

ОСОБЕННОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА УСКОРЕННОЙ КАРБОНИЗАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

На сегодняшний день современная строительная индустрия предлагает широкий спектр бетона и изделий из него, которые имеют существенные различия, в том числе в условиях эксплуатации, что в значительной степени обуславливает необходимость применения специальных бетонов. Регулируя состав и формирование структуры бетона, особенно на ранних этапах твердения можно добиться комплексного повышения эксплуатационных характеристик, в том числе повышение прочности, морозостойкости и снижения усадочных деформаций.

В данной работе рассмотрены основные понятия карбонизации бетона, а также особенности и перспективы применения метода ускоренной карбонизации свежешулюженной бетонной смеси. Данная технология позволяет ускорять набор прочности бетона, а также получать изделия с лучшими эксплуатационными характеристиками и показателями долговечности.

Рассмотрены особенности влияния комплексных добавок, включающих метакаолин и микрокремнезем на процесс ранней карбонизации. Кроме того представлено влияние ранней карбонизации контрольного состава и модифицированного бетона на набор прочности, морозостойкость и усадочные деформации.

Поскольку метакаолин является дисперсной добавкой его необходимо вводить совместно с суперпластификатором, для регулирования воды затворения и формирования более плотной структуры цементного камня. Кроме того, необходимо строго контролировать дозировку метакаолина, для направленного фазообразования бетона и более полного связывания свободной окиси кальция. В работе рассмотрены три варианта добавок, включающие метакаолин, микрокремнезем и суперпластификатор.

Установлено, что применение ранней карбонизации бетона и связывание легкорастворимых соединений в нерастворимые на ранних стадиях гидратации приведет к повышению стойкости бетона к агрессивному воздействию внешней среды при дополнительном введении в комплекс микрокремнезема. Применение данной технологии позволит сократить температуру тепловлажностной обработки бетона и снизить затраты на производство бетонных изделий.

После камеры карбонизации бетон, модифицированный только метакаолином не показал повышение марки по морозостойкости, что обусловлено высокой пуццолановой активностью добавки и изменением структуры камня.

Ключевые слова: бетон, активные минеральные добавки, суперпластификатор, ускоренная карбонизация.

THE USE OF ACCELERATED CARBONATION IN CONCRETE TECHNOLOGY

Today, the modern construction industry offers a wide range of concrete and concrete products, which have significant differences, including in operating conditions, which largely determines the need for the use of special concretes. By regulating the composition

and structure of concrete, especially in the early stages of curing, it is possible to achieve a comprehensive increase in performance characteristics, including increased strength, frost resistance and reduced shrinkage deformations.

This paper considers the basic concepts of concrete carbonation, as well as the features and prospects of application of the method of accelerated carbonation of freshly placed concrete mix. This technology makes it possible to accelerate the concrete strength gain, as well as to obtain products with better performance and durability characteristics.

The peculiarities of influence of complex additives including metakaolin and microsilica on the process of early carbonisation are considered. In addition, the influence of early carbonisation of control and modified concrete on strength gain, frost resistance and shrinkage deformations is presented.

Since metakaolin is a dispersed admixture, it should be introduced with superplasticiser to regulate the mixing water and form a dense cement stone structure. In addition, it is necessary to strictly control the dosage of metakaolin, for the directional phase formation of concrete and more complete binding of free calcium oxide. Three variants of additives including metakaolin, microsilica and superplasticiser are considered in the paper.

It is established that application of early carbonisation of concrete and binding of easily soluble compounds into insoluble ones at early stages of hydration will lead to increase of concrete resistance to aggressive influence of external environment at additional introduction of microsilica into the complex. Application of this technology will reduce the temperature of heat and humidity treatment of concrete and reduce the cost of production of concrete products.

After the carbonisation chamber, concrete modified only with metakaolin did not show an increase in frost resistance grade, which is due to the high pozzolanic activity of the admixture and the change in the structure of the stone.

Keywords: *concrete, active mineral additives, plasticiser, accelerated carbonization.*

Современные тенденции строительной индустрии направлены на повышение темпа производства, в связи с чем, остро стоит вопрос о создании эффективных методик, направленных на ускорение кинетики твердения бетона, увеличение марочной прочности и долговечности бетона. Кроме этого, в современном обществе с каждым годом в атмосфере увеличивается концентрация углекислого газа, что является одной из важнейших экологических проблем. По этой причине существует необходимость сбора дымовых газов при помощи специальных установок, способных их адсорбировать и аккумулировать, снижая тем самым уровень загрязнения атмосферы и подвергая его утилизации. Полученная таким образом углекислота, как отход производства, может быть применена в технологии производства бетонных изделий, а именно в методике ускоренной карбонизации [1-3].

Понятие карбонизации бетона связано прежде всего с кислотным типом коррозии. Поскольку бетон эксплуатируется в воздушной среде, имеющей определенную концентрацию углекислого газа. Углекислый газ в присутствии влаги вступает во взаимодействие с клинкерными минералами и продук-

тами гидратации цемента, с образованием карбоната кальция. Карбонат кальция нерастворим в воде, в результате чего происходит его постепенное отложение в поровом пространстве цементного камня. На ранних стадиях карбонизация играет положительную роль, приводя к некоторому уплотнению структуры бетона и связывая растворимые соединения в нерастворимые. Однако, когда карбонизация доходит до глубоких слоев бетона контактирующих с арматурой, изменение pH среды приводит к коррозии металла и процессам перекристаллизации гидратных фаз. Также постепенное накопление карбонатов в поровом пространстве приводит к появлению внутренних деформаций и разрушению структуры бетона [3-6].

Данный процесс деструкции характерен для эксплуатируемых бетонных изделий и конструкций. Искусственная ранняя карбонизация происходит совместно с ранней гидратацией цемента через намеренную выдержку свежееуложенной бетонной смеси в среде, насыщенной CO_2 [5].

Основные клинкерные минералы цемента и портландит гидратируют в присутствии углекислого газа и воды с образованием гидросиликатов кальция и карбоната кальция.

Весь процесс ранней карбонизации бетона включает: диффузию углекислого газа от поверхности в глубь бетона через открытое поровое пространство (макропоры, капиллярные поры); сольватацию газа в углекислотную жидкость в жидкой фазе свежееуженной бетонной смеси [5]; процесс гидратации углекислотной жидкости до образования H_2CO_3 ; процесс ионизации H_2CO_3 на H^+ , HCO_3^{2-} , CO_3^{2-} ; растворение C_3S и $\beta-C_2S$, зерна силикатов кальция покрываются неплотными слоями геля гидросиликатов кальция, которые быстро растворяются, высвобождая ионы Ca^{2+} и SiO_4^{4-} [6]; нуклеация $CaCO_3$ и гидросиликатного геля CSH ; осаждение и накопление карбоната кальция, формирование высокополимеризованного геля кремнезема. Этот гель кислотоустойчив и имеет ту же структуру, что и обычный диоксид кремния [6].

Процесс ускоренной ранней карбонизации несколько снижает значение pH бетона, что является отрицательным фактором. Однако, в более поздние сроки гидратации цемента будет происходить дальнейшее формирование гидроксида кальция и значение pH постепенно будет выравниваться. Кроме того данную проблему можно решить введением минеральных добавок, повышающих pH жидкой фазы бетона [3, 4].

К активным минеральным добавкам, повышающим pH жидкой фазы цементного камня в бетоне относят кислые добавки, связывающие гидроокись кальция в нерастворимые соединения. Однако следует тщательно подбирать дозировку таких добавок, поскольку их применение способствует формированию структуры цементного камня бетона преимущественно из низкоосновных соединений и может привести к некоторому сдвигу сроков твердения бетона, за счет снижения экзотермии цемента и появлению кислотной коррозии арматуры. При этом низкоосновные гидросиликаты кальция в структуре цементного камня обладают повышенной механической прочностью и долговечностью под влиянием различных агрессивных сред [7-22].

Кислые активные минеральные добавки бывают природного и техногенного характера. К природным активным минеральным добавкам относят пуццоланы различного происхождения (диатомит, трепел, опока, пемза, туф, пепел и т.д.), а среди добавок техногенного характера наиболее распространены микрокремнезем, метакаолин, гранулированные доменные шлаки, зола-унос [10-12, 23-25].

В данной работе использовали метакаолин (МТК), производства ЗАО «Пласт-Рифей», гранулированный микрокремнезем (далее МК) г. Новокузнецк, суперпластификатор СП-1 производства ОАО «Полипласт» г. Новомосковск, цемент Цем I 42,5Н ОАО «Невьянский цементник», а также заполнители - песок с Мк 1,8 Белоносовского месторождения и щебень фракции 5-20 мм, производства завода ПКО «ЧелСИ». Состав бетона – цемент 350кг/м³, песок 750 кг/м³, щебень 1050 кг/м³, водоцементное отношение 0,35.

Для испытаний были подготовлены 4 состава бетона, отличающихся применяемыми добавками: 1) бездобавочный (контрольный состав); 2) с добавкой 5 % МТК; 3) с добавкой «2,5 % МТК + 0,6 % СП-1»; 4) с «2,5 % МТК + 5 % МК + 0,6 % СП-1». Оценивали прочность образцов за два часа в камере карбонизации и в естественных условиях, усадку на третьи сутки твердения и морозостойкость образцов после 28 суток нормального твердения. Результаты эксперимента представлены в таблице 1. Испытания цементного камня на усадку проводили с помощью прибора *Schwindmessgerat Typ B, Testing*, Германия.

Контрольный состав после выдержки в камере ускоренной карбонизации показал увеличение прочности и некоторое уплотнение структуры на раннем этапе твердения камня, что объясняет снижение деформации на 3 сутки и повышение марки морозостойкости.

Согласно полученным данным, введение добавки метакаолина приводит к некоторому снижению плотности структуры цементного камня бетона, за счет формирования среды, состоящей преимущественно из высокоосновных гидратных фаз, имеющих как правило гексагональную структуру. Кроме того, метакаолин являясь пуццолановой добавкой связывает свободный кальций на ранних этапах твердения цементного камня в нерастворимые соединения, в том числе карбоната кальция, при этом позднее метастабильные фазовые структуры сформированные при большой дозировке добавки подвергаются процессам перекристаллизации. Изменение структуры объясняет некоторое увеличение усадки и снижение прочности камня.

Введение меньшего количества метакаолина совместно с суперпластификатором позволяет на ранних этапах фазообразования формировать более плотную структуру цементного камня, включающую низкоосновные гидросиликаты кальция, более стабильные в агрессивных средах. Изменение

Таблица 1

№	Составы	Свойства					
		Прочность, МПа		Деформация усадки, мм/м (3 суток твердения)		Морозостойкость	
		за 2 часа в камере карбонизации, МПа	в естественных условиях на 3 суток, МПа	после карбонизации	в естественных условиях	после карбонизации	в естественных условиях
1	Контрольный состав	20	15	6	8	F ₁ 300	F ₁ 200
2	5%МТК	35	40	3,7	3,5	F ₁ 300	F ₁ 300
3	2,5%МТ-К+0,6%СП-1	30	32	1,0	1,2	F ₁ 600	F ₁ 600
4	2,5%МТ-К+5%МК+0,6%СП-1	32	35	2,0	2,5	F ₂ 300	F ₁ 800

структуры приводит к повышению прочности и морозостойкости и снижению деформационной усадки бетона.

При этом введение комплекса “2,5%МТ-К+0,6%СП-1” и “2,5%МТК+5% МК+0,6%СП-1” приводит к некоторому снижению прочности бетона при использовании ранней карбонизации, что обусловлено созданием дефицита кальция в присутствии пуццолановых добавок. Однако данное явление нивелируется в более поздние сроки твердения.

По полученным данным можно сделать вывод о положительном влиянии ранней карбонизации на уплотнение структуры и повышении ранней прочности бетона, особенно в присутствии кислых пуццолановых добавок, которые так же в свою очередь позволят повысить стойкость к коррозии бетона.

Для проведения искусственной карбонизации бетона существует ряд технологических требований, так, например, бетонные смеси для этой методики должны применяться с водоцементным отношением, находящимся в пределах от 0,1 до 0,25. Это объясняется тем, что при низком В/Ц углекислота не сможет раствориться в порах бетона, в то время как при высоком В/Ц реакция не происходит, так как углекислый газ не диффундирует вглубь тела бетона [23-25].

Перед отправкой в камеру карбонизации изделия должны быть предварительно выдержаны, чтобы началась гидратация цементных фаз, и только после этого они проходят обработку углекислотой. Карбонизация в камерах может происходить как по объему, так и по поверхности и зависит от

способа формирования конкретного изделия [23-25].

Должно быть обеспечено избыточное давление углекислого газа в камере – выше 3 атм. И чем выше давление, тем быстрее и более равномерно будет происходить реакция карбонизации бетона. Необходимо обеспечить температуру в камере (от 25 до 40 °С). Повышение температуры более 40°С приведет к снижению растворимости углекислого газа в воде [23-25].

Относительная влажность в камере должна быть 50-70%, при таком показателе достигается максимальная глубина карбонизации бетона [23-25]. Сроки выдержки бетона устанавливаются исходя из желаемой глубины карбонизации, чем дольше время, при котором выдерживается материал, тем больше глубина карбонизации и выше прочностные характеристики изделия [23-25].

Реакция карбонизации – это экзотермический процесс, с величиной тепловыделения для трехкальциевого силиката - 347 кДж/моль, для двухкальциевого силиката – 184 кДж/моль и для гидроксида кальция – 74 кДж/моль [24, 25]. Следовательно, это может послужить косвенной положительной характеристикой и привести к некоторому снижению температуры автоклавной обработки бетона.

Заключение

Очевидно, что применение ранней карбонизации бетона и связывание легкорастворимых соединений в нерастворимые на ранних стадиях гидратации приведет к повышению стойкости бетона к агрессивному

воздействию внешней среды при дополнительном введении подкисляющих добавок. После камеры карбонизации бетон, модифицированный только метаксаолином не показал повышение марки по морозостойкости, что связано с изменением структуры цементного камня.

Кроме этого, применение данной технологии позволит сократить температуру тепловлажностной обработки бетона, значительно снизить затраты на производство и утилизировать углекислый газ, что повлияет на улучшение экологической обстановки.

Литература

1. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов: учебник для вузов [Текст] / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 470 с.
2. Uliasz-Bochenczyk, A. Waste used for CO₂ via mineral carbonation / A. Uliasz-Bochenczyk // Mineral and energy economy research of institute of Polish Academy of Science, Krakow, Poland, 2007. – 8p.
3. Рузавин, А.А. Применение метода ускоренной карбонизации в технологии бетонного производства [Текст] / А.А. Рузавин // Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура», 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 72–75.
4. Sean Monkman Maximizing carbon uptake and performance gain inslag-containing concretes through early carbonation. – PhD thesis; Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University, Montreal, Canada, 2008. – 222 p.
5. Carbonation of minerals and industrial by products for CO₂ sequestration / S. Teir, S. Eloneva, C.-J. Fogelholm, R. Zevenhoven // Paper VI; The Third International Green Energy Conferene, Västerås, Sweden, 2007. – 11 p.
6. A review of accelerated carbonation technology in treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂ / M. Fenandez Bertos, S.J.R. Simons, C.D. Hills, P.J. Carey // Journal of hazardous materials, UK, 2004. – 13 p.
7. Aitcin, P.C. High-Performance Concrete / P.C Aitcin. – Quebec: E & Fn Spon, 1998. – 364 p.
8. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива [Текст] / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон, 1999. – № 4. – С. 6–10.
9. Shuldyakov, K. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance / K. Shuldyakov, L. Kramar, B. Trofimov, I. Ivanov // Advanced materials in technology and construction (AMTC-2015), 2016. – P. 070011-1–070011-6.
10. Шульдяков, К.В. Особенности влияния пластификатора на структуру цементного камня и свойства бетона [Текст] / К.В. Шульдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, И.М. Иванов // Перспективные материалы в технике и строительстве: материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием (ПМТС 2015) – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – С. 423–426.
11. Методы исследования цементного камня и бетона [Текст] / под ред. З.М. Ларионовой. – М.: НИИЖБ, Стройиздат, 1970. – 159 с.
12. Умемура, И. Влияние микрокремнезема и суперпластификатора на гидратацию цемента при низком водоцементном отношении [Текст] / И. Умемура, М. Сату, К. Коизуми, Н. Цуюки // Цемент и его применение, 2013. – № 4. – С. 134–138.
13. Тейлор, Х. Химия цемента [Текст] / Хел Тейлор; пер. с англ. – СПб.: Мир, 1996. – 560 с.
14. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с.
15. Комплексные пластифицирующие ускоряющие добавки на основе суперпластификатора С-3 и промышленных смесей тиосульфата и роданита натрия [Текст] / Н.Ф. Башлыков, А.Я. Вайнер, Р.Л. Серых, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон, 2004. – № 6. – С. 13–16.
16. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст] / В.Г. Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
17. Малолепши, Я. Влияние метаксаолина на свойства цементных растворов [Текст] / Я. Малолепши, З. Питель // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 61–77.

18. Метакаолин в строительных растворах и бетонах [Текст] / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Изд-во КНУБА, 2007. – 215 с.
19. Heikal, M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes / M. Heikal // *Cement and Concrete Research*, 2004. – №34. – P. 1051–1056.
20. Кузнецова, Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы [Текст] / Т.В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.
21. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки нового поколения [Текст] / А.В. Ушеров-Маршак // *Химические и минеральные добавки в бетон*. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 45–50.
22. Кузнецова, Т.В., Глиноземистый цемент [Текст] / Т.В. Кузнецова, Й. Талабер. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
23. Monkman, S. Types of concrete carbonation. Technical note / S. Monkman. – Carbon Cure Technologies Inc, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, 2016. – 4 p. 7. L. De Ceukelaire, D. Van Nieuwenburg. Accelerated carbonation of blast-furnace cement concrete // *Cement and concrete research*, USA, 1992. – 11 p.
24. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение [Текст] / И. А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
25. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон: учеб. пособие для строит. вузов [Текст] / О.Я. Берг. – М.: Высшая школа, 1971. – 214 с.

References

1. Butt, Yu.M. Chemical technology of binding materials: textbook for universities [Text] / Yu.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – Moscow: Higher School, 1980. – 470 с.
2. Uliasz-Bochenczyk, A. Waste used for CO₂ via mineral carbonation / A. Uliasz-Bochenczyk. Uliasz-Bochenczyk // *Mineral and energy economy research of institute of Polish Academy of Science, Krakow, Poland*, 2007. – 8p.
3. Ruzavin, A.A. Application of the accelerated carbonisation method in the concrete production technology [Text] / A.A. Ruzavin // *Vestnik of SUSU. Series Construction and architecture*, 2017. – T. 17. – № 3. – С. 72-75.
4. Sean Monkman. - Maximizing carbon uptake and performance gain inslag-containing concretes through early carbonation. - PhD thesis; Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University, Montreal, Canada, 2008. – 222 p.
5. Carbonation of minerals and industrial by products for CO₂ sequestration / S. Teir, S. Eloneva. Teir, S. Eloneva, C-J. Fogelholm, R. Zevenhoven // *Paper VI; The Third International Green Energy Conferene, Västerås, Sweden*, 2007. – 11 p.
6. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂ / M. Fenandez Bertos, S.J.R. Simons, C.D. Hills, P.J. Carey // *Journal of hazardous materials*, UK, 2004. – 13 p.
7. Aitcin, P.C. High-Performance Concrete / P.C Aitcin. – Quebec: E & Fn Spon, 1998. – 364 p.
8. Kaprielov, S.S. Modified concretes of new generation: reality and prospect [Text] / S.S. Kaprielov, V.G. Batrakov, A.V. Sheinfeld // *Concrete and Reinforced Concrete*, 1999. – № 4. – С. 6-10.
9. Shuldyakov, K. Superplasticiser effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance / K. Shuldyakov, L. Kramar, B. Trofimov, I. Ivanov // *Advanced materials in technology and construction (AMTC-2015)*, 2016. – P. 070011-1-070011-6.
10. Shuldyakov, K.V. Peculiarities of plasticiser influence on cement stone structure and concrete properties [Text] / K.V. Shuldyakov, L.Y. Kramar, B.Y. Trofimov, I.M. Ivanov // *Advanced materials in technology and construction: materials of the II All-Russian scientific conference of young scientists with international participation (PMTС 2015) – Tomsk: Izd-e Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2015. – С. 423-426.
11. Methods of research of cement stone and concrete [Text] / edited by Z.M. Larionova. - Moscow: NIIZHВ, Stroyizdat, 1970. – 159 с.
12. Umemura, I. Effect of microsilica and superplasticiser on cement hydration at low water-cement ratio [Text] / I. Umemura, M. Satu, K. Koizumi, N. Tsuyuki // *Cement and its application*, 2013. – № 4. – С. 134-138.

13. Taylor, H. Chemistry of cement [Text] / Hel Taylor; per. from Engl. – SPb.: Mir, 1996. – 560 с.
14. Ratinov, V.B. Additives in concrete [Text] / V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg. – Moscow: Stroyizdat, 1989. – 187 с.
15. Complex plasticising and accelerating additives based on superplasticiser C-3 and industrial mixtures of sodium thiosulphate and rhodanite [Text] / N.F. Bashlykov, A.Ya. Vainer, R.L. Serikh, V.R. Falikman // Concrete and Reinforced Concrete. – 2004. – № 6. – С. 13-16.
16. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice [Text] / V.G. Batrakov. – Moscow: Tekhnoproekt, 1998. – 768 с.
17. Malolepshy, J. Influence of metakaolin on properties of cement mortars [Text] / J. Malolepshy, Z. Pitel // Chemical and mineral additives in concrete. – Kharkov: Kolorit, 2005. – С. 61-77.
18. Metakaolin in building mortars and concretes [Text] / L.I. Dvorkin, N.V. Lushnikova, R.F. Runova et al. Runova et al. – Kiev: Izd vo KNUBIA, 2007. – 215 с.
19. Heikal, M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes / M. Heikal. Heikal // Cement and Concrete Research. – 2004. – №34. – P. 1051-1056.
20. Kuznetsova, T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements [Text] / T.V. Kuznetsova. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 208 с.
21. Usherov-Marshak, A.V. Additives of a new generation [Text] / A.V. Usherov-Marshak // Chemical and mineral additives in concrete. – Kharkov: Kolorit, 2005. – С. 45-50.
22. Kuznetsova, T.V., Alumina cement [Text] / T.V. Kuznetsova, J. Talaber. – Moscow: Stroyizdat, 1988. – 272 с.
23. Monkman, S. Types of concrete carbonation. Technical note / S. Monkman. – Carbon Cure Technologies Inc, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, 2016. – 4 p. – 7. L. De Ceukelaire, D. Van Nieuwenburg. Accelerated carbonation of blast-furnace cement concrete // Cement and concrete research, USA. – 1992. – 11 p.
24. Rybiev, I. A. Construction Material Science [Text] / I. A. Rybiev. – Moscow: Vyshaya Shkola, 2002. – 701 с.
25. Berg, O.Ya. High-strength concrete: textbook for Stroitel. Universities [Text] / O.Y. Berg. – Moscow: Higher School, 1971. – 214 с.

Мясникова А.А.

К.т.н., доцент кафедры Архитектура, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: aakirsanova@susu.ru

Myasnikova A.A.

Ph.D., as. professor of the Department of Architecture, South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: aakirsanova@susu.ru

Поступила в редакцию 07.10.2024