

## Результаты применения взаимодополняющих методов оценки экспериментального тяжелого бетона

В статье приведены опытные данные по прочностным и деформативным характеристикам экспериментального бетона, внедряемого на заводе железобетонных изделий. Исследуемый бетон отличается оптимизированным составом и пониженным расходом цемента. В ходе работы испытаны бетонные кубы и призмы, а также железобетонные балки. Сравнимые серии образцов формировались из экспериментального и классического бетона. Проведенный комплексный многофакторный анализ показал корреляцию взаимодополняющих методов исследования при снижении показателей прочности и модуля упругости экспериментального бетона и уменьшении несущей способности и жесткости соответствующих железобетонных изгибаемых элементов.

**Ключевые слова:** тяжелый бетон, экспериментальный состав бетона, прочность, жесткость, железобетон, балка, изгибаемый элемент, изгиб, испытание, нагружение.

Toshin D. S.

*The results of the application of compliant methods for evaluating experimental heavy concrete*

*The article presents experimental data on the strength and deformation characteristics of the experimental concrete introduced at the concrete goods plant. The concrete under study is characterized by an optimized composition and reduced cement consumption. During the work, concrete cubes and prisms, as well as reinforced concrete beams, were tested. The compared series of samples were formed from experimental and classic concrete. The carried out complex multivariate analysis showed the correlation of complementary research methods with a decrease in the strength and elastic modulus of the experimental concrete and a decrease in the bearing capacity and stiffness of the corresponding reinforced concrete bending elements.*

**Keywords:** heavy concrete, experimental concrete composition, strength, stiffness, reinforced concrete, beam, bending element, bending, testing, loading.



**Тошин  
Дмитрий  
Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, Тольяттинский государственный университет (ТГУ), Архитектурно-строительный институт, Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства, Тольятти, Российская Федерация

e-mail: d.toshin@tlttsu.ru

Заводы железобетонных изделий работают в условиях рыночной конкуренции и вынуждены искать варианты сокращения издержек в производстве бетонной смеси и готовой продукции. Многие исследовательские задачи направлены именно на оптимизацию составов бетонных смесей при обеспечении наперед заданных характеристик готового материала [1–3], что обеспечивается разработкой модифицированных цементных бетонов с минеральными добавками природного, искусственного, техногенного происхождения [4–9], введением добавок-пластификаторов [10–14] или комплексных добавок [15–23], а также подбором оптимального зернового (гранулометрического) состава [24]. Одним из направлений снижения себестоимости является совершенствование составов бетонных смесей и пересмотр норм расхода материалов, что не противоречит действующим нормативным документам. Оптимизация, как правило, ориентирована на сокращение расхода цемента [24, 25] как наиболее дорогостоящего компонента бетонной смеси при сохранении проектной прочности бетона.

В условиях действующих производств подобные исследовательские работы выполняются, как правило, с контролем именно прочностных показателей бетона и не затрагивают деформативных характеристик готового материала. Хотя, как известно, к железобетонным изделиям предъявляются не только требования предельных состояний первой группы по несущей способности, но также требования предельных состояний второй группы, включающие ограничения по жесткости и трещиностойкости [26, 27]. Поэтому проведение комплексных взаимодополняющих многофакторных исследований по оценке прочностных и деформативных параметров экспериментального бетона, внедряемого на заводе железобетонных изделий, является целью данного исследования и направлено на повышение механической безопасности железобетонных конструкций, зданий и сооружений в целом.

Новизна работы заключается в одновременном применении независимых методов оценки прочностных и эксплуатационных показателей экспериментального бетона на образцах-кубах,

Таблица 1. Формы, размеры и количество образцов, предусмотренных программой испытания

Форма образца	Размер образца, мм	Серия применяемого бетона	Шифры образцов	Вариант продольного армирования	Количество образцов, шт.
Куб	150×150×150	К	Кк1, Кк2	—	2
		Э	Кэ1, Кэ2	—	2
Призма	600×150×150	К	Пк1, Пк2	—	2
		Э	Пэ1, Пэ2	—	2
Балка	1560×120×140 (h)	К	Б8к	2Ø8 А400	1
		Э	Б8э	2Ø8 А400	1
		К	Б10к	2Ø10 А400	1
		Э	Б10э	2Ø10 А400	1

призмах и железобетонных балках. При комплексном подходе и корреляции полученных результатов это обеспечило высокую достоверность даже при небольшом количестве испытанных образцов.

При планировании рассматриваемого в данной работе исследования предусматривалось проведение испытания образцов-близнецов, изготовленных из бетонов классической рецептуры (далее серия К) и из экспериментального бетона (далее серия Э). С этой целью заводом железобетонных изделий были изготовлены бетонные кубы, призмы и железобетонные балки в соответствии с предусмотренной программой исследований (Таблица 1).

Для обеспечения возможности проведения сравнительного анализа по образцам из бетона серии К и серии Э предусматривалось, что составы исследуемых бетонных смесей обеспечат примерно равные прочностные показатели в проектном возрасте. Образцы кубов, призм и балок из бетона каждой серии изготавливались при этом из одного замеса.

Для приготовления бетонной смеси классического состава применялись следующие материалы: щебень известняковый марки 600 фракции 5–20 мм, песок мелкий волжский с модулем крупности около 1,2, портландцемент марки 500, поликарбонат с расходом до 0,5%. Для изготовления бетона экспериментального состава, внедряемого на заводе железобетонных изделий, применялся тот же щебень и цемент, в качестве мелкого заполнителя использовался разнотонный песок, обеспечивающий более плотную укладку (упаковку) инертных заполнителей в сухом состоянии, а также поликарбонатный суперпластификатор с повышенным расходом до 1,5%.

Образцы-кубы были включены в программу экспериментальных исследований с целью определения и сравнения кубиковой прочности

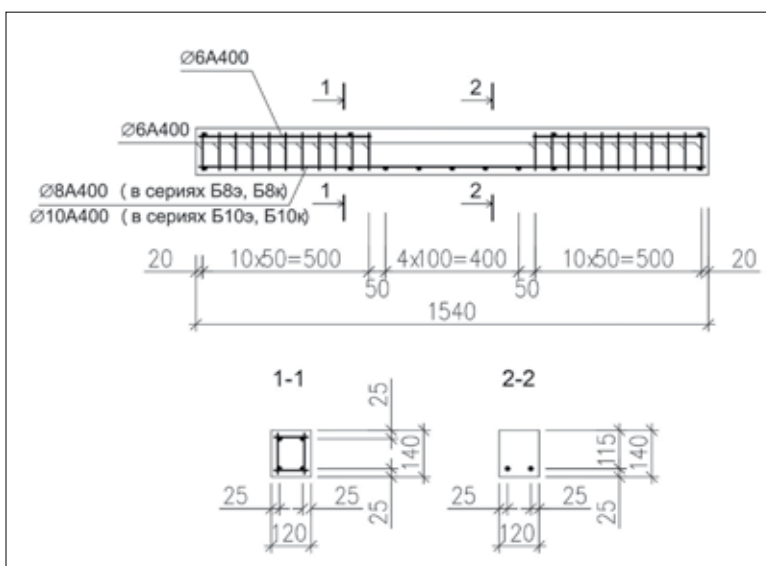


Иллюстрация 1. Проектные параметры армирования железобетонных балок. Автор Д. С. Тошин. 2022 г. Выполнено автором

в бетоне классического и экспериментального составов. Призмы испытывали с целью установления призмной прочности и начального модуля упругости и последующего сравнения результатов для бетонов серии К и серии Э.

Для оценки прочности при изгибе, жесткости и трещиностойкости железобетонных элементов, при бетонировании которых применялись сравниваемые составы, были изготовлены и в последующем испытаны балки с рабочим пролетом от опоры до опоры 1500 мм. Железобетонные образцы выполнялись в двух вариантах армирования: Б10к и Б10э — с проектным значением процента армирования  $\mu = 1,14\%$ ; Б8к и Б8э — при  $\mu = 0,73\%$  (Иллюстрация 1). Фактические размеры армированных элементов имели отклонения от проектных параметров величиной до 5% по высоте  $h$ , ширине  $b$  нормального сечения и до 7% по рабочей высоте сечения  $h_0$ .

Все балки проектировались в предположении пластического ха-

рактера разрушения с относительной высотой сжатой зоны меньше граничного значения относительной высоты сжатой зоны ( $\xi < \xi_R$ ). Последующие испытания подтвердили, что фактическое разрушение балок происходило по нормальному сечению и начиналось в результате достижения напряжениями в продольной арматуре физического предела текучести.

Железобетонные балки испытывались нагружением с помощью гидравлического домкрата через траверсу с созданием зоны чистого изгиба в средней трети образцов. Одна опора создавалась шарнирно-неподвижной, вторая — шарнирно-подвижной. Нагружение осуществлялось ступенями, величина которых назначалась не более 5 и 10% от расчетной величины разрушающей нагрузки до и после момента трещинообразования соответственно. В зоне чистого изгиба устанавливались приборы для определения характерных деформаций. Деформации бетона сжатой зоны

Таблица 2. Результаты определения кубиковой прочности, призмной прочности и модуля упругости бетонов классического и экспериментального составов

Серия бетона	Испытание кубов		Испытание призм		
	Шифр образца-куба	Кубиковая прочность, МПа	Шифр образца-призмы	Призмная прочность, МПа	Модуль упругости, МПа
Серия К	Кк1	54,4	Пк1	48,7	35550
	Кк2		Пк2		
Серия Э	Кэ1	63,9	Пэ1	50,8	33700
	Кэ2		Пэ2		

Таблица 3. Результаты определения несущей способности, относительных деформаций бетона и арматуры при испытании железобетонных балок; при  $M = M_{ult}$  ( $\varepsilon_s = 200 \cdot 10^{-5}$ )

Шифр образца-балки	Относительные деформации арматуры в растянутой зоне $\varepsilon_s \cdot 10^5$		Относительные деформации бетона в сжатой зоне $\varepsilon_b \cdot 10^5$		Прогиб $f$		Предельный изгибающий момент $M_{ult}$	
	без ед.изм.	%	без ед.изм.	%	мм	%	кН·м	%
$\mu = 0,73\%$								
Б8к	200,0	100	-86,6	100	6,16	100	4,82	100
Б8э	200,0	100	-85,9	99	6,33	103	4,22	88
$\mu = 1,14\%$								
Б10к	200,0	100	-107,0	100	6,13	100	6,07	100
Б10э	200,0	100	-103,8	97	6,26	102	5,88	97

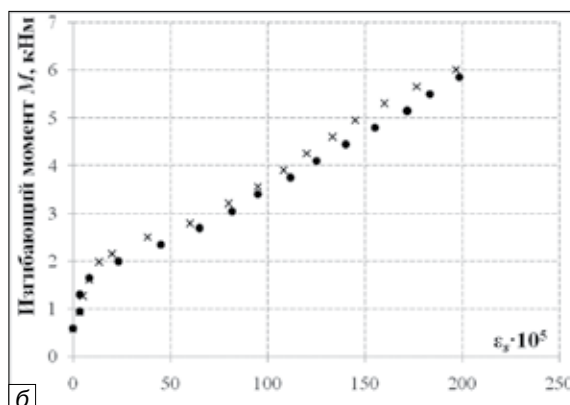
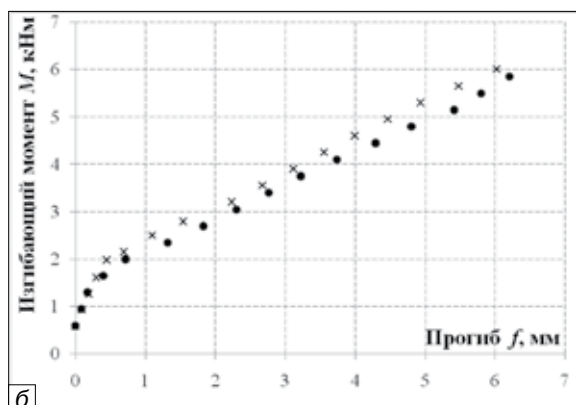
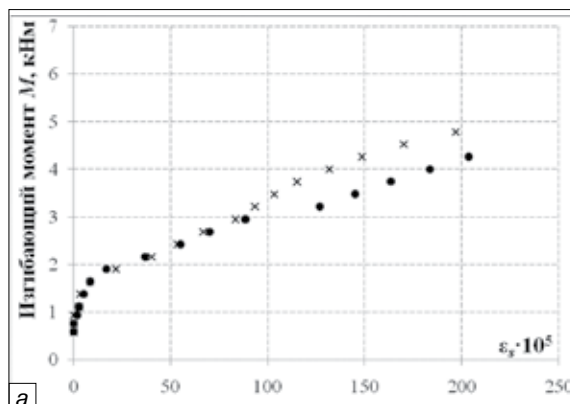
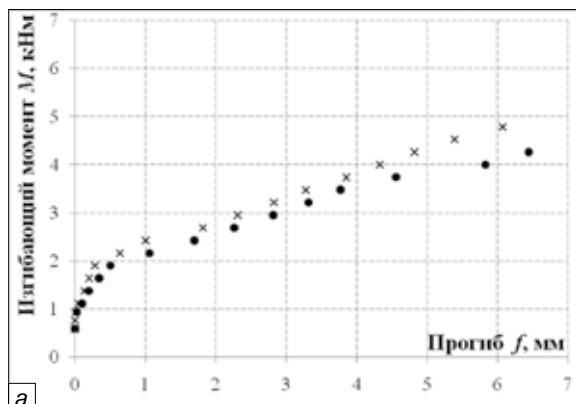


Иллюстрация 2. Экспериментальная зависимость «изгибающий момент  $M$  — прогиб  $f$ » для балок Б8э, Б8к (а) и Б10э, Б10к (б):  
 x — опытные данные для балок из бетона классического состава К;  
 • — опытные данные для балок из бетона экспериментального состава Э  
 Автор Д. С. Тошин. 2022 г. Выполнено автором

Иллюстрация 3. Экспериментальная зависимость «изгибающий момент — средние деформации арматуры растянутой зоны» для балок Б8к, Б8э (а) и Б10к, Б10э (б):  
 x — опытные данные для балок из бетона классического состава К;  
 • — опытные данные для балок из бетона экспериментального состава Э  
 Автор Д. С. Тошин. 2022 г. Выполнено автором

определялись с помощью двух тензодатчиков Гугенберга с ценой деления 0,001 мм на базе 100 мм. Средние деформации арматуры в растянутой зоне определялись с помощью двух измерительных мессур на основе индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 300 мм, крепежные резьбовые втулки приваривались к каждому стержню продольной арматуры до бетонирования образцов. Также для определения прогибов балок и учета осадок опор предусматривалось крепление трех прогибомеров 6-ПАО с ценой деления 0,01 мм. Несущая способность железобетонных балок определялась по величине изгибающего момента, соответствующего относительным деформациям продольной арматуры в растянутой зоне 0,002, которые устанавливались по усредненным измерениям с двух мессур.

Результаты выполненных испытаний по кубам и призмам сведены в Таблицу 2. Результаты обработки данных, полученных при нагружении железобетонных балок, представлены в Таблице 3.

Полученные результаты показали, что исследуемые бетоны классического и экспериментального составов имеют близкие показатели прочности, что и предусматривалось при планировании испытаний. Однако модуль упругости бетона экспериментального состава оказался на 5% меньше, чем модуль упругости бетона классического состава, при том, что кубиковая и призматическая прочность бетона экспериментального состава была незначительно выше.

Предположительно именно снижение модуля упругости экспериментального бетона в сравнении с классическим составом привело к повышению деформативности изгибаемых железобетонных балок (Иллюстрация 2). Несущая способность балок серии Б8э и Б10э также оказалась ниже на 12 и 3% предельного изгибающего момента балок серий Б8к и Б10к соответственно. Снижение несущей способности балок, изготовленных из бетона серии Э, также может быть обосновано изменениями модуля упругости, если в качестве критериев прочности прибегать к деформационному принципу оценки и сравнению текущих значений деформаций арматуры и бетона с их предельными значениями. При равных значениях изгибающих моментов в балках серий-близнецов деформации бетона и арматуры всегда были больше у образцов из бетона экспериментальной серии (Иллюстрации 3, 4). Например, при уровне нагружения  $0,6M_{ult}$  (здесь  $M_{ult}$  — предельное значение изгибающего момента для балок из бетона серии К при  $\varepsilon_s = 0,002$ ) средние деформации арматуры в балках Б8э и Б10э составили 130 и 107% от аналогичных значений в балках-близнецах Б8к и Б10к соответственно; относительные деформации бетона сжатой зоны — 106 и 109%.

Проведенные сравнительные многофакторные исследования по оценке прочностных и деформативных параметров экспериментального бетона, внедряемого на заводе железобетонных изделий, показали обоснованность комплексного подхода на основе взаимодополняющих методов испытания бетонных образцов разной формы и железобетонных элементов. Отдельные данные взаимно дополняют результаты других методов исследования, что повышает достоверность выводов по работе в целом. Комплексный подход рекомендуется заводам железобетонных изделий при внесении изменений в составы бетонных смесей и при необходимости может быть расширен по перечню экспериментальных и аналитических исследований в зависимости от степени корректировки рецептуры, от необходимости смены поставщиков сырья, от области применения готового бетона и железобетонных изделий и т. п.

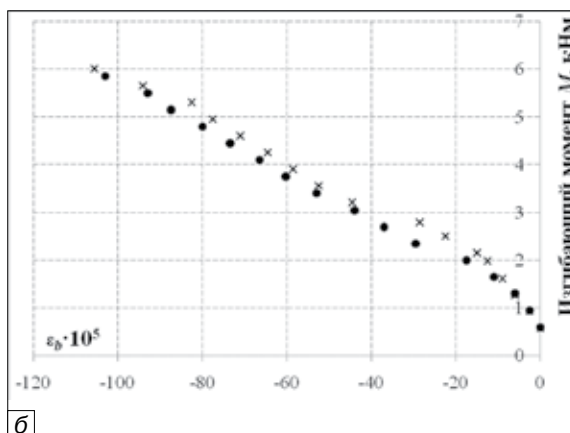
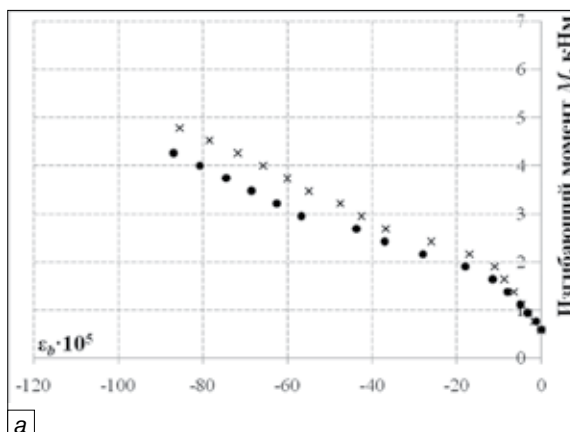


Иллюстрация 4. Экспериментальная зависимость «изгибающий момент — деформации бетона сжатой зоны» для балок Б8к, Б8э (а) и Б10к, Б10э (б):

x — опытные данные для балок из бетона классического состава К;  
• — опытные данные для балок из бетона экспериментального состава Э

Автор Д. С. Тошин. 2022 г. Выполнено автором

## Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- Экспериментальный бетон показал более деформативные свойства в сравнении с классическим составом — при более высокой кубиковой и призматической прочности получен модуль упругости на 5% ниже.
- Несущая способность балок из бетона экспериментального состава оказалась ниже, чем в балках из классического состава: на 3% при  $\mu = 1,14\%$ , на 12% при  $\mu = 0,73\%$ .
- При изгибе жесткость железобетонных элементов, изготовленных из экспериментального бетона, уступает аналогичному параметру балок, выполненных из классического состава: при уровне нагружения  $0,6M_{ult}$  прогибы балок для серии Б10э и Б8э на 11 и 22% больше по сравнению с сериями Б10к и Б8к соответственно.

Экспериментально обоснована необходимость проведения комплексного многофакторного контроля качества бетона при оптимизации составов бетонной смеси на заводе железобетонных изделий, основанного на взаимодополняющих методах и включающих определение прочностных и деформативных параметров тяжелого бетона на стандартных образцах, а также оценку жесткости, трещиностойкости и несущей способности на железобетонных образцах, изделиях.

**Список использованной литературы**

- 1 Баженов Ю. М. Технология бетона. — М.: Изд-во АСВ, 2003. — 500 с.
- 2 Свищ И. С. Исследование набора прочности во времени в агрессивной среде тяжелого бетона с использованием сульфатостойкого цемента, крымских заполнителей и добавки на основе эфиров поликарбоксилатов // Строительство и техногенная безопасность. — 2018. — № 13 (65). — С. 63–68.
- 3 Kim B. G., Jiang S., Jolicoeur C., Ai'tcin P. C. The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste // Cement and Concrete Research. — 2000. — Vol. 30. — № 6. — P. 887–893.
- 4 Низина Т. А., Бальков А. С., Коровкин Д. И. и др. Оценка физико-химической эффективности минеральных добавок различного состава в цементных системах // Эксперт: теория и практика. — 2021. — № 5 (14). — С. 41–47.
- 5 Erofeev V., Karpushin S., Rodin A. et al. Physical and mechanical properties of the cement stone based on biocidal portland cement with active mineral additive // Solid State Phenomena. — 2016. — Т. 871. — P. 28–32.
- 6 Karpikov E. G., Lukutsova N. P., Bondarenko E. A. Effective highly dispersed additive for concretes on the basis of natural mineral raw materials // Materials Science Forum. — 2020. — Т. 992. — P. 168–172.
- 7 Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M. et al. Cement-based materials modified with nanoscale additives // Наука и техника. — 2021. — Т. 20. — № 3. — P. 189–194.
- 8 Rakhimbaev S. M., Logvinenko A. A., Logvinenko M. I. Mechanism of interaction between concrete cement matrix and mineral additive particles // Materials Science Forum. — 2020. — Т. 992. — P. 98–103.
- 9 Tukhareli V. D., Cherednichenko T. F., Pushkarskaya O. Y. New unconventional additives in concrete technology for expansion its functionality // Solid State Phenomena. — 2017. — Т. 265. — P. 231–236.
- 10 Дружинкин С. В., Немыкина Д. А., Краснова Е. А. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 2 (49). — С. 212.
- 11 Varabanshchikov Yu. G., Belyaeva S. V., Arkhipov I. E. et al. Influence of superplasticized on the concrete mix properties // Magazine of Civil Engineering. — 2017. — № 6 (74). — P. 140–146.
- 12 Kazanskaya L. Estimation of portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2021. — Т. 1259 AISC. — P. 650–660.
- 13 Smirnova O. M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers // Magazine of Civil Engineering. — 2021. — № 2 (102). — P. 10213.
- 14 Talipov L., Velichko E. Polymer additives for cement systems based on polycarboxylate ethers // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Т. 983. — P. 939–946.
- 15 Калашников В. И., Ерофеев В. Т., Тараканов О. В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. — 2016. — № 4 (688). — С. 30–37.
- 16 Калашников В. И., Тараканов О. В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. — 2017. — № 1–2. — С. 62–67.
- 17 Селяев В. П., Низина Т. А., Балбакин А. В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестн. Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. Ч. 2. Вып. 31 (50). — Волгоград, 2013. — С. 156–163.
- 18 Тараканов О. В., Калашников В. И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения // Изв. Казан. гос. арх.-строит. ун-та. — 2017. — № 1 (39). — С. 223–229.
- 19 Amini K., Ghasemi A., Soleimani Amiri S. et al. The synergic effects of metakaolin and polycarboxylate-ether on dispersion of graphene oxide in cementitious environments and macro-level properties of graphene oxide modified cement composites // Construction and Building Materials. — 2021. — Т. 270. — P. 121462.
- 20 Bulanov P. E., Ermilova E. U., Mavliev L. F. Structure and mineral composition of soil-cement with complex additive // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — № 7 (83). — P. 38–48.
- 21 Guvalov A. A., Abbasova S. I. Effect of complex modifiers on properties of cement systems // Kimya Problemleri. — 2020. — Т. 18. — № 1. — P. 26–32.
- 22 Nizina T. A., Balykov A. S., Korovkin D. I. Influence of polycarboxylate superplasticized and mineral additives of various nature on kinetics of early hardening stages of cement systems // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Т. 95. — P. 184–190.
- 23 Shakirov T., Muminova N. Development of properties of binders with the help of mineral and chemical additives // Modern Industrial and Civil Construction. — 2021. — Т. 17. — № 2. — P. 125–134.
- 24 Смирнов Д. С., Гараев Т. Р., Хамитов А. Р. Способы оптимизации составов бетонов // Вестн. Технол. ун-та. — 2017. — Т. 20. — № 2. — С. 65–67.
- 25 Куликова Е. С., Кривун Е. А. Основные мероприятия по снижению расхода вяжущего в условиях промышленного производства // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. — 2017. — № 1. — С. 294–295.
- 26 Ерышев В. А., Латышева Е. В., Малыш А. С. Определение эксплуатационных параметров качества железобетонных конструкций в составе здания без их физического разрушения путем натурных испытаний // Изв. Казан. гос. арх.-строит. ун-та. — 2015. — № 1 (31). — С. 75–79.
- 27 Радайкин О. В., Шарафутдинов Л. А. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. — 2020. — № 3. — С. 34–45.

**References**

- 1 Bazhenov Yu. M. Tekhnologiya betona. — M.: Izd-vo ASV, 2003. — 500 s.
- 2 Svishch I. S. Issledovanie nabora prochnosti vo vremeni v agressivnoj srede tyazhelogo betona s ispol'zovaniem sul'fatostojkogo cementa, krymskih zapolnitelej i dobavki na osnove efirov polikarboksilatov // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. — 2018. — № 13 (65). — S. 63–68.
- 3 Kim B. G., Jiang S., Jolicoeur C., Ai'tcin P. C. The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste // Cement and Concrete Research. — 2000. — Vol. 30. — № 6. — P. 887–893.
- 4 Nizina T. A., Balykov A. S., Korovkin D. I. i dr. Ocenka fiziko-himicheskoy effektivnosti mineral'nyh dobavok razlichnogo sostava v cementnyh sistemah // Ekspert: teoriya i praktika. — 2021. — № 5 (14). — S. 41–47.
- 5 Erofeev V., Karpushin S., Rodin A. et al. Physical and mechanical properties of the cement stone based on

- biocidal portland cement with active mineral additive // *Solid State Phenomena*. — 2016. — T. 871. — P. 28–32.
- 6 Karpikov E. G., Lukutsova N. P., Bondarenko E. A. Effective highly dispersed additive for concretes on the basis of natural mineral raw materials // *Materials Science Forum*. — 2020. — T. 992. — P. 168–172.
  - 7 Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M. et al. Cement-based materials modified with nanoscale additives // *Nauka i tekhnika*. — 2021. — T. 20. — № 3. — P. 189–194.
  - 8 Rakhimbaev S. M., Logvinenko A. A., Logvinenko M. I. Mechanism of interaction between concrete cement matrix and mineral additive particles // *Materials Science Forum*. — 2020. — T. 992. — P. 98–103.
  - 9 Tukhareli V. D., Cherednichenko T. F., Pushkarskaya O. Y. New unconventional additives in concrete technology for expansion its functionality // *Solid State Phenomena*. — 2017. — T. 265. — P. 231–236.
  - 10 Druzhinin S. V., Nemykina D. A., Krasnova E. A. Vliyanie superplastificiruyushchih dobavok na prochnost' betona // *Inzhenernyy vestnik Dona*. — 2018. — № 2 (49). — S. 212.
  - 11 Barabanshchikov Yu. G., Belyaeva S. V., Arkhipov I. E. et al. Influence of superplasticized on the concrete mix properties // *Magazine of Civil Engineering*. — 2017. — № 6 (74). — P. 140–146.
  - 12 Kazanskaya L. Estimation of portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2021. — T. 1259 AISC. — P. 650–660.
  - 13 Smirnova O. M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers // *Magazine of Civil Engineering*. — 2021. — № 2 (102). — P. 10213.
  - 14 Talipov L., Velichko E. Polymer additives for cement systems based on polycarboxylate ethers // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2019. — T. 983. — P. 939–946.
  - 15 Kalashnikov V. I., Erofeev V. T., Tarakanov O. V. Suspensionno-napolnennye betonnye smesi dlya poroshkovo-aktivirovannykh betonov novogo pokoleniya // *Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Stroitel'stvo*. — 2016. — № 4 (688). — S. 30–37.
  - 16 Kalashnikov V. I., Tarakanov O. V. O primeneni kompleksnykh dobavok v betonah novogo pokoleniya // *Stroitel'nye materialy*. — 2017. — № 1-2. — S. 62–67.
  - 17 Selyaev V. P., Nizina T. A., Balbalin A. V. Mnogofunkcional'nye modifikatory cementnykh kompozitov na osnove mineral'nykh dobavok i polikarboksilatnykh plastifikatorov // *Vestn. Volgograd. gos. arh.-stroit. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. Ch. 2. Vyp. 31 (50). — Volgograd, 2013. — S. 156–163.
  - 18 Tarakanov O. V., Kalashnikov V. I. Perspektivy primeneniya kompleksnykh dobavok v betonah novogo pokoleniya // *Izv. Kazan. gos. arh.-stroit. un-ta*. — 2017. — № 1 (39). — S. 223–229.
  - 19 Amini K., Ghasemi A., Soleimani Amiri S. et al. The synergic effects of metakaolin and polycarboxylate-ether on dispersion of graphene oxide in cementitious environments and macro-level properties of graphene oxide modified cement composites // *Construction and Building Materials*. — 2021. — T. 270. — P. 121462.
  - 20 Bulanov P. E., Ermilova E. U., Mavliev L. F. Structure and mineral composition of soil-cement with complex additive // *Magazine of Civil Engineering*. — 2018. — № 7 (83). — P. 38–48.
  - 21 Guvalov A. A., Abbasova S. I. Effect of complex modifiers on properties of cement systems // *Kimya Problemleri*. — 2020. — T. 18. — № 1. — P. 26–32.
  - 22 Nizina T. A., Balykov A. S., Korovkin D. I. Influence of polycarboxylate superplasticized and mineral additives of various nature on kinetics of early hardening stages of cement systems // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2021. — T. 95. — P. 184–190.
  - 23 Shakirov T., Muminova N. Development of properties of binders with the help of mineral and chemical additives // *Modern Industrial and Civil Construction*. — 2021. — T. 17. — № 2. — P. 125–134.
  - 24 Smirnov D. S., Garaev T. R., Hamitov A. R. Sposoby optimizatsii sostavov betonov // *Vestn. Tekhnol. un-ta*. — 2017. — T. 20. — № 2. — S. 65–67.
  - 25 Kulikova E. S., Krivun E. A. Osnovnye meropriyatiya po snizheniyu raskhoda vyazhushchego v usloviyah promyshlennogo proizvodstva // *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. — 2017. — № 1. — S. 294–295.
  - 26 Eryshev V. A., Latysheva E. V., Malyshev A. S. Opredelenie ekspluatatsionnykh parametrov kachestva zhelezobetonnykh konstrukcij v sostave zdaniya bez ih fizicheskogo razrusheniya putem naturnykh ispytaniy // *Izv. Kazan. gos. arh.-stroit. un-ta*. — 2015. — № 1 (31). — S. 75–79.
  - 27 Radajkin O. V., Sharafutdinov L. A. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok, usilennykh stalefibrobetonnoj rubashkoj // *Vestn. Belgorod. gos. tekhnol. un-ta im. V. G. Shuhova*. — 2020. — № 3. — S. 34–45.

Статья поступила в редакцию 10.01.2022.

Опубликована 30.03.2022.

#### **Dmitry Toshin**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Togliatti State University (TSU), Institute of Architecture and Construction, Center for Architectural, Structural Solutions and Construction Organization, Togliatti, Russian Federation  
e-mail: d.toshin@tltstu.ru