,1	37,1	29,7	33,0	32,0	26,2	25,9	27,0	32,2	26,8
6	35,8	35,7	30,0	32,6	32,1	26,0	27,0	26,7	30,5	26,9
Показатель	Значения показателей									
$X_{ср.}^{II}$, МПа	35,6	36,0	29,7	31,9	32,7	26,2	27,1	27,4	31,4	27,9
$\sigma_{п}^{II}$, МПа	0,8	0,9	0,7	0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9
V, %	2,2	2,5	2,4	2,5	2,4	2,2	3,0	2,6	2,8	3,2
X_{min}^{II}, МПа	**33,5**	**33,7**	**27,6**	**29,8**	**30,6**	**24,7**	**25,0**	**25,6**	**29,1**	**25,6**

соответственно 32,8; 33,3; 27,5; 28,5; 30,4; 26,1; 27,4; 28,3; 28,6; 27,3. Нижняя граница доверительного интервала прочности в МПа основных образцов для составов № 1–9 равна соответственно 33,5; 33,7; 27,6; 29,8; 30,6; 24,7; 25,0; 25,6; 29,1; 25,6.

Таким образом, исходя из условия выполнения соотношения: $X_{min}^{II} \geq 0{,}9X_{min}^{I}$ образцы тяжелого бетона с полипропиленовой фиброй составов № 1, 2, 3, 4, 5 и 9 выдержали 100 циклов испытаний по второму базовому методу, что соответствует марке бетона по морозостойкости F_2100. В большинстве случаев эти составы содержат максимальное количество пуццолановой добавки в виде частиц золы-уноса Зуевской тепловой электростанции. Скорее всего, полученные результаты связаны с тем, что частицы используемой минеральной добавки имеют сферическую форму и создают так называемый «эффект заполнения пор». Этот эффект способствует увеличению плотности образцов фибробетона и, тем самым, уменьшает их капиллярную пористость и проницаемость.

Для образцов бетона контрольного состава (состав К), и составов № 6–8 соотношение $X_{min}^{II} \geq 0{,}9X_{min}^{I}$ не выполняется. При дальнейшем исследовании предложенных составов фибробетонов целесообразно рассмотреть возможности повышения долговечности путем применения воздуховолекающей добавки. Применение воздухововлекающей добавки в сочетании с суперпластификатором поликарбоксилатного типа

вследствие образования замкнутой пористой структуры в бетоне может способствовать снижению напряжений, возникающих при переменном замораживании-оттаивании, с последующим повышением морозостойкости.

Дальнейшие исследования разработанных составов фибробетона, содержащих композиционное вяжущее на основе техногенных отходов промышленности Донбасса, направлены на определение их коррозионной стойкости.

Список источников

1. Mehta P. K. Reducing the Environmental Impact of Concrete // Concrete International. 2001. N 23 (10). P. 61-66. URL: https://ecosmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf (дата обращения: 22.04.2025).
2. Трофимов Б. Я., Крамар Л. Я. Деформации и стойкость бетона при циклическом замораживании // Строительные материалы. 2014. N 8. С. 46-51. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/deformatsii-i-stoykost-betona-pri-tsiklicheskom-zamorazhivanii (дата обращения: 22.04.2025).
3. Добшиц Л. М. Физико-математическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. N 12. С. 30-36. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-matematicheskaya-model-razrusheniya-betonov-pri-poperemennom-zamorazhivanii-i-ottaivanii-1 (дата обращения: 22.04.2025).
4. Brandt, A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanism and Performance. London; New York: E & FN Spon, 1995. P. 496.
5. Banthia N., Gupta R. Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC): Fiber Synergy in high Strength Matrices // Materials and Structures. 2004. Vol. 37 (10). P. 707-716. URL: https://sci-hub.ru/10.1007/BF02480516 (дата обращения: 20.04.2025).
6. Исследование влияния дозировки фибры и продолжительности перемешивания на свойства мелкозернистого бетона / М. О. Коровкин [и др.]. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. N 3 (33). С. 22-26. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-dozirovki-fibry-i-prodolzhitelnosti-peremeshivaniya-na-svoystva-melkozernistogo-betona (дата обращения: 23.04.2025). ISSN 2312-3702.
7. Пустовгар А. П., Абрамова А. Ю. Дисперсное армирование бетонов и строительных растворов // Новые технологии в строительстве. 2023. Т. 9, вып. 3. С. 126-140. DOI 10.24412/2409-4358-2023-3-126-1408.
8. Li M. Engineered Cementitious Composites for Bridge Decks // Advanced Composites in Bridge Construction and Repair. 2014. P. 177-209. DOI 10.1533/9780857097019.2.177.
9. Панченко Л. А. Определение предела прочности фибробетона // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2015. N 4. С. 33-37. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-predela-prochnosti-fibrobetona

References

1. Mehta, P.K. (2001), "Reducing the Environmental Impact of Concrete", *Concrete International*, no. 23 (10), pp. 61-66, available at: https://ecosmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf (Accessed 22 April 2025).
2. Trofimov, B.Ya. and Kramar, L.Ya. (2014), "Deformations and Resistance of Concrete During Cyclic Freezing", *Construction Materials*, no. 8, pp. 46-51, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/deformatsii-i-stoykost-betona-pri-tsiklicheskom-zamorazhivanii (Accessed 22 April 2025).
3. Dobshits, L.M. (2017), "Physical-Mathematical Model of Concretes Destruction at Alternate Freezing and Thawing", *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, no. 12, pp. 30-36, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-matematicheskaya-model-razrusheniya-betonov-pri-poperemennom-zamorazhivanii-i-ottaivanii-1 (Accessed 22 April 2025).
4. Brandt, A.M. (1995), *Cement-Based Composites: Materials, Mechanism and Performance*, E & FN Spon, London, New York, UK.
5. Banthia, N. and Gupta, R. (2004), "Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC): Fiber Synergy in high Strength Matrices", *Materials and Structures*, vol. 37 (10), pp. 707-716, available at: https://scihub.ru/10.1007/BF02480516 (Accessed 20 April 2025).
6. Korovkin, M.O., Eroshkina, N.A., Sadenko, S.M. and Krainova, K. A. (2020), "Study of Effect of Fiber Dosage and Duration of Mixing on Properties of Fine-Grained Concrete", *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*, no. 3 (33), pp. 22-26, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-dozirovki-fibry-i-prodolzhitelnosti-peremeshivaniya-na-svoystva-melkozernistogo-betona (Accessed 23 April 2025). ISSN 2312-3702.
7. Pustovgar, A.P. and Abramova, A.Yu. (2023), "Disperse Reinforcement of Concrete and Mortar", *New Technologies in Construction*, vol. 9, issue 3, pp. 126-140. DOI 10.24412/2409-4358-2023-3-126-1408.
8. Li, M. (2014), "Engineered Cementitious Composites for Bridge Decks", *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair*, pp. 177-209. DOI 10.1533/9780857097019.2.177.
9. Panchenko, L.A. (2015), "The Definition of Fibre-concrete Strength Limit", *Bulletin of BSTU named after V. Shukhov*, no. 4, pp. 33-37, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-predela-prochnosti-fibrobetona (Accessed 24 April 2025).

chnosti-fibrobetona (дата обращения: 24.04.2025).
10. Пустовгар А. Г., Абрамова А. Ю., Еремина Н. Е. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй // Технологии бетонов. 2019. N 7-8. С. 34-42. URL: https://roadconcrete.ru/association/Статья%20-Технологии%20бетонов%20Эффективность%20-использования%20дисперсного.pdf (дата обращения: 23.04.2025). ISSN 1813-9787.
11. Смирнова О.М., Корпош Р. В. Дисперсное армирование для получения высококачественного бетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. N 4. С. 57-61. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dispersnoe-armirovanie-dlya-polucheniya-vysokokachestvennogo-betona (дата обращения: 24.04.2025).
12. Петрик И. Ю. Ресурсосберегающая технология бетона с обогащенной золой ТЭС: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5. Макеевка, 2024. 174 с.
13. Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. London: Pearson Education, 2003. 657 p. ISBN 0130646326.
14. Kosmatka S. H., Kerkhoff B., Panarese W. C. Design and control of concrete mixtures. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2002. 358 p.
15. Neville A. M. Properties of concrete. London: Pearson Education, 2012. 846 p.
16. Anish V., Logeshwari J. A Review on Ultra High-Performance Fibre-Reinforced Concrete with Nanomaterials and its Applications // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2024. N 71 (25). P. 1-40. URL: https://doi.org/10.1186/s44147-023-00357-8 (дата обращения: 18.04.2025).
17. Исследование свойств фибробетонов с использованием композиционного вяжущего на основе портландцемента и золы-уноса ТЭС / Е. В. Егорова, И. Ю. Петрик, Т. П. Киценко [и др.]. // Современное промышленное и гражданское строительство. 2025. Т. 21, N 1. С. 5-13. DOI 10.71536/spgs.2025.v21n1.1. EDN GCFWQU. ISSN 1993-3495.
18. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.

10. Pustovgar, A.G, Abramova, A.Yu. and Eremina, N.E. (2019), "Efficiency of Using Dispersed Reinforcement of Concrete and Building Mortars with Polypropylene and Basalt Fibers, *Technologies of Concrete*, no. 7-8, pp. 34-42, available at: https://roadconcrete.ru/association/Статья%20Технологии%20бетонов%20Эффективность%20использования%20дисперсного.pdf (Accessed 23 April 2025). ISSN 1813-9787.
11. Smirnova, O.M. and Korposh, R.V. (2017), "Fiber-Reinforcement for Production of High-Performance Concrete", *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, no. 4, pp. 57-61, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/dispersnoe-armirovanie-dlya-polucheniya-vysoko-kachestvennogo-betona (Accessed 24 April 2025).
12. Petrik, I.Yu. (2024), "Resource-Saving Technology of Concrete with Enriched ash of Thermal Power Plants", Ph.D. Engineering, Building materials and products, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia.
13. Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. (2003), *Concrete*, Pearson Education, London. ISBN 0130-646326.
14. Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C. (2003), *Design and control of concrete mixtures*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
15. Neville, A.M. (2012), *Properties of concrete*, Pearson Education, London.
16. Anish, V. and Logeshwari, J. (2024), "A Review on Ultra High-Performance Fibre-Reinforced Concrete with Nanomaterials and its Applications ", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, no. 71 (25), pp. 1-40, available at: https://doi.org/10.1186/s44147-023-00357-8 (Accessed 18 April 2025).
17. Yegorova, E.V., Petrik, I.Yu. Kitsenko, T.P., Borodai, E.T. and Gubar, V.N. (2025), "Study of the Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using a Composite Binder Based on Portland Cement and Fly Ash from Thermal Power Plants", *Modern Industrial and Civil Construction*, vol. 21, no. 1, pp. 5-13. DOI 10.71536/spgs.2025.v21n1.1. EDN GCFWQU. ISSN 1993-3495.
18. Interstate Council For Standardization, Metrology and Certificationgost (2014), *GOST 10060-2012: Betony. Metody opredeleniya morozostojkosti* [GOST 10060-2012: Concretes. Methods for determining frost resistance], Standartinform, Moscow, Russia.

Информация об авторах

Бородай Екатерина Таеровна – старший преподаватель кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: огнеупорные вяжущие и бетоны.

Егорова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональными модификаторами.

Петрик Ирина Юрьевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: бетоны с обогащенной золой-уноса ТЭС.

Киценко Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: цементные бетоны с заполнителями из отходов промышленности.

Губарь Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: неразрушающий контроль бетона строительных конструкций.

Information about the authors

Borodai Ekaterina T. – Senior lecturer, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: heat-resistant binders and concretes.

Yegorova Elena V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: self-compacting concretes with multifunctional modifiers.

Petrik Irina Yu. – Ph. D. (Eng.), Assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: concrete with enriched fly ash from TPP.

Kitsenko Tatyana P. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: portland cement concretes with aggregates of industrial waste products.

Gubar Victor N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: non-destructive testing of concrete of building structures.

Вклад авторов:

Бородай Е. Т. – концепция исследования; разработка составов фибробетона; выполнение экспериментальных исследований; доработка текста.

Егорова Е. В. – научное руководство; концепция исследования; выполнение экспериментальных исследований; написание исходного текста; итоговые выводы.

Петрик И. Ю. – концепция исследования; разработка составов фибробетона; выполнение экспериментальных исследований; доработка текста.

Киценко Т. П. – научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Губарь В. Н. – научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Borodai E. T. – research concept; development of fiber-reinforced concrete compounds; experimental studies; revision of the text.

Yegorova E. V. – scientific management; research concept; experimental research; writing the source text; final conclusions.

Petrik I. Yu. – research concept; development of fiber-reinforced concrete compositions; experimental studies; revision of the text.

Kitsenko T. P. – scientific management; research concept; writing the source text; final conclusions.

Gubar V. N. – scientific management; revision of the text; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 23.05.2025.

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 23.05.2025.