

Научная статья / Original article

УДК 691.335

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-317-340>

CC BY 4.0

## Влияние различных типов фибрового армирования на физико-механические характеристики и гидрофобные свойства высокопрочных гидротехнических бетонов

Манижа Пактин<sup>1</sup> , Алибек Маратович Иманов<sup>2\*</sup> , Карлыгаш Идрисовна Ильясова<sup>1\*</sup> ,  
Оразалы Дауткалиевич Сейтказинов<sup>1,3</sup> , Манат Тузельбековна Ногайбекова<sup>4</sup> ,  
Жангазы Нуржанович Молдамуратов<sup>1,3</sup> 

<sup>1</sup> Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28, Казахстан

<sup>2</sup> Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан

<sup>3</sup> Казахская головная архитектурно-строительная академия, 050043, Алматы, ул. Торайгырова, 29, Казахстан

<sup>4</sup> Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, 080003, Тараз, ул. Сатпаева, 28, Казахстан

\* Авторы, ответственные за переписку: e-mail: alibek.imanov@mail.ru, k.iliasova@kazgasa.kz

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик бетона является дисперсное армирование различными видами фибры. В данной работе исследовано влияние стальной, базальтовой, полипропиленовой и стеклянной фибры на физико-механические и гидрофизические свойства бетона. **Методы и материалы.** В качестве контрольного состава использован бетон без фибры (REF). Армированные составы включали стальную (SF), базальтовую (BF), полипропиленовую (PPF) и стеклянную (GF) фибру. Выполнены испытания на прочность при сжатии, изгибе и раскалывании, определены модуль упругости, ширина раскрытия трещин, показатели водопоглощения, капиллярного всасывания, водонепроницаемости, сульфатной стойкости, морозостойкости и стойкости к циклам увлажнения-высыхания. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что применение фибры способствует повышению прочности и долговечности бетона. Наибольшая прочность при сжатии в возрасте 28 сут. получена у состава SF – 79,6 МПа, что на 16,4% выше контрольного состава REF (68,4 МПа). Для BF данный показатель составил 76,8 МПа (+12,3%), для GF – 74,5 МПа (+8,9%), для PPF – 72,9 МПа (+6,6%). Прочность при изгибе возросла с 7,8 МПа у REF до 11,2 МПа у SF (+43,6%) и 10,4 МПа у BF (+33,3%). Ширина раскрытия основной трещины уменьшилась с 0,95 мм у REF до 0,42 мм у SF и 0,48 мм у BF. Водопоглощение снизилось с 4,82% у REF до 3,41% у SF и 3,56% у BF, а коэффициент капиллярного всасывания уменьшился с 0,184 до 0,121 кг/(м<sup>2</sup>·ч<sup>0,5</sup>) для SF. Марка по водонепроницаемости повысилась с W10 до W14. Испытания на долговечность показали, что потеря массы после 180 сут. сульфатного воздействия уменьшилась с 2,8% у REF до 1,2% у SF и 1,4% у BF, а коэффициент сохранения прочности повысился до 90,3% и 89,4% соответственно. После 300 циклов замораживания-оттаивания потеря массы составила 1,8% для SF и 2,1% для BF против 4,6% у REF. **Заключение.** По совокупности физико-механических и гидрофизических показателей наиболее эффективными видами дисперсного армирования являются стальная и базальтовая фибра. Их применение обеспечивает повышение прочности при сжатии до 16,4%, увеличение прочности при изгибе до 43,6%, снижение водопоглощения до 29,3%, уменьшение ширины раскрытия трещин более чем в 2 раза и существенное повышение стойкости бетона к воздействию агрессивных факторов среды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фибробетон; гидрофобный бетон; микро и наноструктура бетона; устойчивое строительство

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP23487624.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пактин М., Иманов А.М., Ильясова К.И., Сейтказинов О.Д., Ногайбекова М.Т., Молдамуратов Ж.Н. Влияние различных типов фибрового армирования на физико-механические характеристики и гидрофобные свойства высокопрочных гидротехнических бетонов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):317–340. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-317-340>. – EDN: TWRUUP.

© Пактин М., Иманов А.М., Ильясова К.И., Сейтказинов О.Д., Ногайбекова М.Т., Молдамуратов Ж.Н. 2026

# Effects of various types of fiber reinforcement on the physico-mechanical characteristics and hydrophobic properties of high-strength concrete for hydraulic structures

Manizha Paktin<sup>1</sup> , Alibek M. Imanov<sup>2\*</sup> , Karlygash I. Ilyassova<sup>1\*</sup> , Orazaly D. Seitkazinov<sup>1,3</sup> ,  
Manat T. Nogaibekova<sup>4</sup> , Zhangazy N. Moldamuratov<sup>1,3</sup> 

<sup>1</sup> International Educational Corporation, 050043, Almaty, 28 K. Ryskulbekov Street, Kazakhstan

<sup>2</sup> Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda, 56 N. Nazarbayev Avenue, Kazakhstan

<sup>3</sup> Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, 050043, Almaty, 29 Toraigyrov Street, Kazakhstan

<sup>4</sup> Kazakh National University of Water Management and Irrigation, 080003, Taraz, 28 Satpayev Street, Kazakhstan

\* Corresponding authors: e-mail: alibek.imanov@mail.ru, k.ilyasova@kazgasa.kz

## ABSTRACT

**Introduction.** One of the most effective ways to improve the performance characteristics of concrete is dispersed reinforcement with various types of fibers. This study investigates the influence of steel, basalt, polypropylene, and glass fibers on the physico-mechanical and hydrophysical properties of concrete. **Materials and Methods.** Concrete without fiber reinforcement was used as the reference mixture (REF). The reinforced mixtures included steel fiber (SF), basalt fiber (BF), polypropylene fiber (PPF), and glass fiber (GF). Tests were carried out to determine compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength. In addition, the modulus of elasticity, crack width, water absorption, capillary water absorption, water impermeability, sulfate resistance, frost resistance, and resistance to wetting-drying cycles were evaluated. **Results and Discussion.** It was established that the incorporation of fibers contributes to an increase in the strength and durability of concrete. The highest compressive strength at the age of 28 days was obtained for the SF mixture, reaching 79.6 MPa, which is 16.4% higher than that of the reference mixture REF (68.4 MPa). For BF, this value was 76.8 MPa (+12.3%), for GF 74.5 MPa (+8.9%), and for PPF 72.9 MPa (+6.6%). Flexural strength increased from 7.8 MPa for REF to 11.2 MPa for SF (+43.6%) and 10.4 MPa for BF (+33.3%). The width of the main crack decreased from 0.95 mm for REF to 0.42 mm for SF and 0.48 mm for BF. Water absorption decreased from 4.82% for REF to 3.41% for SF and 3.56% for BF, while the capillary absorption coefficient decreased from 0.184 to 0.121 kg/(m<sup>2</sup>·h<sup>0.5</sup>) for SF. The water impermeability grade increased from W10 to W14. Durability tests showed that the mass loss after 180 days of sulfate exposure decreased from 2.8% for REF to 1.2% for SF and 1.4% for BF, while the strength retention coefficient increased to 90.3% and 89.4%, respectively. After 300 freeze-thaw cycles, the mass loss amounted to 1.8% for SF and 2.1% for BF, compared to 4.6% for REF. **Conclusion.** Based on the overall physico-mechanical and hydrophysical performance, steel and basalt fibers were found to be the most effective types of dispersed reinforcement. Their use provides an increase in compressive strength of up to 16.4%, an increase in flexural strength of up to 43.6%, a reduction in water absorption of up to 29.3%, a more than twofold decrease in crack width, and a significant improvement in the resistance of concrete to aggressive environmental factors.

**KEYWORDS:** fiber-reinforced concrete; hydrophobic concrete; micro- and nanostructure of concrete; sustainable construction

**SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION:** The research was carried out with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of the scientific project No. AP23487624.

## FOR CITATION:

Paktin M., Imanov A.M., Ilyassova K.I., Seitkazinov O.D., Nogaibekova M.T., Moldamuratov Zh.N. Effects of various types of fiber reinforcement on the physico-mechanical characteristics and hydrophobic properties of high-strength concrete for hydraulic structures. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(3):317–340. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-317-340>. – EDN: TWRUUP.

## ВВЕДЕНИЕ

Высокопрочные бетоны находят все более широкое применение при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений благодаря их высокой несущей способности, низкой проницаемости и повышенной долговечности. Особую актуальность применение таких материалов приобретает для об-

лицовок оросительных каналов, эксплуатируемых в условиях постоянного увлажнения, попеременного высыхания, циклического замораживания и оттаивания, абразивного воздействия потока воды, а также химической агрессии со стороны сульфатов и солей, содержащихся в грунтах и поливной воде [1, 2].

Для южных регионов Казахстана данная проблема является особенно важной. Основной объем

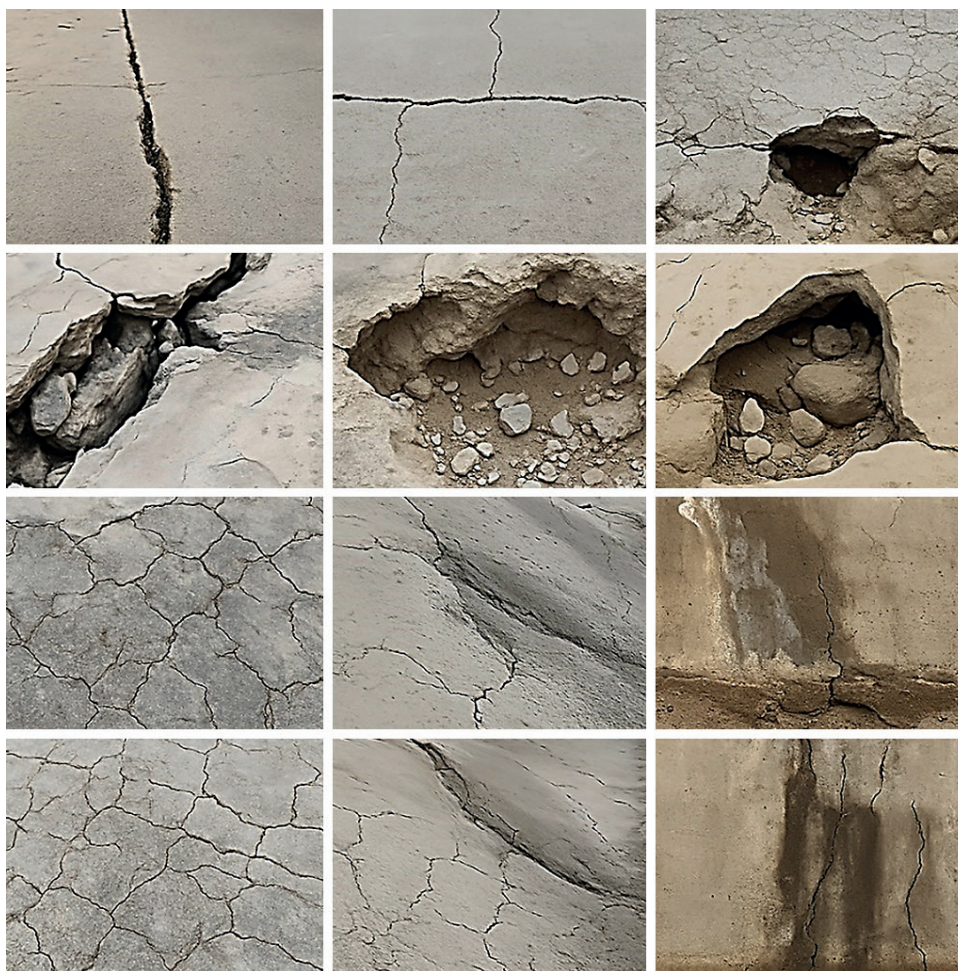
водопотребления в стране связан именно с сельским хозяйством, при этом более 60–70% водных ресурсов используется на нужды орошения. В 2024 году на юг Казахстана было подано около 10,9 км<sup>3</sup> оросительной воды, что составило 97% общего объема воды, направляемой на ирригационные нужды страны [1–4].

Вместе с тем значительная часть оросительной инфраструктуры находится в неудовлетворительном техническом состоянии. Общая протяженность ирригационных систем Казахстана превышает 35 тыс. км, из которых более 14 тыс. км находятся в аварийном состоянии. Средний возраст многих каналов превышает 50 лет, а потери воды при транспортировке по каналам достигают 40–50%. Основными причинами являются фильтрационные потери, разрушение бетонной облицовки, образование трещин, выкрашивание поверхности, повреждение деформационных швов и высокая степень износа гидротехнических элементов [1–5].

Для южных областей Казахстана, включая Туркестанскую, Жамбылскую, Кызылординскую и Алматинскую области, проблема усугубляется высокой

минерализацией воды, сульфатной агрессией, резкими перепадами температур, интенсивным солнечным излучением и периодическим замерзанием каналов в зимний период. В результате длительной эксплуатации бетонная облицовка каналов растрескивается, теряет водонепроницаемость, а коэффициент полезного действия каналов резко снижается. В отдельных бассейнах Центральной Азии до 50% воды теряется вследствие фильтрации через поврежденные и растрескавшиеся каналы (рис. 1).

Международный опыт показывает [4–14], что одним из наиболее эффективных направлений повышения долговечности гидротехнических бетонов является их модифицирование различными видами дисперсного армирования. Наиболее распространенными являются стальная, базальтовая, полипропиленовая, стеклянная и поливинилалкогольная фибра. Введение фибры позволяет существенно снизить усадочное трещинообразование, повысить прочность на растяжение при изгибе, ударную вязкость, трещиностойкость и сопротивление динамическим воздействиям. Кроме того, фибровое армирование



**Рис. 1.** Типичные дефекты и трещины бетонных облицовок оросительных каналов

способствует ограничению развития микротрещин, снижению капиллярной пористости и уменьшению скорости проникновения влаги и агрессивных веществ в структуру бетона.

Особое значение для гидротехнических сооружений имеет сочетание фибрового армирования с гидрофобизацией высокопрочного бетона. Гидрофобные добавки позволяют снизить водопоглощение, капиллярный подсос и проницаемость, что особенно важно для облицовок оросительных каналов, где фильтрационные потери напрямую влияют на эффективность водопользования. Международные исследования показывают, что деградация облицовки может приводить к снижению эффективности каналов до 25%, а при сочетании разрушения облицовки и неблагоприятных гидрогеологических условий эффективность может снижаться до 16% [1–12].

Несмотря на значительное количество исследований по фибробетонам, вопросы комплексного влияния различных типов фибры на физико-механические характеристики, гидрофобность, химическую стойкость и микро- и наноструктуру именно высокопрочных бетонов для условий эксплуатации оросительных каналов юга Казахстана остаются недостаточно изученными. Большинство существующих работ посвящено либо отдельным видам фибры, либо исследованию только прочностных характеристик без учета микро- и наноструктурных изменений, водонепроницаемости и поведения бетона в условиях сульфатной агрессии и циклического увлажнения-высыхания [3–9].

В этой связи целью настоящего исследования является оценка влияния различных типов фибрового армирования на физико-механические характеристики, гидрофобность и микро- и наноструктуру высокопрочных бетонов, предназначенных для облицовки оросительных каналов в южных регионах Казахстана.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Разработать составы высокопрочных гидрофобных бетонов с использованием различных типов фибры.
2. Оценить влияние фибрового армирования на прочность при сжатии, изгибе и растяжении.
3. Исследовать изменение водопоглощения, водонепроницаемости, капиллярного подсоса и гидрофобных свойств бетона.
4. Выполнить сравнительный анализ стойкости бетонов к воздействию сульфатов, циклов замораживания и оттаивания, а также увлажнения-высыхания.
5. Определить наиболее эффективный тип фибрового армирования для повышения долговечности облицовок оросительных каналов.

Ожидается, что применение гидрофобных высокопрочных бетонов с оптимальным видом фибрового

армирования позволит увеличить срок службы облицовки каналов на 30–40%, снизить фильтрационные потери воды до 15–20%, уменьшить интенсивность трещинообразования и повысить общую эксплуатационную надежность гидротехнических сооружений [4–9].

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

### 1. Общая концепция исследования

Исследование направлено на оценку влияния различных типов дисперсного армирования на физико-механические характеристики, гидрофобность, долговечность и микроструктурные особенности высокопрочных бетонов, предназначенных для облицовки оросительных каналов южных регионов Казахстана. При разработке экспериментальной программы учитывались реальные условия эксплуатации оросительных каналов: длительное водонасыщение, циклическое увлажнение и высыхание, воздействие минерализованных вод, сульфатная агрессия, абразивное действие потока, сезонные колебания температуры и образование усадочных и эксплуатационных трещин [13–19].

Исследование включало следующие этапы [13–19, 21–27]:

1. Разработка базового состава высокопрочного гидрофобного бетона.
2. Модифицирование бетона различными типами фибры.
3. Определение физико-механических характеристик бетонов.
4. Исследование гидрофизических свойств и гидрофобности.
5. Оценка стойкости к сульфатной агрессии, морозному воздействию и циклическому увлажнению-высыханию.
6. Статистическая обработка результатов.

Основная логика исследования представлена на рис. 2.

### 2. Исходные материалы

Для приготовления высокопрочного бетона использовали портландцемент СЕМ I 52.5N, кварцевый песок, гранитный щебень, микрокремнезем, суперпластификатор поликарбоксилатного типа и интегральную гидрофобизирующую добавку органосиликоновой природы [13–15, 19–23].

В качестве дисперсного армирования применяли четыре вида фибры: стальную, базальтовую, пропиленовую и щелочестойкую стеклянную.

Основные характеристики используемых материалов приведены в таблицах 1 и 2.

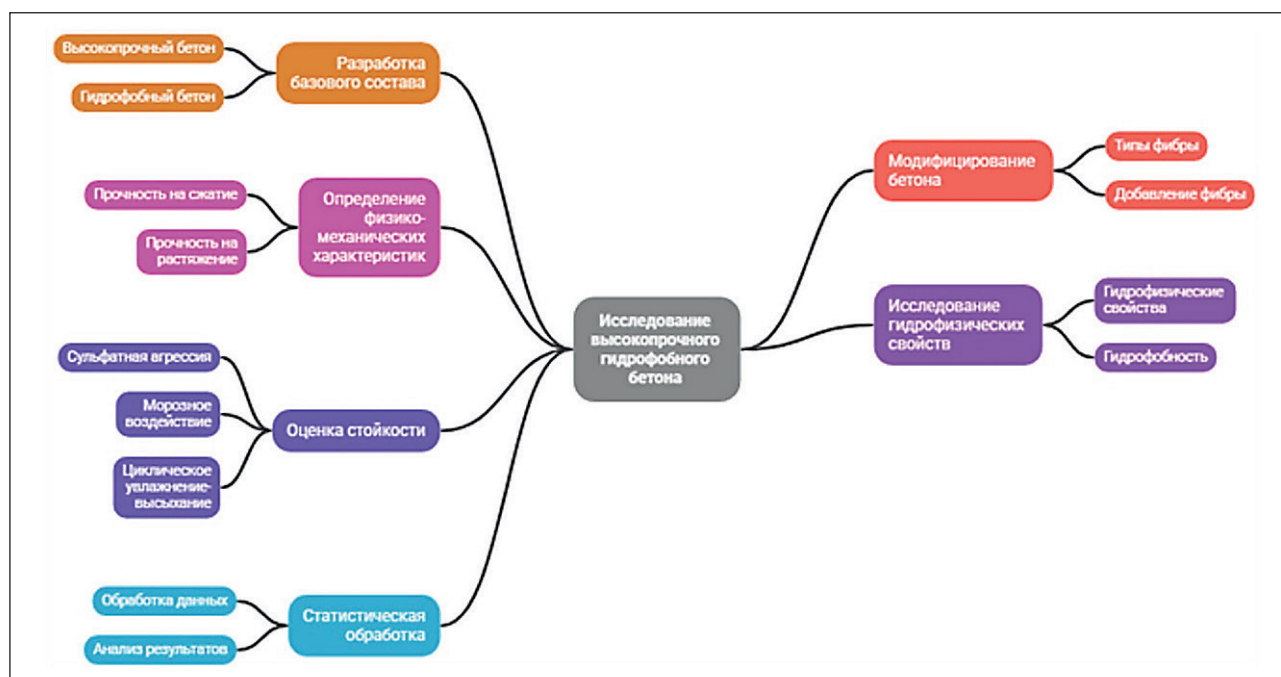












Рис. 2. Общая методология исследования

Таблица 1. Основные характеристики исходных материалов

№	Материал	Характеристика	Значение	Фото материала
1	Портландцемент	Тип	CEM I 52.5N	
2	Плотность цемента	3100 кг/м <sup>3</sup>	–	
3	Удельная поверхность цемента	350-380 м <sup>2</sup> /кг	–	
4	Микрокремнезем	Средний размер частиц	менее 1 мкм	
5	Плотность микрокремнезема	2200 кг/м <sup>3</sup>	–	
6	Песок кварцевый	Модуль крупности	2,4–2,7	
7	Плотность песка	2600 кг/м <sup>3</sup>	–	
8	Щебень гранитный	Фракция	5–10 мм	
9	Плотность щебня	2650–2700 кг/м <sup>3</sup>	–	
10	Суперпластификатор	Тип	поликарбоксилатный	
11	Гидрофобизатор	Тип	органосиликоновый	

**Таблица 2.** Характеристики используемой фибры

№	Тип фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Отношение l/d	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Фото материала
1	Стальная	30	0,50	60	7850	1000–1200	190–210	
2	Базальтовая	24	0,016–0,020	1200–1500	2650–2700	2800–3200	85–95	
3	Полипропиленовая	18	0,030–0,040	450–600	910	400–600	3,5–5,0	
4	Стеклощелочестойкая	18	0,014–0,020	900–1200	2550–2600	1400–1700	70–75	

### 3. Составы бетонных смесей

В качестве базового состава был принят высокопрочный бетон с водосвязующим отношением  $W/B = 0,28$ . Для повышения плотности структуры и снижения капиллярной пористости в состав вводили микрокремнезем в количестве 10% от массы цемента. Интегральную гидрофобизирующую добавку вводили в количестве 1,0% от массы цемента. Расход суперпластификатора подбирали исходя из обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси.

Во всех опытных составах объемная доля фибры составляла 0,5% от объема бетона [20–25]. Контрольный состав не содержал фибры. Составы бетонных

смесей приведены в табл. 3. Сравнительная схема составов представлена на рис. 3.

### 4. Приготовление бетонной смеси и формование образцов

Приготовление бетонной смеси осуществляли в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия объемом 60 л. Все сухие материалы перед приготовлением выдерживали в лабораторных условиях при температуре  $20 \pm 2$  °С не менее 24 ч. Фибру предварительно разделяли на небольшие порции для исключения образования комков и обеспечения равномерного распределения в объеме смеси.

**Таблица 3.** Составы исследуемых бетонных смесей, кг/м<sup>3</sup>

№	Компонент	REF	SF	BF	PPF	GF
1	Цемент СЕМ I 52,5N	450	450	450	450	450
2	Микрокремнезем	50	50	50	50	50
3	Вода	140	140	140	140	140
4	Песок	720	720	720	720	720
5	Щебень 5–10 мм	1020	1020	1020	1020	1020
6	Суперпластификатор	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
7	Гидрофобизатор	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
8	Тип фибры	–	стальная	базальтовая	полипропиленовая	стеклянная
9	Объемная доля фибры, %	0	0,5	0,5	0,5	0,5

Обозначения составов: REF – контрольный гидрофобный высокопрочный бетон без фибры; SF – бетон со стальной фиброй; BF – бетон с базальтовой фиброй; PPF – бетон с полипропиленовой фиброй; GF – бетон со стеклянной фиброй.

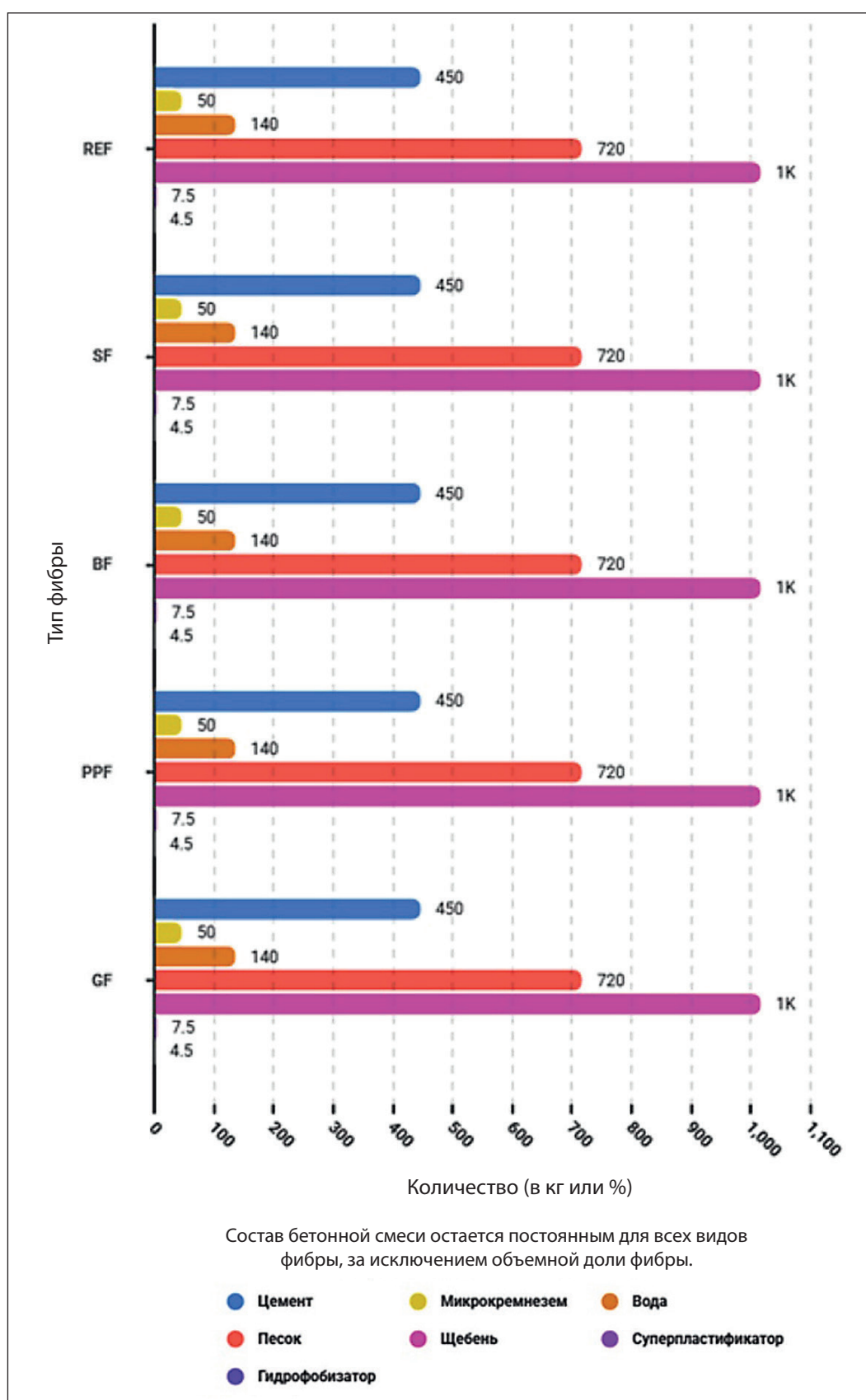


Рис. 3. Сравнительная схема составов

Последовательность приготовления бетонной смеси включала [15–21, 22–26]:

1. Сухое перемешивание цемента, микрокремнезема, песка и щебня в течение 120 с.

2. Введение 70% расчетного количества воды с растворенными суперпластификатором и гидрофобизатором.

3. Перемешивание смеси в течение 180 с.

4. Постепенное введение оставшейся воды.

5. Введение фибры небольшими порциями в течение 120–180 с.

6. Дополнительное перемешивание смеси в течение 180 с.

Общая продолжительность перемешивания составляла 8–10 мин. Последовательность приготовления смеси приведена на рис. 4.

Для оценки технологических свойств исследуемых составов определялась осадка конуса бетонной смеси в соответствии с требованиями EN 12350-2 [24–30, 31–33]. Испытания проводились непосредственно после завершения перемешивания. Учитывалось влияние различных типов фибры на удобоукладываемость, связность и устойчивость бетонной смеси к расслоению. Характерный внешний вид бетонных смесей после снятия конуса представлен на рис. 5.

Как видно из рис. 5, введение различных типов фибры оказывало заметное влияние на подвижность бетонной смеси. Наибольшее снижение осадки конуса наблюдалось у составов со стальной и базальтовой фиброй вследствие увеличения внутреннего трения и пространственного армирования смеси. Полипропиленовая и стеклянная фибра оказывали

менее выраженное влияние на удобоукладываемость, однако при повышенной концентрации волокон наблюдалась склонность к образованию локальных скоплений и снижению однородности структуры смеси.

После приготовления смесь укладывали в металлические формы и уплотняли на виброплощадке. Формы закрывали полиэтиленовой пленкой на  $24 \pm 2$  ч. После распалубки образцы выдерживали при температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $9 \pm 5\%$  до достижения проектного возраста испытаний.

## 5. Программа испытаний

Для каждого состава изготавливали серию образцов, обеспечивающую статистическую достоверность результатов [13–22, 25–27]. Для физико-механических и гидрофизических испытаний использовали не менее трех параллельных образцов, а для испытаний прочности – не менее пяти образцов. Программа испытаний приведена в табл. 4, а схема экспериментальной программы представлена на рис. 6.

## 6. Методы определения физико-механических свойств

Осадку конуса определяли непосредственно после приготовления смеси. Целевое значение осадки конуса составляло 50–90 мм, что соответствовало условиям получения плотной облицовочной бетонной смеси без признаков расслоения.

Прочность при сжатии определяли на кубках размером  $100 \times 100 \times 100$  мм в возрасте 7, 28 и 90 сут. [23–



Рис. 4. Цикл приготовления бетонной смеси



**Рис. 5.** Внешний вид бетонных смесей после определения осадки конуса: а) смесь со стальной фиброй; б) смесь с базальтовой фиброй; в) смесь с полипропиленовой фиброй; г) смесь со стеклянной фиброй

25]. Прочность при изгибе определяли на призмах размером  $100 \times 100 \times 400$  мм по схеме трехточечного нагружения. Прочность при раскалывании и модуль упругости определяли на цилиндрических образцах размером  $100 \times 200$  мм.

Для оценки влияния фибры на свойства бетона рассчитывали относительное изменение показателей по сравнению с контрольным составом по формуле [13–16]:

$$\Delta X = \frac{X_i - X_{REF}}{X_{REF}} \cdot 100\%,$$

где  $X_i$  – значение показателя для исследуемого состава;  $X_{REF}$  – значение показателя для контрольного состава.

## 7. Методы определения гидрофобности и гидрофизических свойств

Водопоглощение определяли по разности массы высушенных и насыщенных водой образцов [27–29]. Водопоглощение вычисляли по формуле:

$$W_m = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{dry}} \cdot 100\%,$$

где  $m_{sat}$  – масса водонасыщенного образца;  $m_{dry}$  – масса высушенного образца.

Капиллярное всасывание определяли при одностороннем контакте образца с водой [33–37]. Массу образцов измеряли через 10, 30, 60, 120 и 240 мин., а также через 24 и 48 ч.

Гидрофобность оценивали по величине контактного угла смачивания [33, 34]. Для этого использовали пластины размером  $40 \times 40 \times 10$  мм. На поверхность наносили каплю деионизированной воды объемом 5 мкл и фиксировали изображение капли в течение 5 с. Измерение угла смачивания выполняли не менее чем в пяти точках на каждом образце.

## 8. Методы оценки долговечности

Сульфатную стойкость оценивали путем выдерживания образцов в 5%-ном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  при температуре  $20 \pm 2$  °С. Испытания проводили в те-

Таблица 4. Программа испытаний

№	Показатель	Размер образца	Возраст / режим испытаний	Число образцов
1	Осадка конуса	Свежая смесь	сразу после замеса	3
2	Плотность смеси	Свежая смесь	сразу после замеса	3
3	Плотность бетона	Куб 100×100×100 мм	28 сут.	3
4	Прочность при сжатии	Куб 100×100×100 мм	7, 28, 90 сут.	5
5	Прочность при изгибе	Призма 100×100×400 мм	28, 90 сут.	5
6	Прочность при раскалывании	Цилиндр 100×200 мм	28 сут.	5
7	Модуль упругости	Цилиндр 100×200 мм	28 сут.	3
8	Водопоглощение	Куб 100×100×100 мм	28 сут.	3
9	Капиллярное всасывание	Куб 100×100×100 мм	28 сут.	3
10	Водонепроницаемость	Куб/цилиндр	28 сут.	3
11	Контактный угол смачивания	Пластина 40×40×10 мм	28 сут.	3
12	Сульфатная стойкость	Куб/призма	30, 90, 180 сут.	3
13	Морозостойкость	Куб/призма	до 300 циклов	3
14	Циклы увлажнения-высыхания	Куб/призма	60 циклов	3



Рис. 6. Схема экспериментальной программы

чение 30, 90 и 180 сут. Раствор обновляли каждые 14 сут. После завершения испытаний определяли изменение массы, прочности и состояние поверхности [35–39].

Морозостойкость определяли методом попеременного замораживания и оттаивания в водонасы-

щенном состоянии. Один цикл включал замораживание при  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  и последующее оттаивание в воде при  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Испытания проводили до 300 циклов [28, 32].

Для моделирования условий эксплуатации облицовок оросительных каналов проводили испы-

тания при циклическом увлажнении и высыхании [1–4, 11]. Один цикл включал выдерживание образцов в воде в течение 8 ч и последующую сушку при температуре  $50 \pm 2$  °С в течение 16 ч. Общее число циклов составляло 60.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Технологические свойства бетонных смесей

Результаты испытаний показали, что введение различных типов фибры оказывает существенное влияние на технологические свойства высокопрочных бетонных смесей. Во всех составах наблюдалось снижение осадки конуса по сравнению с контрольным составом REF, что связано с увеличением внутреннего трения в смеси и повышением удельной поверхности дисперсного армирования.

Наибольшее снижение удобоукладываемости было зафиксировано для состава со стальной фиброй SF, где осадка конуса составила 64 мм против 82 мм у контрольного состава. Это обусловлено высокой жесткостью, плотностью и развитой поверхностью стальной фибры. Состав с базальтовой фиброй BF также характеризовался заметным снижением осадки до 68 мм. Полипропиленовая и стеклянная фибра оказывали менее выраженное влияние на подвижность смеси.

Несмотря на уменьшение подвижности, все составы сохраняли удовлетворительную технологич-

ность, не имели признаков расслоения и обеспечивали равномерное распределение фибры по объему смеси. Использование суперпластификатора позволило поддерживать осадку конуса в диапазоне, пригодном для изготовления бетонных облицовок оросительных каналов. Результаты приведены на рис. 7.

### 2. Прочность при сжатии, изгибе и раскалывании

Введение фибры способствовало повышению всех исследуемых прочностных характеристик бетона. Однако величина прироста зависела от типа армирования. На гистограмме (рис. 8) представлены физико-механические свойства исследуемых бетонных составов с различными типами фиброармирования. Анализ результатов показывает, что все виды фибры обеспечивают повышение прочностных и деформационных характеристик бетона по сравнению с контрольным составом REF. Наиболее высокие значения прочности при сжатии как в возрасте 28 суток, так и 90 суток были получены для состава со стальной фиброй SF, где прочность достигла 79,6 и 85,9 МПа соответственно. Это объясняется высокой жесткостью и прочностью стальной фибры, которая эффективно воспринимает растягивающие напряжения и препятствует развитию трещин.

Базальтовая фибра BF также показала высокую эффективность, обеспечив прирост прочности при сжатии на 12,3% и прочности при изгибе на 33,3%. Полипропиленовая фибра PPF продемонстрировала

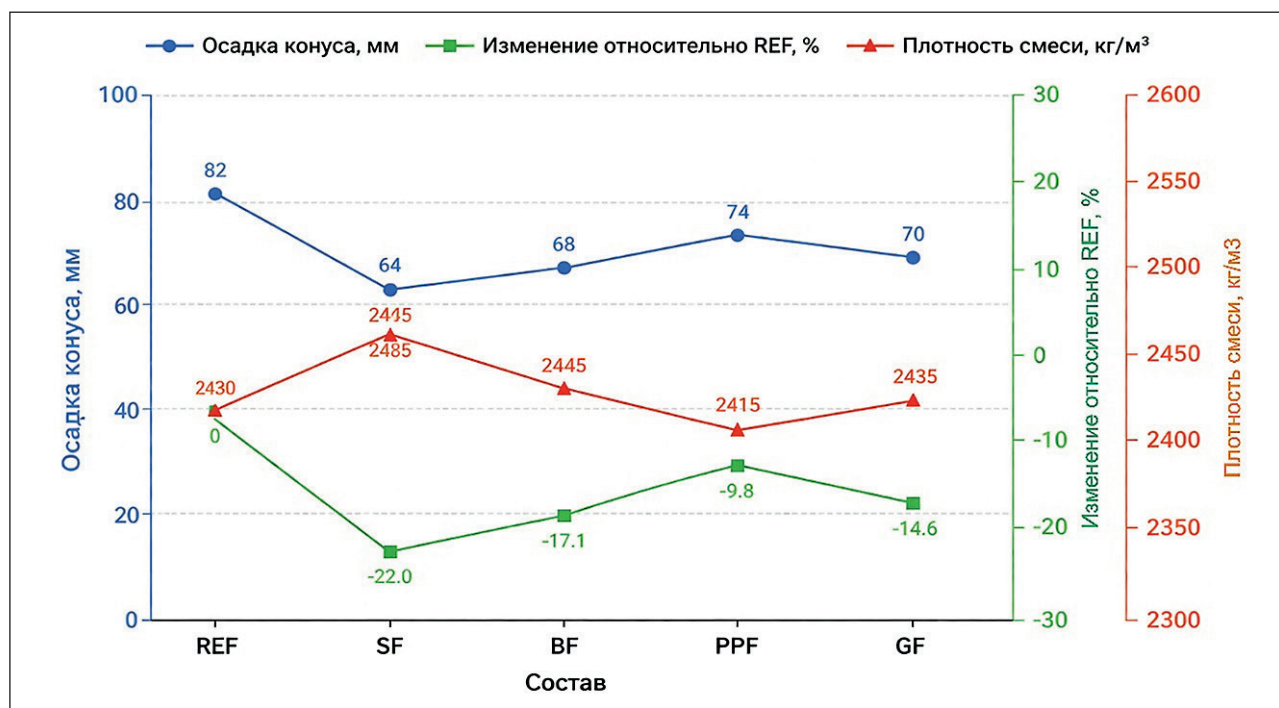


Рис. 7. Технологические свойства бетонных смесей

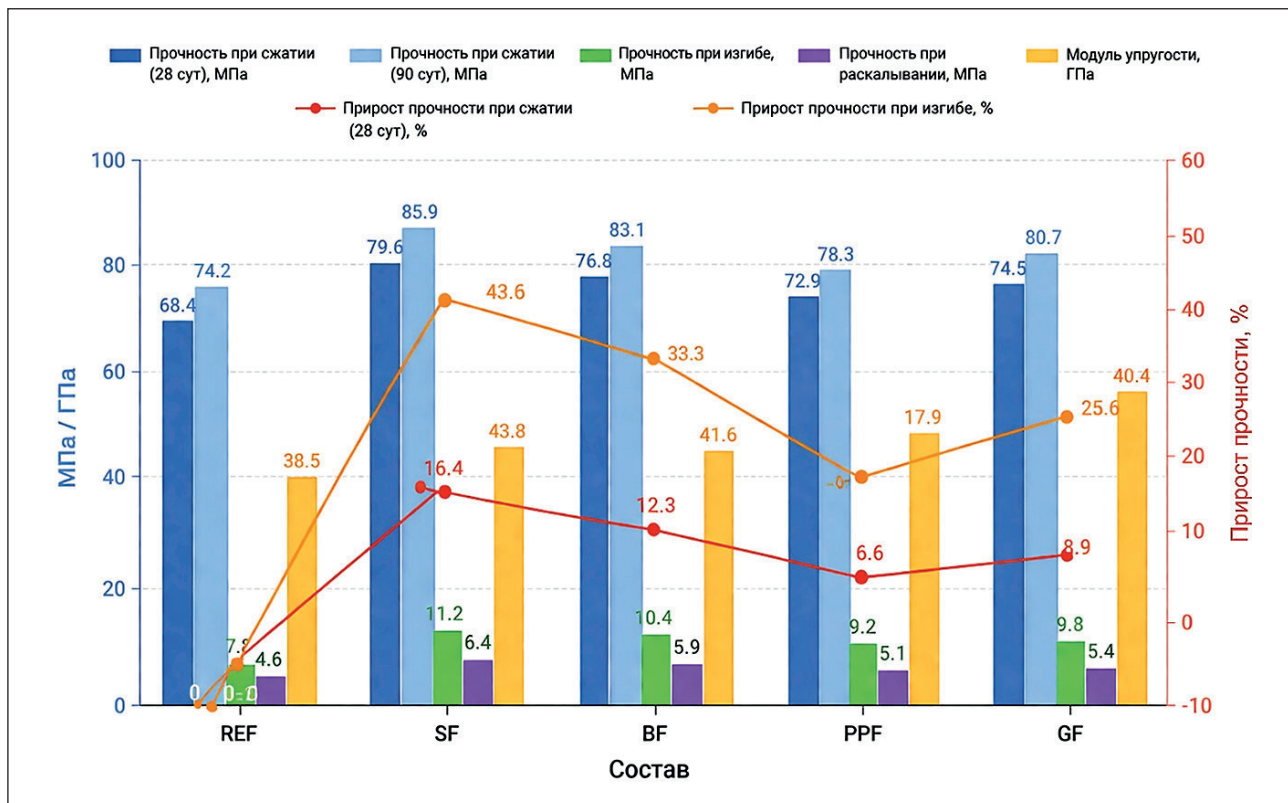


Рис. 8. Физико-механические свойства исследуемых бетонов

меньший прирост прочности, однако ее применение позволило повысить трещиностойкость и снизить риск хрупкого разрушения за счет формирования большого количества мелких распределенных трещин. Стекловолоконная фибра GF обеспечила промежуточные показатели между BF и PPF, продемонстрировав устойчивый рост прочности при изгибе и модуля упругости.

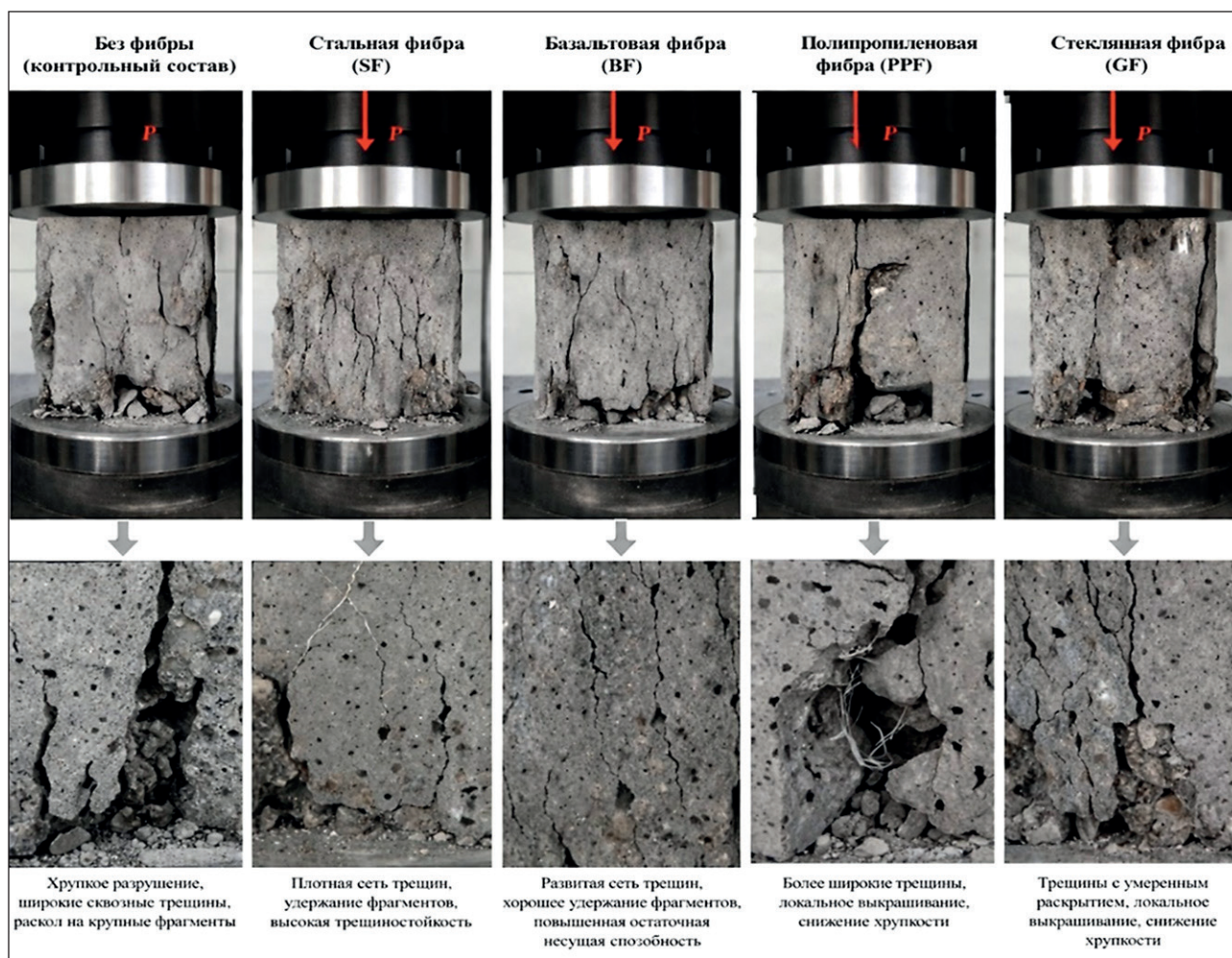
Наибольшие значения прочности при изгибе, прочности при раскалывании и модуля упругости также были зафиксированы у состава SF, где данные показатели составили 11,2 МПа, 6,4 МПа и 43,8 ГПа соответственно. Это свидетельствует о том, что стальная фибра наиболее эффективно повышает сопротивление бетона образованию и развитию трещин, а также увеличивает его жесткость и способность воспринимать динамические и ударные нагрузки.

На рис. 9 представлены характерные схемы разрушения бетонных кубов, армированных различными видами фибры, после испытания на осевое сжатие. Во всех случаях разрушение сопровождалось образованием вертикальных и наклонных трещин, развивающихся от центральной зоны образца к его боковым поверхностям. Для образцов с фибровым армированием наблюдалось сохранение общей целостности бетона даже после достижения предельной нагрузки.

В образцах со стальной и базальтовой фиброй отмечалось формирование более выраженной пространственной сетки трещин при одновременном удержании отдельных фрагментов бетона, что свидетельствует о повышении трещиностойкости и остаточной несущей способности материала. Полипропиленовая и стекловолоконная фибра также способствовали снижению интенсивности хрупкого разрушения, однако в этих случаях наблюдалось большее раскрытие трещин и локальное выкрашивание цементного камня в зоне приложения нагрузки.

Как видно из табл. 5, наибольшая прочность при сжатии кубических образцов была достигнута для состава со стальной фиброй SF – 79,6 МПа, что на 16,4% выше контрольного состава. Базальтовая фибра также обеспечила существенный прирост прочности – до 76,8 МПа. Образцы с полипропиленовой и стекловолоконной фиброй показали более умеренное повышение прочности, однако во всех случаях наблюдалось изменение механизма разрушения по сравнению с контрольным составом.

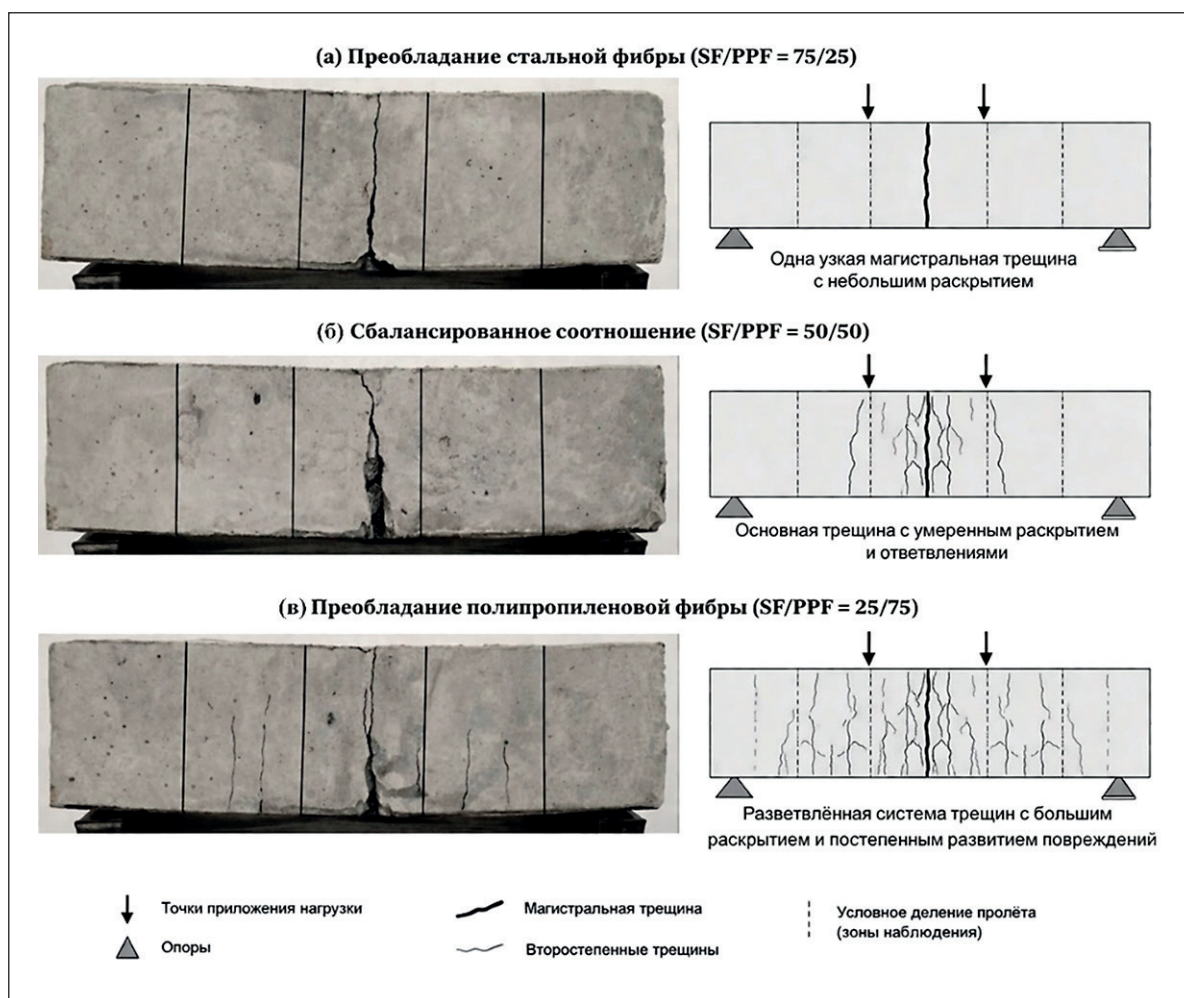
На рис. 10 представлены характерные схемы трещинообразования в бетонных балках с различным соотношением стальной и полипропиленовой фибры после испытания на изгиб. Во всех образцах наблюдалось формирование основной вертикальной трещины в центральной зоне пролета, соответ-



**Рис. 9.** Характер разрушения бетонных образцов с различными видами фибрового армирования при испытании на осевое сжатие

**Таблица 5.** Результаты испытаний кубических образцов на осевое сжатие

№	Состав	Разрушающая нагрузка, кН	Относительное изменение к REF, %	Характер разрушения	Визуальная целостность после разрушения
1	REF	684	–	хрупкое разрушение с образованием магистральных вертикальных и наклонных трещин	низкая
2	SF	796	+16,4	трещины развиваются постепенно, наблюдается удержание фрагментов за счет стальной фибры	высокая
3	BF	768	+12,3	разрушение менее хрупкое, выражено ограничение раскрытия трещин	высокая
4	PPF	729	+6,6	формируется сеть более мелких трещин, разрушение смягчено	средняя
5	GF	745	+8,9	трещинообразование локализовано, частично сохраняется целостность образца	средняя-высокая



**Рис. 10.** Характер трещинообразования в бетонных балках с различным соотношением стальной и полипропиленовой фибры после испытания на изгиб

ствующей области максимальных растягивающих напряжений.

На рис. 10а показан образец с преобладанием стальной фибры (SF/PPF = 75/25). Для данного состава характерно формирование одной узкой магистральной трещины с незначительным раскрытием. Это связано с высокой способностью стальных волокон воспринимать растягивающие напряжения и ограничивать развитие основной трещины.

На рис. 10б представлен образец со сбалансированным содержанием стальной и полипропиленовой фибры (SF/PPF = 50/50). В данном случае наблюдается основная трещина с умеренным раскрытием, а также развитие дополнительных второстепенных трещин в центральной части пролёта. Такой характер разрушения свидетельствует о более равномерном перераспределении напряжений внутри материала.

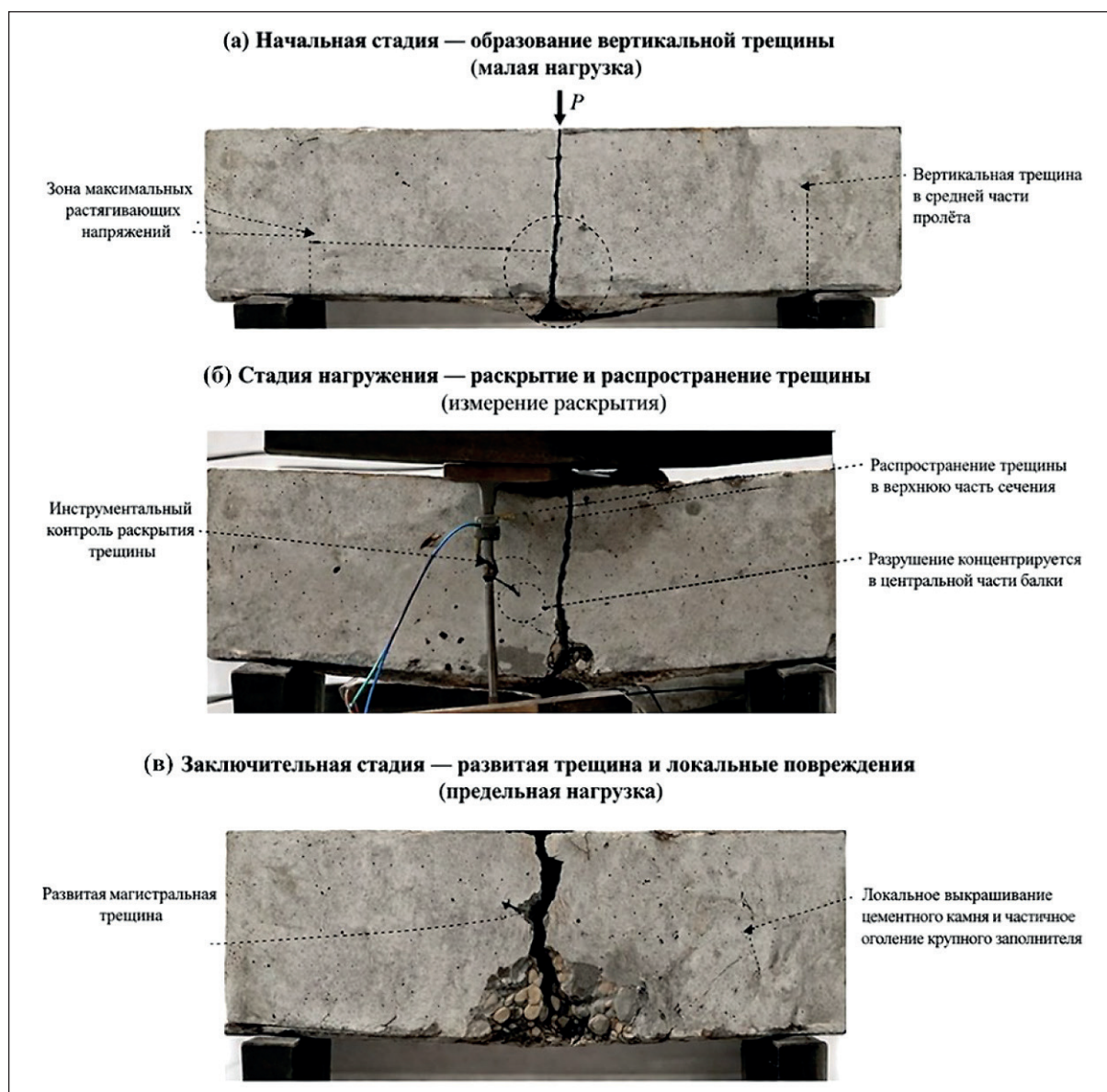
На рис. 10в показан образец с преобладанием полипропиленовой фибры (SF/PPF = 25/75). Для него характерно формирование разветвленной си-

стемы трещин с большим раскрытием и постепенным развитием повреждений. Увеличение доли полипропиленовой фибры способствует повышению деформационной способности материала и снижению хрупкости разрушения, однако сопровождается более выраженным развитием трещинообразования.

На рис. 11 представлены характерные стадии развития трещин в бетонных балках при испытании на изгиб. Во всех случаях разрушение инициировалось в центральной части пролёта, где возникают максимальные растягивающие напряжения.

На рис. 11а показана начальная стадия разрушения при сравнительно небольшой нагрузке. В нижней растянутой зоне балки формируется вертикальная трещина, которая распространяется вверх по сечению. На данном этапе ширина раскрытия трещины остается незначительной, а основная часть балки сохраняет свою целостность.

На рис. 11б представлена стадия активного нагружения, сопровождающаяся раскрытием и дальней-



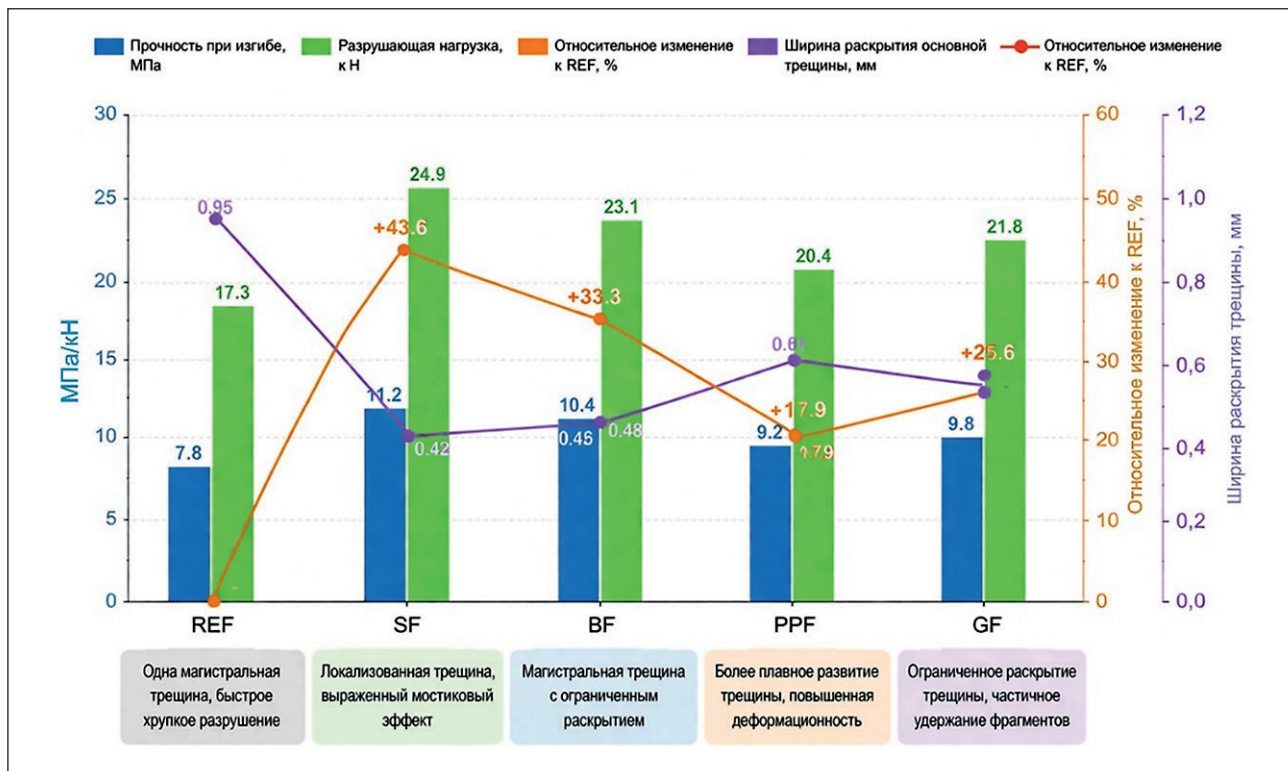
**Рис. 11.** Характер развития трещин и раскрытия магистральной трещины в бетонных балках при испытании на изгиб

шим распространением основной трещины. Видно, что разрушение концентрируется преимущественно в центральной части балки. При этом проводится инструментальный контроль раскрытия трещины, позволяющий оценить изменение ее ширины в процессе нагружения.

На рис. 11в показана заключительная стадия разрушения при предельной нагрузке. Для данного этапа характерно формирование развитой магистральной трещины, проходящей через все сечение балки. В зоне разрушения наблюдаются локальное выкрашивание цементного камня, частичное оголение крупного заполнителя и увеличение ширины раскрытия трещины.

На рис. 12 представлена сравнительная гистограмма показателей изгибной прочности, разрушающей нагрузки, относительного прироста прочности и ширины раскрытия основной трещины для исследуемых составов бетона.

Установлено, что наиболее высокие значения прочности при изгибе и разрушающей нагрузки были достигнуты для состава со стальной фиброй. Прочность при изгибе увеличилась с 7,8 МПа у контрольного состава REF до 11,2 МПа у состава SF, а разрушающая нагрузка возросла с 17,3 до 24,9 кН. Для состава с базальтовой фиброй также отмечены высокие показатели: прочность при изгибе составила 10,4 МПа, а разрушающая нагрузка — 23,1 кН.



**Рис. 12.** Сравнение показателей изгибной прочности и трещиностойкости бетонов с различными видами фибрового армирования

Наибольший относительный прирост прочности по сравнению с контрольным составом наблюдался у SF и составил +43,6%, тогда как для BF данный показатель достиг +33,3%. Для составов с полипропиленовой и стеклянной фиброй прирост прочности оказался менее выраженным и составил +17,9% и +25,6% соответственно.

Одновременно введение фибры способствовало существенному снижению ширины раскрытия основной трещины. Если для контрольного состава REF данный показатель составлял 0,95 мм, то для SF он уменьшился до 0,42 мм, а для BF – до 0,4 мм. Для составов с полипропиленовой и стеклянной фиброй ширина раскрытия трещины составила 0,61 и 0,56 мм соответственно.

Разрушающая нагрузка рассчитана по схеме трехточечного изгиба:

$$R_{flex} = \frac{3PL}{2bh^2},$$

где  $L = 100$  мм;  $b = 100$  мм;  $h = 100$  мм.

На рис. 13 представлены характерные схемы разрушения цилиндрических бетонных образцов с различными типами фибрового армирования после испытания на осевое сжатие: (а) REF – контрольный состав без фибры; (б) SF – состав со стальной фиброй; (в) BF – состав с базальтовой фиброй;

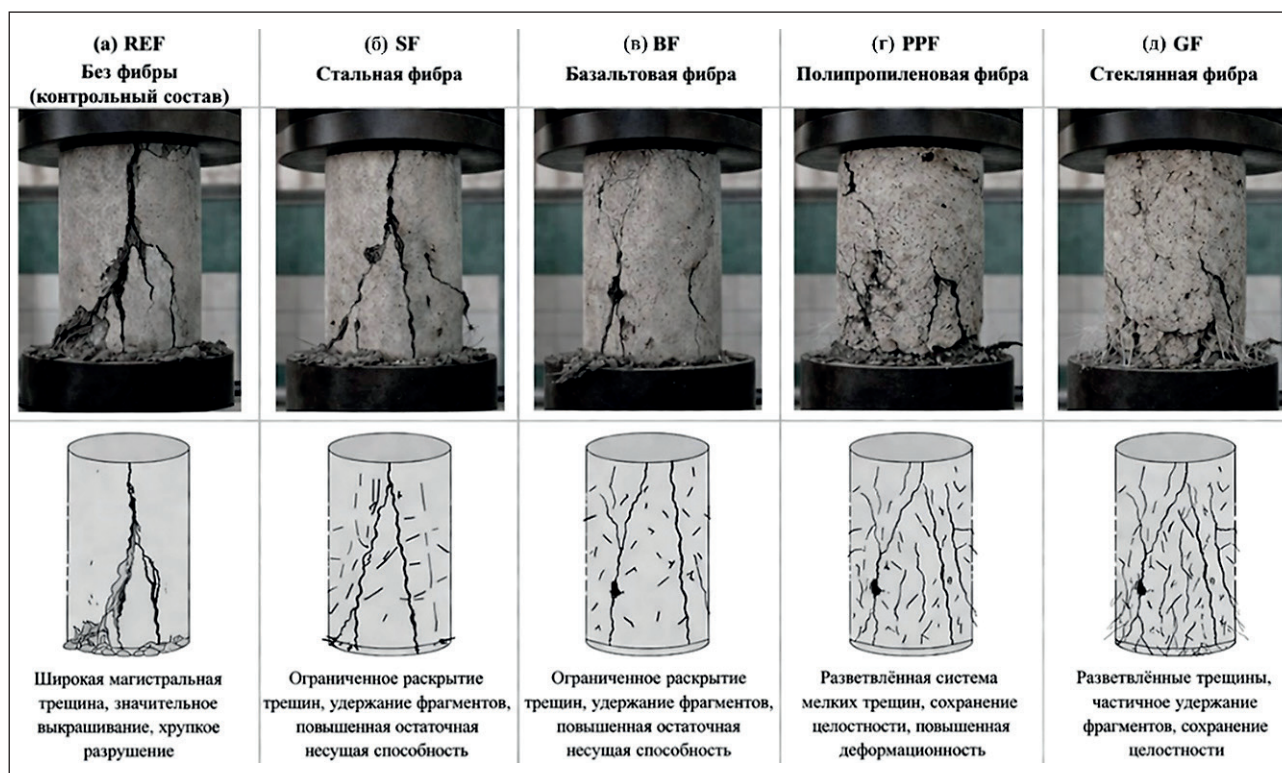
(г) PPF – состав с полипропиленовой фиброй; (д) GF – состав со стеклянной фиброй.

Для контрольного состава REF характерно образование широкой магистральной вертикальной трещины, сопровождающейся интенсивным выкрашиванием цементного камня и частичным разрушением защитного слоя бетона. Разрушение носит выраженный хрупкий характер и сопровождается быстрым разделением образца на отдельные фрагменты.

В образцах со стальной фиброй наблюдалось ограничение раскрытия основной трещины и удержание отдельных фрагментов бетона после достижения предельной нагрузки. Волокна препятствовали полному разрушению цилиндра и обеспечивали сохранение остаточной несущей способности материала.

Для составов с базальтовой фиброй также характерно ограниченное раскрытие трещин и удержание фрагментов бетона. Однако по сравнению со стальной фиброй трещины имели более выраженный разветвленный характер, что свидетельствует о постепенном развитии повреждений и повышенной деформационной способности материала.

Образцы с полипропиленовой фиброй характеризовались формированием развитой сети мелких трещин при сравнительно небольшом объеме ло-



**Рис. 13.** Характерные схемы разрушения цилиндрических бетонных образцов при осевом сжатии: а) REF – без фибры; б) SF – стальная фибра; в) BF – базальтовая фибра; г) PPF – полипропиленовая фибра; д) GF – стекловолоконная фибра

кального выкрашивания. Волокна способствовали сохранению целостности цилиндра и препятствовали полному распаду образца даже после достижения предельного состояния.

Для составов со стекловолоконной фиброй наблюдалось образование большого количества мелких и средних трещин, сопровождающееся частичным удержанием фрагментов бетона волокнами. Несмотря на наличие локальных повреждений, общая форма образца сохранялась, что свидетельствует о повышении остаточной прочности и сопротивлению прогрессирующему разрушению.

На рис. 14 представлены характерные схемы разрушения бетонных образцов при испытании на вырыв: (а) REF – контрольный состав без фибры; (б) SF – состав со стальной фиброй; (в) BF – состав с базальтовой фиброй; (г) PPF – состав с полипропиленовой фиброй; (д) GF – состав со стекловолоконной фиброй.

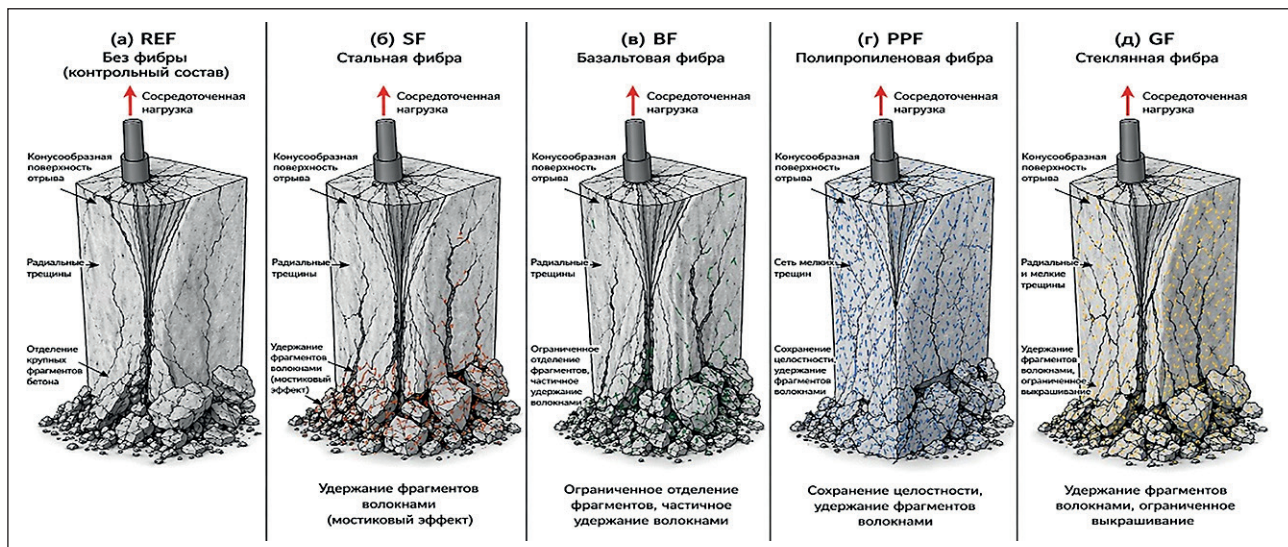
Во всех случаях разрушение начиналось в зоне приложения сосредоточенной нагрузки и сопровождалось образованием конусообразной поверхности отрыва, развитием радиальных трещин и локальным выкрашиванием цементного камня. По мере увеличения нагрузки происходило постепенное формирование разрушенного ядра под нагружаемым элементом и отделение отдельных фрагментов бетона.

Для контрольного состава REF (рис. 14а) характерно наиболее интенсивное и хрупкое разрушение. Наблюдается широкая зона отрыва, значительное количество радиальных трещин и отделение крупных фрагментов бетона. Разрушенное ядро имеет выраженный характер, что свидетельствует о низкой способности материала воспринимать локальные растягивающие напряжения после достижения предельной нагрузки.

В образцах со стальной фиброй SF (рис. 14б) разрушение носит более локализованный характер. Стальные волокна ограничивают раскрытие радиальных трещин и удерживают разрушенные фрагменты бетона за счет выраженного мостикового эффекта. Это способствует повышению остаточной несущей способности и снижению интенсивности хрупкого разрушения.

Для составов с базальтовой фиброй BF (рис. 14в) также характерно ограниченное развитие зоны отрыва и умеренное отделение фрагментов бетона. Базальтовая фибра способствует снижению ширины раскрытия трещин и частичному удержанию разрушенного материала в зоне вырыва.

Образцы с полипропиленовой фиброй PPF (рис. 14г) отличаются формированием более разветвленной сети мелких трещин при меньшем объеме



**Рис. 14.** Характерные схемы разрушения бетонных образцов при испытании на вырыв: а) REF – без фибры; б) SF – стальная фибра; в) BF – базальтовая фибра; г) PPF – полипропиленовая фибра; д) GF – стеклянная фибра

локального выкрашивания. При этом разрушение развивается более постепенно, а волокна препятствуют полному отделению фрагментов и способствуют сохранению целостности образца.

Для составов со стеклянной фиброй GF (рис. 14д) характерно сочетание радиальных и мелких трещин, ограниченное выкрашивание и частичное удержание разрушенных фрагментов волокнами. Несмотря на наличие локальных повреждений, образец сохраняет общую целостность и способность воспринимать нагрузку после достижения предельного состояния.

Согласно данным табл. 6, применение фибрового армирования способствует повышению сопротивления бетона локальному вырыву. Наибольшая максимальная нагрузка вырыва была зафиксирована для

состава со стальной фиброй SF и составила 56,8 кН, что на 33,6% выше по сравнению с контрольным составом REF. Для состава с базальтовой фиброй BF максимальная нагрузка достигла 52,9 кН, а прирост относительно REF составил 24,5%.

Установлено, что введение фибры приводит к уменьшению размеров разрушенного ядра и диаметра зоны отрыва. Для контрольного состава REF глубина разрушенного ядра составила 58 мм, а диаметр зоны отрыва – 142 мм. В образцах со стальной фиброй данные показатели снизились до 46 и 118 мм соответственно, что свидетельствует о более локализованном характере разрушения.

Для составов с полипропиленовой и стеклянной фиброй также наблюдалось уменьшение размеров разрушенной зоны, однако основной эффект данных

**Таблица 6.** Показатели сопротивления бетона вырыву при различных видах фибрового армирования

№	Состав	Максимальная нагрузка вырыва, кН	Относительное изменение к REF, %	Глубина разрушенного ядра, мм	Диаметр зоны отрыва, мм	Характер разрушения
1	REF	42,5	–	58	142	широкая зона отрыва, интенсивное выкрашивание, отделение крупных фрагментов
2	SF	56,8	+33,6	46	118	локализованное разрушение, выраженный мостиковый эффект, удержание фрагментов
3	BF	52,9	+24,5	49	124	ограниченное раскрытие трещин, умеренное отделение фрагментов
4	PPF	48,7	+14,6	52	130	развитая сеть мелких трещин, сохранение целостности
5	GF	50,3	+18,4	50	127	ограниченное выкрашивание, частичное удержание разрушенных фрагментов

видов фибры проявлялся в снижении интенсивности выкрашивания и удержании отдельных фрагментов бетона после достижения предельной нагрузки.

На рис. 15 показано влияние различных комбинаций стальной и полипропиленовой фибры на прочность на сжатие и модуль упругости цилиндрических бетонных образцов. С увеличением содержания стальной фибры и введением полипропиленовой фибры наблюдается устойчивая тенденция к повышению прочности и жесткости бетона. Максимальные показатели достигнуты для состава SF0,7% + PPF0,3%, тогда как контрольный образец без фибры показал наименьшие значения. График демонстрирует эффективность гибридного фиброармирования, обеспечивающего более высокую сопротивляемость образцов внешним нагрузкам и повышение их деформационной устойчивости.

### 3. Водопоглощение, капиллярное всасывание и гидрофобность

Для облицовок оросительных каналов особое значение имеют показатели, характеризующие проницаемость и способность бетона противостоять проникновению воды. Результаты показали, что все виды фибры в сочетании с гидрофобизирующей добавкой способствовали снижению водопоглощения и капиллярного переноса влаги.

На рис. 16 представлена многокоординатная гистограмма гидрофизических свойств исследуемых

бетонов, включающая показатели водопоглощения, снижения водопоглощения относительно контрольного состава, коэффициента капиллярного всасывания, контактного угла и марки по водонепроницаемости.

Установлено, что применение фибрового армирования способствует снижению водопоглощения бетона. Наименьшее значение данного показателя наблюдалось у состава со стальной фиброй SF и составило 3,41%, что на 29,3% ниже по сравнению с контрольным составом REF. Для состава с базальтовой фиброй BF водопоглощение составило 3,56%, а снижение относительно REF достигло 26,1%. Для составов с полипропиленовой и стеклянной фиброй данный показатель составил 3,94% и 3,78% соответственно.

Аналогичная закономерность наблюдается и для коэффициента капиллярного всасывания. У контрольного состава REF данный показатель составил 0,184 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0.5), тогда как для SF и BF он снизился до 0,121 и 0,129 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0.5) соответственно. Это свидетельствует о снижении интенсивности капиллярного переноса влаги и повышении плотности структуры бетона.

Одновременно отмечено увеличение контактного угла поверхности бетона. Для REF контактный угол составил 84°, тогда как для SF он увеличился до 101°, а для BF — до 98°. Повышение контактного угла указывает на рост гидрофобности поверхности и уменьшение способности бетона смачиваться водой.

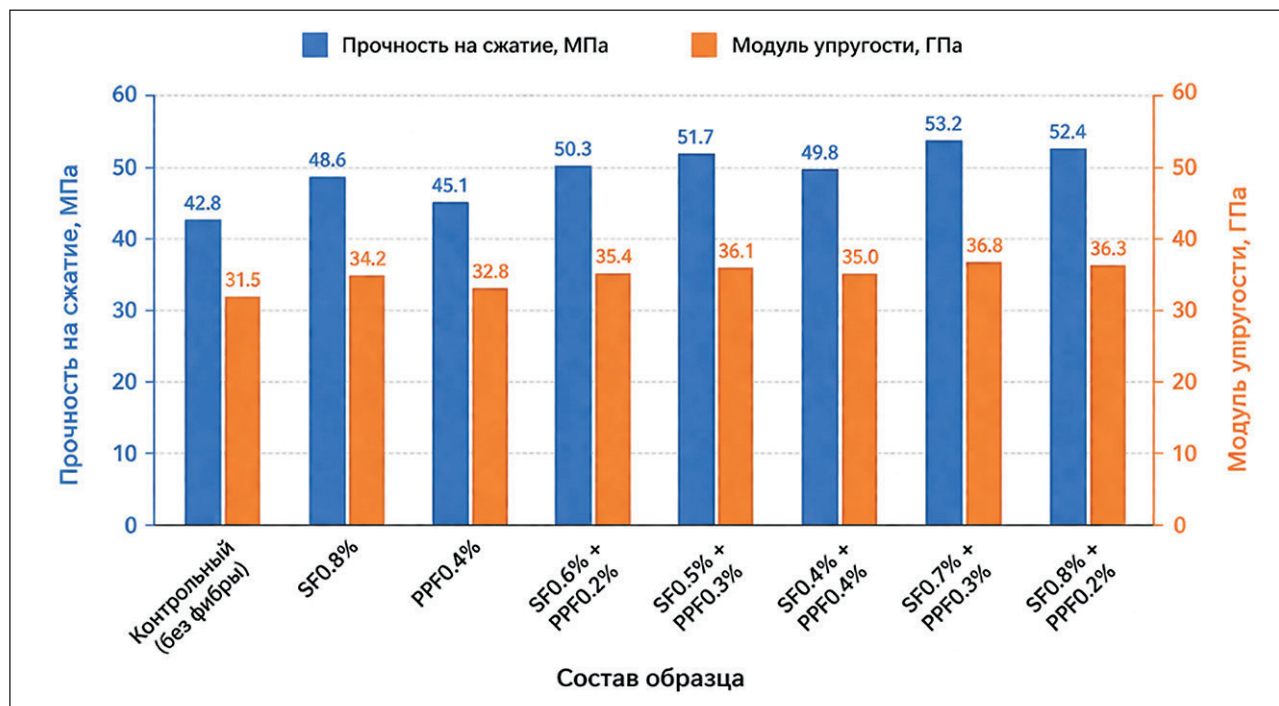


Рис. 15. Результаты испытаний цилиндрических бетонных образцов на осевое сжатие и модуль упругости

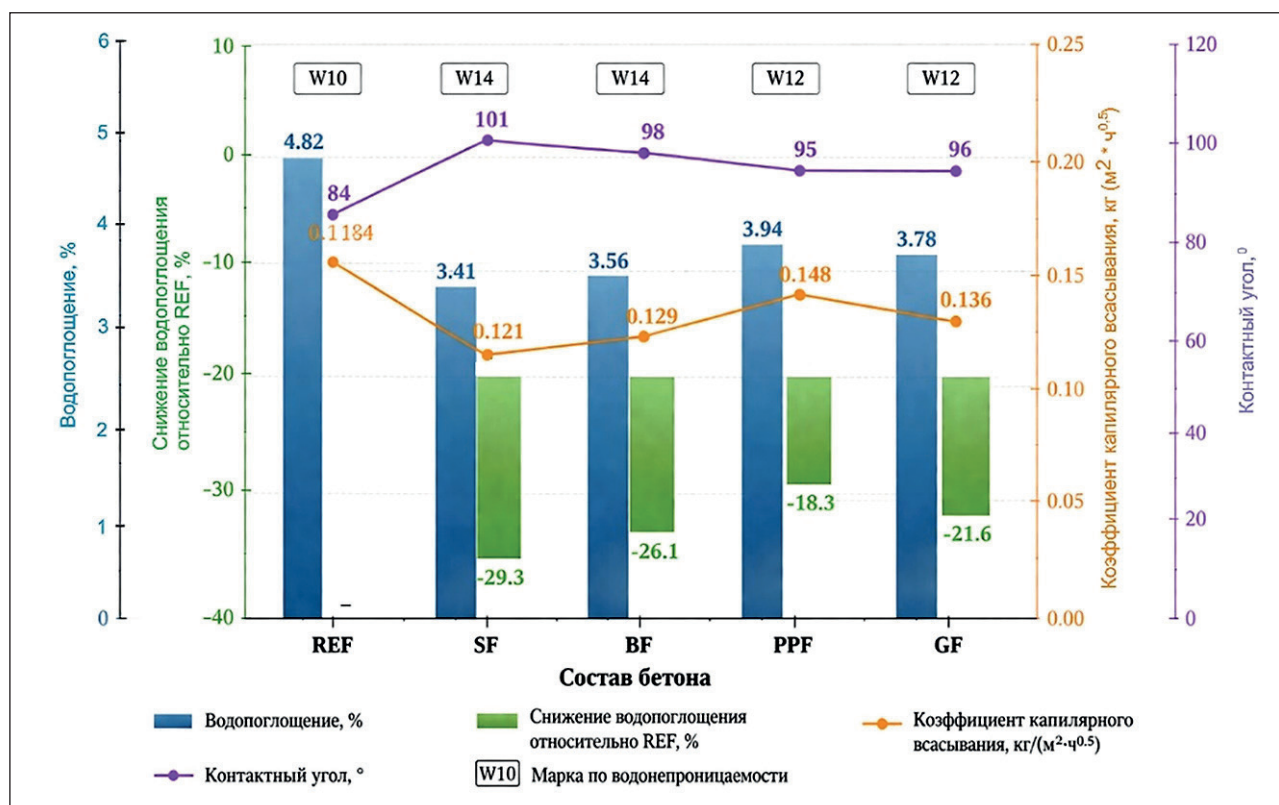


Рис. 16. Гидрофизические свойства исследуемых бетонов

Наиболее высокие показатели водонепроницаемости также были достигнуты у составов со стальной и базальтовой фиброй. Для REF марка по водонепроницаемости составила W10, тогда как для SF и BF она повысилась до W14. Для составов с полипропиленовой и стеклянной фиброй была получена марка W12.

#### 4. Стойкость к сульфатной агрессии

На рис. 17 представлена многокоординатная гистограмма показателей сульфатной стойкости исследуемых бетонов после 180 суток выдерживания в агрессивной сульфатной среде. На рисунке приведены значения потери массы, остаточной прочности и коэффициента сохранения прочности для контрольного состава и бетонов, армированных различными видами фибры.

Установлено, что контрольный состав REF характеризуется наибольшей потерей массы – 2,8 %, что свидетельствует о наиболее интенсивном развитии процессов сульфатной коррозии. Введение фибры позволило существенно снизить данный показатель. Минимальная потеря массы наблюдалась у состава со стальной фиброй SF и составила 1,2%, тогда как для BF данный показатель составил 1,4%, для GF – 1,7%, а для PPF – 1,9%.

Остаточная прочность после 180 суток воздействия сульфатной среды у контрольного состава REF составила 58,4 МПа. Применение фибрового армирования обеспечило заметное повышение данного показателя. Наиболее высокая остаточная прочность была зафиксирована у состава SF – 77,6 МПа. Для BF остаточная прочность составила 74,3 МПа, для GF – 71,8 МПа, а для PPF – 69,1 МПа.

Аналогичная закономерность наблюдается и для коэффициента сохранения прочности. У состава REF данный показатель составил 78,7%, тогда как у составов с фиброй он увеличился до 90,3% для SF, 89,4% для BF, 88,9% для GF и 88,2% для PPF.

#### 5. Морозостойкость и стойкость к циклам увлажнения-высыхания

На рис. 18 представлена гистограмма показателей морозостойкости и стойкости бетонов к циклам увлажнения-высыхания. Приведены значения потери массы после 300 циклов замораживания-оттаивания, снижения прочности после 300 циклов и остаточной прочности после 60 циклов увлажнения-высыхания.

Контрольный состав REF характеризуется наибольшей потерей массы после 300 циклов замораживания-оттаивания – 4,6%. Одновременно у него наблюдается и максимальное снижение прочно-

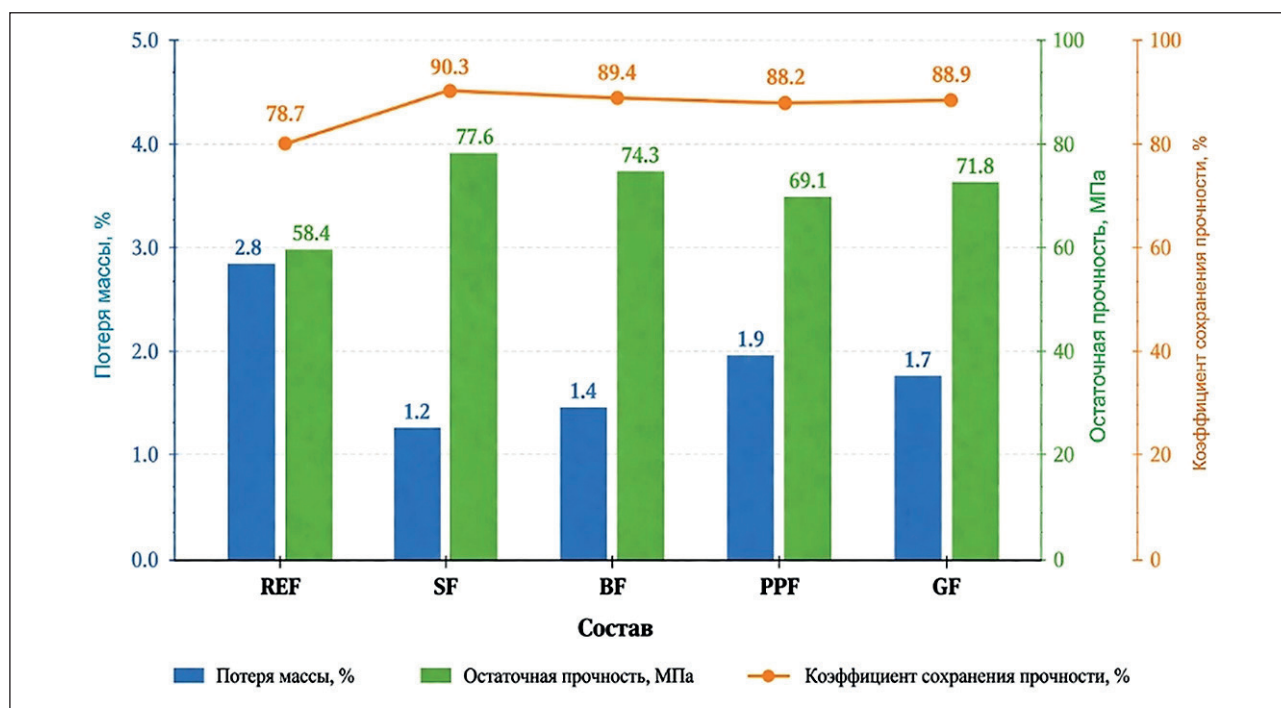


Рис. 17. Показатели сульфатной стойкости после 180 суток

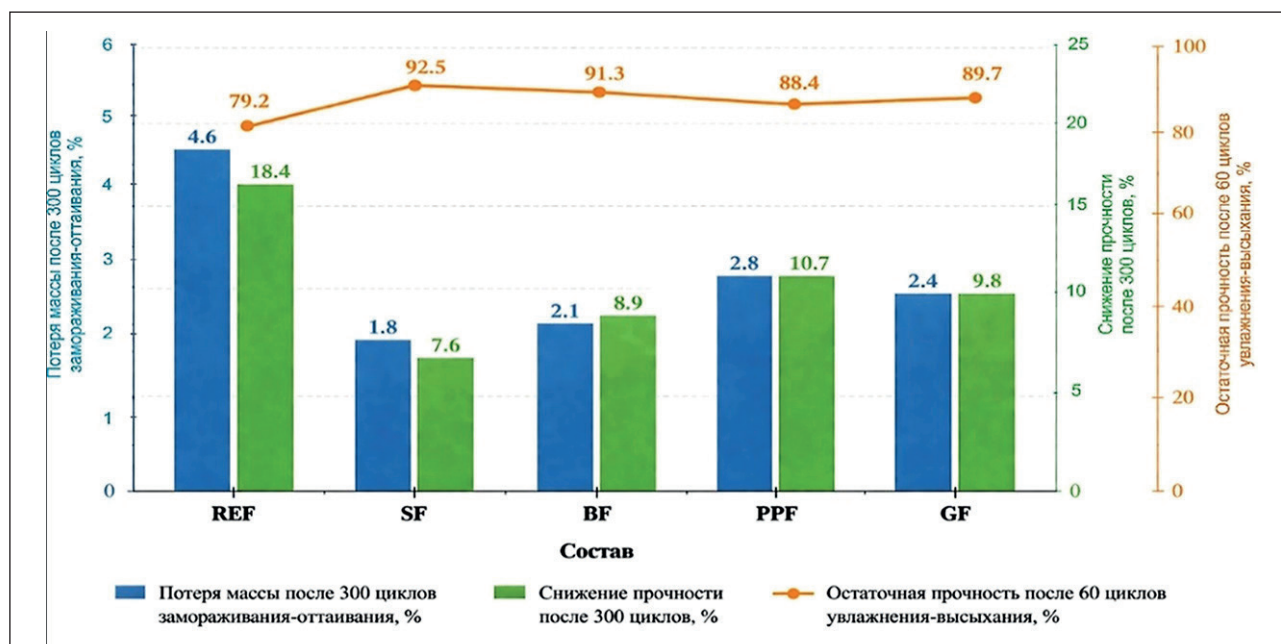


Рис. 18. Показатели морозостойкости и стойкости к циклам увлажнения-высыхания

сти – 18,4%. Это свидетельствует о наиболее интенсивном разрушении структуры бетона под действием циклического замораживания и последующего оттаивания.

Введение фибры позволило значительно повысить морозостойкость бетона. Наиболее низкая потеря массы была зафиксирована у состава со сталь-

ной фиброй SF – 1,8%, тогда как для BF данный показатель составил 2,1%, для GF – 2,4%, а для PPF – 2,8%. Аналогичная закономерность наблюдается и для снижения прочности после 300 циклов: минимальное снижение прочности отмечено у SF – 7,6%, для BF оно составило 8,9%, для GF – 9,8%, а для PPF – 10,7%.

Высокие значения остаточной прочности после 60 циклов увлажнения-высыхания также характерны для бетонов с фибровым армированием. Для REF остаточная прочность составила 79,2%, тогда как для SF она увеличилась до 92,5%, для BF – до 91,3%, для GF – до 89,7%, а для PPF – до 88,4%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Введение дисперсной фибры обеспечивает повышение прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток на 6,6–16,4% по сравнению с контрольным составом REF. Наибольшая прочность получена у состава SF – 79,6 МПа, что на 16,4% выше контрольного состава (68,4 МПа). Для состава BF прочность составила 76,8 МПа (+12,3%), для GF – 74,5 МПа (+8,9%), для PPF – 72,9 МПа (+6,6%).

2. В возрасте 90 суток наиболее высокие значения прочности также характерны для составов SF и BF. Прочность SF достигла 85,9 МПа, BF – 83,1 МПа, GF – 80,7 МПа, PPF – 78,3 МПа, тогда как для REF данный показатель составил 74,2 МПа.

3. Наиболее выраженный эффект фибрового армирования наблюдается при изгибе. Прочность при изгибе увеличилась с 7,8 МПа у REF до 11,2 МПа у SF (+43,6%), 10,4 МПа у BF (+33,3%), 9,8 МПа у GF (+25,6%) и 9,2 МПа у PPF (+17,9%).

4. Прочность при раскалывании также возросла во всех армированных составах: с 4,6 МПа у REF до 6,4 МПа у SF, 5,9 МПа у BF, 5,4 МПа у GF и 5,1 МПа у PPF.

5. Модуль упругости увеличился с 38,5 ГПа у REF до 43,8 ГПа у SF, 41,6 ГПа у BF, 40,4 ГПа у GF и 39,2 ГПа у PPF, что свидетельствует о повышении жесткости и способности бетона воспринимать нагрузку без значительных деформаций.

6. Фибровое армирование способствует снижению ширины раскрытия основной трещины при изгибе. Для REF ширина раскрытия составила 0,95 мм, тогда как для SF она снизилась до 0,42 мм, для BF – до 0,48 мм, для GF – до 0,56 мм и для PPF – до 0,61 мм.

7. По данным гидрофизических испытаний установлено снижение водопоглощения на 18,3–29,3%. Минимальное значение водопоглощения получено для состава SF – 3,41%, тогда как для REF оно составило 4,82%. Для BF водопоглощение составило 3,56%, для GF – 3,78%, для PPF – 3,94%.

8. Коэффициент капиллярного всасывания уменьшился с 0,184 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0,5) у REF до 0,121 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0,5) у SF, 0,129 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0,5) у BF, 0,136 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0,5) у GF и 0,148 кг/(м<sup>2</sup>·ч\*0,5) у PPF. Одновременно контактный угол увеличился с 84° у REF до 101° у SF, 98° у BF, 96° у GF и 95° у PPF.

9. Марка по водонепроницаемости повысилась с W10 у контрольного состава до W14 у SF и BF, а для GF и PPF достигла W12.

10. Испытания на сульфатную стойкость показали снижение потери массы с 2,8% у REF до 1,2% у SF, 1,4% у BF, 1,7% у GF и 1,9% у PPF. Коэффициент сохранения прочности увеличился с 78,7% у REF до 90,3% у SF, 89,4% у BF, 88,9% у GF и 88,2% у PPF.

11. По результатам испытаний на морозостойкость установлено снижение потери массы после 300 циклов замораживания-оттаивания с 4,6% у REF до 1,8% у SF, 2,1% у BF, 2,4% у GF и 2,8% у PPF. Снижение прочности после 300 циклов уменьшилось с 18,4% у REF до 7,6% у SF, 8,9% у BF, 9,8% у GF и 10,7% у PPF.

12. По совокупности физико-механических и гидрофизических показателей наиболее эффективными видами дисперсного армирования являются стальная и базальтовая фибра.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильясова К.И., Молдамурастов Ж.Н., Сейтказинов О.Д., Абиева Г.С., Тухтамишева А.З., Пактин М. Экспериментальные исследования бетонных материалов для восстановления конструкций гидротехнических сооружений. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):697–714. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-697-714>. – EDN: OBIJOJ.

2. Иманов А.М., Молдамурастов Ж.Н., Сейтказинов О.Д., Тухтамишева А.З., Исмаилова А.Б., Рахимова Г.М. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов за счет применения модифицированного бетона. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):678–696. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-678-696>. – EDN: MFTDRV.

3. Молдамурастов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж. Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(4):306–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318>. – EDN: JOZNEX.

4. Mukhopadhyay S., Khatana S. A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. *Journal of Industrial Textiles*. 2015;45(2):239–264. <https://doi.org/10.1177/1528083714529806>

5. Yazid M. H., Faris M. A., Abdullah M.M.A.B., Nabałek M., Rahim S.Z.A., Salleh M.A.A.M., Jez B. Contribution of Interfacial Bonding towards Geopolymers Properties in Geopolymers Reinforced Fibers: A Review. *Materials*. 2022;15(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041496>

6. Tran N.P., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S. Microstructural characterisation of cementitious composite incorporating polymeric fibre: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127497>
7. Молдамуратов Ж.Н., Игликов А.А., Сенников М.Н., Мадалиева Э.Б., Туралина М.Т. Торкрет-бетон с добавками для облицовки оросительных каналов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(3):227–240. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240>. – EDN: BIEVUB.
8. Rajak M., Rai B. Effect of Micro Polypropylene Fibre on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2019; 9(1):97-108. <https://doi.org/10.2478/jaes-2019-0013>
9. Li Y., Wang Q., Xu S., Song Q. Study of eco-friendly fabricated hydrophobic concrete containing basalt fiber with good durability. *Journal of Building Engineering*. 2023;65. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105759>
10. Moldamuratov Z.N., Ussenkulov Z.A., Yeskermessov Z.E., Shanshabayev N. A., Bapanova Z.Z., Nogaibekova M.T., Joldassov S.K. Experimental study of the effect of surfactants and water-cement ratio on abrasion resistance of hydraulic concretes. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2023;16(3):1116-1126. <https://doi.org/10.31788/RJC.2023.1638391>
11. Liu X., Li C., Yu B., Wang H., Feng Y., Pang Y., Wang G. Bond performance between hooked-end steel fibers and hydrophobic fibre reinforced concrete under freeze-thaw cycling. *Construction and Building Materials*. 2025;494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143447>
12. Молдамуратов Ж.Н., Исмаилова А.Б., Тухтамишева А.З., Ескермесов Ж.Е., Рахимов М.А. Экспериментальное исследование асфальтобетона в качестве оптимального материала для облицовки оросительных каналов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(2):125–139. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-125-139>. – EDN: AROTER.
13. Gamage N., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S., Cwirzen A. Enhancement of concrete performance and sustainability through incorporation of diverse waste carpet fibres. *Construction and Building Materials*. 2024;445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137921>
14. Chen Y.X., Yu Q. Surface modification of miscanthus fiber with hydrophobic silica aerogel for high performance bio-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134478>
15. Barnat-Hunek D., Smarzewski P. Surface free energy of hydrophobic coatings of hybrid-fiber-reinforced high-performance concrete. *Materiali in Tehnologije*. 2015;49(6):895-902. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.174>
16. Patel K., Gupta R., Garg M., Wang B., Dave U. Development of FRC materials with recycled glass fibers recovered from industrial GFRP-Acrylic Waste. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4149708>
17. Ma L., Zhen C., Zeng Q., Li B. Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fiber. *Buildings*. 2025;15(10). <https://doi.org/10.3390/buildings15101723>
18. Malchiodi B., Pelaccia R., Pozzi P., Siligardi C. Three sustainable polypropylene surface treatments for the compatibility optimization of PP fibers and cement matrix in fiber-reinforced concrete. *Ceramics International*. 2023;49(14): 24611-24619. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.105>
19. Muzenski S., Flores-Vivian I., Sobolev K. Durability of superhydrophobic engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2015;81:291-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.014>
20. Thiyagarajan R., Pazhani K.C. Experimental investigations on the behaviour of PPFRCC and SFRC. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2019;10(3):194-202. <https://doi.org/10.34218/IJARET.10.3.2019.020>
21. Kina C., Turk K., Atalay E., Donmez I., Tanyildizi H. Comparison of extreme learning machine and deep learning model in the estimation of the fresh properties of hybrid fiber-reinforced SCC. *Neural Computing and Applications*. 2021;33(18):11641-11659. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05836-8>
22. Barnat-Hunek D., Smarzewski P. Influence of hydrophobisation on surface free energy of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;102:367-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.008>
23. Abdouss M., Shokri A., Karimi M.M., Zargarani M. Plasma Oxidation of Polypropylene Fibers for Concrete Reinforcement. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2022;95(3):366-378. <https://doi.org/10.1134/S1070427222030053>
24. Lu Y., Zhu T., Li S., Liu Z. Bond Behavior of Wet-Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Interface Subjected to Moisture. *International Journal of Polymer Science*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3120545>
25. Sun Y., Jin Z., Du F., Deng L., Pang B., Yang L., Li S. High performance glass fiber reinforced polymer bars for marine engineering: A synergistic approach using microwave-assisted nanomaterial functionalization and organosilicon modification. *Construction and Building Materials*. 2025;493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143119>
26. Corinaldesi V., Moriconi G. Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(2):249-254. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.005>
27. Li S., Ye Y., Wu Q., Gao L., Ren H. Preparation of High Performance Hydrophobic Concrete Material and Experimental Study on Its Corrosion Resistance. *Science of Advanced Materials*. 2020;12(9):1341-1351. <https://doi.org/10.1166/sam.2020.3825>
28. Zhou A., Li K., Yu Z., Yang G., Liu T. Atomic Insight into Durability and Interfacial Stability of Novel Hydrophobic Composite in Concrete Alkaline Environment for Marine Engineering. *Engineering*. 2026. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.12.020>
29. Xiong S., Zhang H., Liu W., Zhang L. Resolving the strength-permeability trade-off in recycled aggregate pervious concrete by fiber reinforcement. *Journal of Building Engineering*. 2026;118. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114992>
30. Muzenski S., Flores-Vivian I., Sobolev K. Hydrophobic modification of ultra-high-performance fiber-reinforced composites with matrices enhanced by aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*. 2020;244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118354>
31. Sun Y., Jin Z., Yang L. Evolution of Bonding Performance and Improvement Mechanism of Glass Fiber Reinforced Plastics-Concrete Based on Resin Matrix Modification. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2024;52(11):3460-3469. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20230873>
32. Zhakipbayev B.Y., Zhakipiyev N.K., Abdikadyr B.Z., Moldamuratov Z.N., Abekov K.O. The Technology of Foam-Glass Building Materials for Heat-Insulating Purposes Using Amorphous-Silica Rocks. *ES Materials and Manufacturing*. 2025; 27. <https://doi.org/10.30919/esmm1379>
33. Kultayeva S.M., Zhakipbayev B.Y., Moldamuratov Z.N., Kim H.S., Akimbayeva N. Sintering Atmosphere and Polytype Effects on Porous Silicon Carbide Ceramics. *ES Materials and Manufacturing*. 2025;29. <https://doi.org/10.30919/mm1757>
34. Kultayeva S.M., Zhakipbayev B.Y., Moldamuratov Z.N., Lakhbayeva Z.A. Carbon Nanotubes Effect on The Electrical and Thermal Properties of Porous Silicon Carbide Ceramics. *ES Materials and Manufacturing*. 2025;30. <https://doi.org/10.30919/mm1871>

35. Bekbasarov I., Nikitenko M., Shanshabayev N., Atenov Y., Moldamuratov, Z. Tapered-prismatic pile: driving energy consumption and bearing capacity. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2021;6(450):53-63. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.119>

36. Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н. Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(6):564–573. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>. – EDN: WFTXGR.

37. Джумадилова С.Ж., Хомяков В.А., Кенебаева А.К., Молдамуратов Ж.Н. Применение геосинтетических материалов для повышения несущей способности грунтовых подушек. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(4):342–354. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-342-354>. – EDN: KBXJDR.

38. Жакипбаев Б.Е., Исмаилова А.Б., Тухтамишева А.З., Сейтказинов О.Д., Молдамуратов Ж.Н. Энергосбережение и декарбонизация в производстве цемента и пеностекла за счет использования природных активных минеральных добавок (опока и диатомит). *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(6):587–600. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-587-600>. – EDN: RUQCWE.

39. Рахимов М.А., Аубакирова З.А., Алдунгарова А.К., Менендес Пидаль де Наваскуэс И., Молдамуратов Ж.Н. Оптимизация устойчивого состава мелкозернистого бетона для 3D-печати с частичной заменой песка золошлаковыми отходами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(3):296–306. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-296-306>. – EDN: BISWAS.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

При подготовке данной статьи инструмент искусственного интеллекта ChatGPT 5.2 использовался исключительно для проверки текста на грамматические, орфографические и стилистические ошибки, а также в отдельных случаях для улучшения формулировок и структуры текста. Содержание и научная сущность статьи полностью подготовлены авторами и не являются результатом генеративного создания текста. После использования инструмента искусственного интеллекта ChatGPT 5.2 текст был дополнительно проверен, отредактирован и скорректирован авторами по мере необходимости. Авторы полностью несут ответственность за содержание опубликованной статьи.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пактин Манижа** – магистр, ассистент профессора школы строительства, Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28, Казахстан, m.paktin@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0009-0006-7348-2372>

**Иманов Алибек Маратович** – PhD докторант, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан, alibek.imanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6579-8510>

**Ильясова Карлыгаш Идрисовна** – магистр, ассистент профессора школы инженерии, Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28, Казахстан, k.iliasova@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6994-4806>

**Сейтказинов Оразалы Дауткалиевич** – кандидат технических наук, профессор школы строительства, Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28, Казахстан; Казахская головная архитектурно-строительная академия, 050043, Алматы, ул. Торайгырова, 29, Казахстан, oseitkazinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4854-3747>

**Ногайбекова Манат Тузельбековна** – старший преподаватель школы архитектуры и логистики, Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, 080003, Тараз, ул. Сатпаева, 28, Казахстан, nogaibekova\_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4394-4453>

**Молдамуратов Жангыз Нуржанович** – PhD, профессор-исследователь школы строительства, Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28, Казахстан; Казахская головная архитектурно-строительная академия, 050043, Алматы, ул. Торайгырова, 29, Казахстан, zhanga\_m\_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Пактин М.** – проведение основной части экспериментальных исследований, изготовление и подготовка образцов, выполнение испытаний на прочность, водопоглощение, морозостойкость и сульфатную стойкость, обработка экспериментальных данных, подготовка первоначального варианта рукописи и оформление результатов исследования.

**Иманов А.М.** – участие в разработке методики исследования и подборе составов бетона, анализ физико-механических и гидрофизических характеристик, интерпретация результатов по прочности, трещиностойкости, водонепроницаемости и долговечности, подготовка отдельных разделов статьи и участие в обсуждении результатов.

**Ильясова К.И.** – выполнение микроструктурных исследований, интерпретация данных о фазовом составе и микроструктуре цементного камня, подготовка рисунков, диаграмм и описаний микроструктурных особенностей исследуемых составов, участие в написании и редактировании статьи.

**Сейтказинов О.Д.** – участие в проведении лабораторных испытаний, подготовке и хранении образцов, обработке отдельных экспериментальных результатов, а также в обсуждении полученных данных.

**Ногайбекова М.Т.** – участие в анализе научной литературы, подборе и систематизации библиографических источников, оформлении таблиц, рисунков и списка литературы, а также в технической подготовке рукописи к публикации.

**Молдамуратов Ж.Н.** – научное руководство исследованием, формирование общей концепции и структуры статьи, постановка цели и задач исследования, координация выполнения экспериментальной программы, анализ и обобщение полученных результатов, подготовка выводов и заключения, научное редактирование и окончательное утверждение рукописи к публикации.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 10.06.2026.