

# Строительные материалы и изделия

УДК 666.972.5

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор

© И. У. Аубакирова, канд. техн. наук, доцент

© В. А. Скобликов, студент

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tsik54@yandex.ru, centeririna@spbgasu.ru, sva\_01@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-109-116

© Yu. V. Pukharenko, Dr. Sci. Tech., Professor

© I. U. Aubakirova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. A. Skoblikov, student

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: tsik54@yandex.ru, centeririna@spbgasu.ru, sva\_01@list.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАВИЯ В ДОРОЖНОМ БЕТОНЕ

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF USING GRAVEL IN PAVEMENT CONCRETE

Представлены исследования по проектированию состава дорожного бетона на гравийном заполнителе. Приведены основные факторы, влияющие на прочность и долговечность дорожного бетона, и разработаны мероприятия по повышению прочности сцепления цементной матрицы с гравийным заполнителем. Использование новой комплексной добавки с модификатором на основе углеродных фуллероидных наночастиц и адгезивного компонента позволило повысить прочность бетона на сжатие и изгиб, обеспечить заданные морозостойкость и водонепроницаемость. Показана возможность использования гравия как местного сырьевого материала в бетонах различного назначения, в том числе в дорожных.

*Ключевые слова:* дорожный бетон, гравийный заполнитель, комплексная добавка.

Research results on the design of the composition of pavement concrete on gravel aggregate are presented. The main factors affecting the strength and durability of pavement concrete are considered, and measures have been developed to increase the adhesion strength of the cement matrix to the gravel aggregate. The use of a new complex additive with a modifier based on carbon fulleroid nanoparticles and adhesive component has made it possible to increase the compressive and bending strength of concrete, to ensure the desired frost resistance and water resistance. The authors show the possibility of using gravel as a local raw material in concrete for various purposes, including road construction.

*Keywords:* pavement concrete, gravel aggregate, complex additive.

#### Введение

Дорожное строительство в России решает ряд масштабных социальных, экономических и инфраструктурных задач, позволяя сократить расстояния, улучшить логистику, развивать туризм, открывать новые возможности для многих смежных направлений деятельности. Правительством РФ принят обновленный план дорожного строительства на 2024–2028 годы в рамках государственной программы «Развитие транспортной

системы»<sup>1</sup>, в котором кроме развития федеральных трасс запланирована модернизация дорог регионального, межмуниципального и местного значения. Перспективным направлением в строительстве автомобильных дорог являются бетонные дороги. Они отличаются от асфальтобетонных большим безремонтным сроком службы, экологично-

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства РФ № 3907-р от 25.12.2023 г. «О перечнях мероприятий по осуществлению дорожной деятельности в 2024–2028 гг. в отношении автомобильных дорог общего пользования».

стью, обеспеченностью сырьевыми ресурсами и экономичностью при устройстве и эксплуатации [1].

Основным компонентом в бетонной смеси являются заполнители, которые занимают до 85 % объема и оказывают непосредственное влияние на технико-экономические характеристики бетона. При этом их стоимость составляет 30–50 % от стоимости готовой конструкции, поэтому применение местных заполнителей позволяет повысить экономичность и сократить сроки строительства. Одним из таких доступных компонентов бетона является гравий, отличительной особенностью которого является высокая прочность, так как образование зерен в процессе разрушения горных пород в результате природных воздействий продолжалось столетиями без участия человека. При добыче гравия требуется только очистка от глины и песка (при необходимости). Однако характерные свойства гравия — округлая форма и довольно гладкая поверхность — отрицательно влияют на прочность сцепления зерен с цементным камнем и не позволяют получать бетоны с высокой прочностью. Именно это вызывает негативное отношение технологов к использованию гравия в производстве бетонных конструкций, и именно поэтому появились рекомендации по использованию гравийного заполнителя в бетонах не выше класса В22,5 [2].

Результаты испытания бетонов одного состава, отличающихся видом крупного заполнителя (щебень или гравий), показали повышение прочности бетона на щебне на 17–20 % [3, с. 70]. Однако за прошедшие десятилетия производство бетона существенно изменилось, появились инновационные технологии, связанные с модифицированием состава на различных структурных уровнях и позволяющие достичь требуемых характеристик с использованием компонентов бетонной смеси, которые раньше считались неэффективными.

Использование гравия в бетонных конструкциях часто вызвано отсутствием в регионе щебня и его доставка экономически нецелесообразна. Таким образом, исследования по проектированию эффективных составов бетона на гравийном заполнителе являются актуальными, в том числе для дорожного строительства.

Одной из основных причин пониженной прочности бетона на гравии считается невысокая прочность сцепления заполнителя с цементным камнем, обусловленная гладкой (круглоокатанной) поверхностью зерен. Следует отметить, что нет единой стандартной методики определения прочности сцепления заполнителя с цементным камнем [4], и о ее величине обычно судят по характеру разрушения бетонных образцов: разрушение по зернам заполнителя или по его контакту с цементно-песчаной матрицей. О. Я. Бергом с соавторами [5] были проведены теоретические исследования условий трещинообразования в бетоне в зависимости от макроструктуры с учетом локальных явлений на границе раздела его компонентов и показана прямая зависимость прочности бетона от прочности цементного камня и заполнителя. При этом для высокопрочных бетонов особо отмечено влияние сцепления между крупным заполнителем и раствором.

В многочисленных исследованиях отмечено, что в контактной зоне локализуются микродефекты и микротрещины из-за процессов водоотделения и седиментации в свежееуложенной бетонной смеси, что ослабляет контактный слой.

В современном строительном материаловедении имеется множество способов увеличения прочности сцепления заполнителей с цементной матрицей: различные способы активации как крупного, так и мелкого заполнителя путем дробления (как механического, так и электроимпульсного), нанесения на поверхность заполнителей тонкого слоя минерального состава (например, жидкого

стекла или насыщенного раствора извести), применение активных минеральных наполнителей (кремнеземистой пыли, золы-уноса, доменного шлака и т. д.) [6–8].

Следует отметить, что подвижность смесей на гравии всегда выше при прочих равных условиях по сравнению со смесями на щебне, что является определенным резервом повышения прочности сцепления вяжущего с заполнителем за счет размещения на поверхности зерен «активных» частиц с возможностью их взаимодействия с продуктами гидратации цемента.

**Цель работы** — упрочнение контактной зоны «заполнитель–цементная матрица» путем обработки поверхности гравия комплексной добавкой наноразмерных частиц, в том числе диоксида кремния, для повышения эффективности его использования в дорожном бетоне.

#### Методы

Проектирование состава дорожного бетона должно опираться на следующие положения:

1. С учетом условий работы в конструкции дорожный бетон характеризуется двумя показателями: прочностью на растяжение при изгибе  $R_{pu}$  ( $B_{tb}$ ) и прочностью на сжатие  $R_{сж}$  ( $B$ ). Поэтому расчет состава ведется по прочности на сжатие с обеспечением требуемой прочности на изгиб или по прочности на изгиб с обеспечением заданной прочности на сжатие [9].

2. Дорожные бетоны требуют высоких характеристик не только прочности, но и долговечности, поскольку работают преимущественно в агрессивных средах. Из многочисленных факторов, воздействующих на бетон дорожных покрытий, наиболее агрессивными являются циклическое замораживание и оттаивание. Для обеспечения морозостойкости необходимо использовать специальные вяжущие, заполнители, а также пластифицирующие, воздухововлекающие и другие добавки.

3. Обеспечить соответствие дорожно-го бетона всё возрастающим требованиям, даже при условии использования современных химических добавок, становится всё труднее, а в отдельных случаях практически невозможно. Повысить его физико-механические характеристики, в том числе показатели прочности и долговечности, можно армированием волокнами, изготовленными из различных материалов и имеющими определенные геометрические и физико-механические характеристики.

В данной работе в качестве примера рассмотрена задача разработки состава фиброармированной бетонной смеси для строительства дорог регионального и муниципального значения *БСКД В25 В<sub>и</sub>3,2 П4 F<sub>2</sub>150 W6* по ГОСТ 59300–2021.

В качестве крупного заполнителя использовался гравий фракции 5–20 мм по ГОСТ 8267–93 со следующими характеристиками:

- истинная плотность — 2610 кг/м<sup>3</sup>;
- насыпная плотность — 1360 кг/м<sup>3</sup>;
- пустотность — 42 %.

В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок по ГОСТ 8736–2014 с модулем крупности 2,0. В качестве вяжущего использовался портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н ДП (ЖИ) по ГОСТ Р 55224–2020 производства Сланцевского цементного завода «ЦЕСЛА» с удельной поверхностью (по Блейну) 349 м<sup>2</sup>/кг, пределом прочности при изгибе в возрасте 28 сут 7,8 МПа, при сжатии — 42,5 МПа.

Для повышения плотности, морозостойкости цементного бетона, а также прочности сцепления гравия с цементным камнем применялась комплексная многофункциональная добавка на основе суперпластификатора «РЕМДОРС», включающая модификатор на основе углеродных фуллероидных наночастиц, опытно-промышленная апробация которого в дорожных бетонах показала очень высокую эффективность [10, 11].

В качестве компонента, повышающего адгезионные свойства цементной матрицы, впервые использовалась добавка диоксида кремния осажденного КОВЕЛОС® производства ООО «Экокремний» по ТУ 2168-002-14324269–2009. Добавка представляет собой сухой порошок белого цвета с насыпной плотностью 140 кг/м<sup>3</sup>, удельной поверхностью 400 м<sup>2</sup>/г, средним размером частиц 6 мкм, массовой долей диоксида кремния 97 %.

Для дисперсного армирования бетона использовались синтетические макроволокна производства ООО «РУССЕАЛ», способствующие увеличению его прочности, ударостойкости и стойкости к истирающим воздействиям, обеспечивающие вязкий характер разрушения, что увеличивает эксплуатационную надежность и безопасность строительных конструкций. Синтетическая макрофибра RS-Makro Wave на основе полипропилена имеет длину 50 мм, ширину 1,5±0,5 мм, толщину 0,5 мм, предел прочности на растяжение не менее 125 МПа, характеризуется высокой кислото- и щелочестойкостью, удовлетворяет ТУ 20.60.11-002-30726220–2019.

Проектирование состава бетонных смесей осуществлялось по ГОСТ Р 59302–2021<sup>2</sup>, состава фибробетонных смесей — графоаналитическим методом, разработанным в СПбГАСУ [12].

Состав исходной бетонной смеси рассчитывался по классическому методу абсолютных объемов, который начинается с определения водоцементного отношения. Водоцементное отношение рассчитывалось, исходя из требований по прочности на сжатие (1), прочности на изгиб (2) и обеспечения заданной морозостойкости:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{AR_{ц}}{(R_{с} + 0,5AR_{ц})} = \frac{0,6 \cdot 42,5}{32,5 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 42,5} = 0,56; \quad (1)$$

<sup>2</sup> ГОСТ Р 59302–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей бетонные для устройства слоев оснований и покрытий. Правила подбора состава.

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,36R_{цц}}{(R_{ри} + 0,36kR_{цц})} = \frac{0,36 \cdot 7,8}{(4,0 + 0,36 \cdot 0,2 \cdot 7,8)} = 0,62, \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент, учитывающий качество заполнителей;  $R_{ц}$  — предел прочности цемента при сжатии в возрасте 28 сут;  $R_{с}$  — проектная прочность бетона;  $R_{цц}$  — предел прочности цемента при изгибе в возрасте 28 сут;  $R_{ри}$  — предел прочности бетона на растяжение при изгибе;  $k$  — эмпирический коэффициент.

Следует отметить, что указанные формулы учитывают качество заполнителя ( $A = 0,6$  для рядовых), проектные прочности бетона и цемента в возрасте 28 сут, но не учитывают применение химических добавок, без которых трудно представить современное материаловедение. Для обеспечения морозостойкости  $F_{2150}$  и выше необходимо получить бетон с минимальным количеством дефектов в структуре цементного камня. К таким дефектам относятся и капиллярные поры, пронизывающие цементный камень. Объем капиллярных пор ( $\Pi_{к}$ ) в бетоне выражается формулой

$$\Pi_{к} = (B/Ц - 0,5\alpha_{ц}) Ц,$$

где  $\alpha_{ц}$  — степень гидратации цемента.

Из этого следует, что наименьший объем капиллярных пор  $\Pi_{к}$  (следовательно, наименьшая проницаемость и наибольшая морозостойкость бетона) будет иметь место при  $B/Ц - 0,5\alpha_{ц} = 0$  или  $B/Ц = 0,5\alpha_{ц}$ .

При надлежащем уходе за твердеющим бетоном портландцемент среднего качества связывает примерно 15 % воды по массе, а при полной гидратации — 25...28 %. Однако даже при твердении в течение десятков лет степень гидратации не превышает значенный  $\alpha = 80...90$  %, т. е. количество связанной воды составляет 20...24 % от массы цемента [13]. Таким образом, чтобы приблизиться к идеальному строению цементного камня в бетоне с минимальным объемом капиллярных пор, нужно ограничивать  $B/Ц$  пределом

0,4...0,45 и добиваться более плотной гидратации цемента.

В дальнейших расчетах использовалась величина В/Ц = 0,4, с учетом которой рассчитывался расход сырьевых компонентов на 1 м<sup>3</sup> исходной бетонной смеси для дальнейшего использования в качестве матрицы фибробетона (табл. 1).

Добавка КОВЕЛОС®, являющаяся наноструктурным компонентом по размеру частиц и применяемому количеству, для равномерного распределения в бетонной смеси смешивалась с добавкой «РЕМДОРС-нано». Введение данной добавки свидетельствует о значительном повышении прочности при сжатии бетона, объяснить которое можно за счет повышения прочности сцепления гравия с цементной матрицей, происходящее в результате взаимодействия активного кремнезема с портландитом.

В результате испытаний контрольных образцов установлены прочностные характеристики исходного бетона: прочность при сжатии  $R_{сж} = 40,2$  МПа, что превосходит заданный класс В25, и прочность на растяжение при изгибе  $R_{ри} = 3,43$  МПа, что является недостаточным для поставленной задачи. Поэтому в состав бетона вводится синтетическая макрофибра, для которой определялась величина сцепления с матрицей (для выбранного типоразмера макрофибры ( $\phi_t$ ) = 3,1 МПа) и коэффициент армирования  $\mu$ , соответствующий получению за-

данной прочности фибробетона на изгиб  $R_{\phi_6} = 4,0$  МПа. В соответствии с методикой, приведенной в [14],  $\mu = 0,18$  %, следовательно, расход макрофибры составляет 2,0 кг/м<sup>3</sup>.

### Результаты

Приготовление смесей осуществлялось в лабораторном двухвальном бетоносмесителе принудительного действия следующим образом: в работающий смеситель сначала засыпали крупный заполнитель (гравий), заливали половину воды затворения с комплексной добавкой и перемешивали в течение одной минуты, затем засыпали песок и цемент, добавляли остальную воду и перемешивали в течение трех минут. В готовую смесь добавляли фибру, после чего перемешивание продолжали одну минуту.

Такой режим перемешивания и использование специальной трехкомпонентной добавки обеспечили в дальнейшем повышенную прочность сцепления зерен гравия с цементным камнем и формирование контактных зон с повышенной водонепроницаемостью. Приготовленную фибробетонную смесь подвергали испытаниям с целью оценки технологических характеристик, а затем из нее формовали образцы, которые уплотнялись литьевым способом с кратковременной вибрацией в течение 5...10 секунд. Изготовленные образцы в течение суток выдерживались в нормально-влажных условиях для набора бетоном первоначальной прочности, после чего осво-

Таблица 1

Состав исходной бетонной смеси и прочность бетона

Наименование компонентов	Расход, кг		
Цемент 42,5Н ДП	383		
Песок Мк = 2,0	830		
Гравий фракции 5–20 мм	1056		
Вода	153		
Добавка «РЕМДОРС-нано» (0,8–1,2 % от массы цемента)	3,1	3,8	4,5
Добавка КОВЕЛОС® (0,01 % от массы цемента)	–	–	0,04
Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте 28 сут	22,2	25,5	40,2
Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте 28 сут	2,7	3,1	3,4

## Результаты испытаний фибробетонных образцов

Показатель	Значение
Удобоукладываемость фибробетонной смеси по осадке конуса, см	18–19
Марка по подвижности	П4
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2350
Водоотделение	Без признаков водоотделения
Раствороотделение	Без признаков раствоороотделения
Сохраняемость	Потеря подвижности ≈ 1,5 см/час
Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	2310
Предел прочности бетона при сжатии ( $R_{сж}$ ) в возрасте 28 сут, МПа	41,5
Класс бетона по прочности при сжатии	B30
Предел прочности бетона при изгибе ( $R_{изг}$ ) в возрасте 28 сут, МПа	4,1
Класс бетона на прочности при изгибе	$B_{ib}$ 3.2
Марка по морозостойкости	$F_2$ 150
Марка по водонепроницаемости	W8

бождались от форм и продолжали твердеть до 28 суток.

Образцы фибробетона расчетного состава были испытаны в лабораторных условиях, результаты представлены в табл. 2.

Из показателей таблицы следует, что для получения цементного бетона с заданными характеристиками в качестве крупного заполнителя может быть использован гравий фракции 5–20 мм. Комплекс заданных свойств фибробетона на гравии (в том числе морозостойкость  $F_2$  150) обеспечивается в случае достижения прочности на сжатие, соответствующей классу B30.

### Вывод

Применение специально разработанной комплексной многофункциональной добавки позволяет обеспечить требуемую подвижность бетонной смеси, а соблюдение рекомендованной технологии перемешивания приводит к увеличению сцепления цементного камня с гравием и, соответственно, повышению прочности и улучшению эксплуатационных свойств дорожного бетона.

### Библиографический список

1. Буянов Ю. Д., Буткевич Г. Р., Левкова Н. С. Промышленность нерудных строительных материалов.

Состояние и перспективы // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. Москва, 9–14 сентября 2001 г. Кн. 2. М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. С. 1126–1131.

2. Чумаков Л. Д. Технология заполнителей бетона. М.: АСВ, 2011. 265 с.

3. Скрамтаев Б. Г. Бетоны различных видов / НКТИ СССР. М.; Л.: Госстройиздат, 1933. 222 с.

4. Фаликман В. Р., Сиротин П. Н. Обзор подходов к нормированию показателей качества крупного заполнителя в зарубежных стандартах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 64–73. DOI 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73.

5. Берг О. Я., Хубова Н. Г., Щербаков Е. Н. Разрушение контакта между заполнителем и раствором при сжатии бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1972. № 8. С. 13–17.

6. Лукьянчиков С. А., Кудяков А. И. Разработка физико-химических приемов модификации поверхности заполнителя // Нетрадиционные технологии в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. семинара. Томск, 25–28 мая 1999 г. Ч. 1. Томск, 1999. С. 100–103.

7. Wong Y. L., Lam L., Poon C. S., Zhou F. P. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. Свойства контактной зоны матрица–заполнитель в растворах на основе золосодержащего цемента // Cem. and Concr. Res. 1999. № 12. Pp. 1905–1913.

8. Donza H., Cabrera O., Irassar E. F. High strength concrete with different fine aggregate. Высокопрочные бетоны с различными мелкими заполнителями // Cem. and Concr. Res. 2002. № 11. Pp. 1755–1761.

9. Боженев Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2007. 528 с.

10. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Староверов В. Д. Влияние углеродных наноматериалов на структуру и свойства цементных бетонов // Бетон и железобетон — взгляд в будущее: Науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону. Москва, 12–16 мая 2014 г. В 7 т. Т. 6. М.: МГСУ, 2014. С. 205–212.

11. Purharenko Y. V., Aubakirova I. U., Staroverov V. D. Structural Features of Nanomodified Cement Stone // *Architecture and Engineering*. 2016. Vol. 1. № 1. Pp. 66–70.

12. Purharenko Yu. V., Rhrenov G. M., Klyuev S. V., Rhezhev T. A., Eshanzada S. M. Design of steel fiber-reinforced concrete for slip forming. *Construction Materials and Products*, 2024. 7(5). 2. DOI 10.58224/2618-7183-2024-7-5-2.

13. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.

14. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И., Кострикин М. П. Совершенствование метода определения величины сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2020 году*: сб. науч. тр. РААСН. В 2 т. М.: АСВ, 2021. Т. 2. С. 208–216.

## References

1. Buyanov Yu. D., Butkevich G. R., Levkova N. S. *Promyshlennost' nerudnykh stroitel'nykh materialov. Sostoyaniye i perspektivy* [Industry of non-metallic building materials. Status and prospects]. *Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya. Trudy 1-y Vseros.konf. po problemam betona i zhelezobetona. Moskva, 9–14 sentyabrya 2001 g.* [Concrete at the turn of the third millennium. Proceedings of the 1-st All-Russian Conf. on the problems of concrete and reinforced concrete. Moscow, September 9–14, 2001]. Vol. 2. Moscow, Assotsiatsiya «Zhelezobeton» Publ., 2001, pp. 1126–1131.

2. Chumakov L. D. *Tekhnologiya zapolniteley betona* [Concrete aggregate technology]. Moscow, ASV Publ., 2011, 265 p.

3. Skramtaev B. G. *Betony razlichnykh vidov NKTI SSSR* [Concretes of various types of NKTI in the USSR]. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1933, 222 p.

4. Falikman V. R., Sirotin P. N. *Obzor podkhodov k normirovaniyu pokazateley kachestva krupnogo zapolnitelya v zarubezhnykh standartakh* [Review of approaches to rationing the quality indicators of large aggregate in foreign standards]. *Promyshlennoe*

*i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2022, no. 4, pp. 64–73. DOI 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73.

5. Berg O. Ya., Khubova N. G., Shcherbakov E. N. *Razrusheniye kontakta mezhdu zapolnitelem i rastvorom pri szhatii betona* [Fracture of contact between aggregate and mortar during concrete compression]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura –Bulletin of Universities. Construction and Architecture*, 1972, no. 8, pp. 13–17.

6. Luk'yanchikov S. A., Kudyakov A. I. *Razrabotka fiziko-khimicheskikh priemov modifikatsii poverkhnosti zapolnitelya* [Development of physical and chemical techniques for modifying the aggregate surface]. *Netraditsionnye tekhnologii v stroitel'stve. Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar. Tomsk, 25–28 maya 1999 g.* [Unconventional technologies in construction. Proceedings of the International scientific-technical workshop, Tomsk, May 25–28, 1999]. Pt. 1. Tomsk, 1999, pp. 100–103.

7. Wong Y. L., Lam L., Poon C. S., Zhou F. P. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. *Cem. and Concr. Res.*, 1999, no. 12, pp. 1905–1913.

8. Donza H., Cabrera O., Irassar E. F. High strength concrete with different fine aggregate. *Cem. and Concr. Res.*, 2002, no. 11, pp. 1755–1761.

9. Bozhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.

10. Pukharenko Yu. V., Aubakirova I. U., Staroverov V. D. *Vliyanie uglerodnykh nanomaterialov na strukturu i svoystva tsementnykh betonov* [Influence of carbon nanomaterials on the structure and properties of cement concretes]. *Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee. Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu. Moskva, 12–16 maya 2014 g.* [Concrete and reinforced concrete. Looking into the future. Proceedings of the III All-Russia (II International) Conf. on concrete and reinforced concrete. Moscow, May 12–16, 2014]. In 7 vols, vol. 6. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 205–212.

11. Purharenko Y. V., Aubakirova I. U., Staroverov V. D. Structural Features of Nanomodified Cement Stone. *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 66–70.

12. Purharenko Yu. V., Rhrenov G. M., Klyuev S. V., Rhezhev T. A., Eshanzada S. M. Design of steel fiber-reinforced concrete for slip forming. *Construction Materials and Products*, 2024, 7(5). 2. DOI 10.58224/2618-7183-2024-7-5-2.

13. Sheykin A. E., Chekhovskiy Yu. V., Brusser M. I. *Struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Structure and properties of cement concretes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 344 p.

14. Pukharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., Kostrikin M. P. *Sovershenstvovanie metoda opredeleniya velichiny stsepleniya armiruyushchikh*

*volokon s matritsey v fibrobetone* [Improvement of the method for determining the adhesion of reinforcing fibers to the matrix in fiber concrete]. *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli RF v 2020 godu. Trudy*

*RAASN* [Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020. Proceedings of RAASN]. In 2 vols. Moscow, ASV Publ., 2021, vol. 2, pp. 208–216.