



DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58



Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати

Мухаметрахимов Р.Х.* ¹ 

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия

**Ответственный автор E-mail: muhametrahimov@mail.ru*

Аннотация: в работе изучены особенности применения пластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата в технологии аддитивного строительного производства (3D-печати). Послойную экструзию осуществляли на 3D-принтере «АМТ S-6044». Исследованы нормальная плотность и сроки схватывания цементного теста, средняя плотность, пластическая прочность и формоустойчивость бетонной смеси, пределы прочности бетона на сжатие и при изгибе. Показано, что пластифицирующие добавки на основе эфиров поликарбоксилатов в рассмотренных концентрациях являются эффективными модификаторами реотехнологических и физико-механических свойств цементных бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати. Наибольшее увеличение прочности на сжатие и при изгибе при введении исследуемых поликарбоксилатных пластификаторов наблюдается на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н: введение 0,5% «MasterGlenium 430» приводит к увеличению прочности при сжатии и изгибе на 49,3% и 31,6%; при введении «MasterGlenium 115» – на 21,6% и 35%; при введении «MasterGlenium 591» – на 49,8% и 41,7% соответственно. Интерес для дальнейших исследований представляет разработка комплексных органо-минеральных добавок полифункционального действия на основе поликарбоксилатных ПД для бетонов, формируемых методом аддитивного производства (3D-печати).

Ключевые слова: цемент, бетон, пластифицирующая добавка, 3D-печать, аддитивное производство, 3DCP

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати // Строительные материалы и изделия. 2022. Том 5. № 5. С. 42 – 58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58

Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D printing

Mukhametrakhimov R.Kh.*¹ 

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

*Corresponding author E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Abstract: the article studies the features of the use of plasticizing additives based on polycarboxylate ether in the technology of additive construction production (3D printing). Layer-by-layer extrusion was carried out on an AMT S-6044 3D printer. The normal density and setting time of the cement paste, the average density, plastic strength and dimensional stability of the concrete mixture, the compressive strength and flexural strength of concrete were studied. It is shown that plasticizing additives based on polycarboxylate esters in the considered concentrations are effective modifiers of rheotechnological and physical and mechanical properties of cement concrete mixtures used in 3D printing technology. The greatest increase in compressive and flexural strength with the introduction of the studied polycarboxylate plasticizers is observed at PC CEM I 42.5N: the introduction of 0.5% "MasterGlenium 430" leads to an increase in compressive and flexural strength by 49.3% and 31.6%; with the introduction of "MasterGlenium 115" – by 21.6% and 35%; with the introduction of "MasterGlenium 591" – by 49.8% and 41.7%, respectively. Of interest for further research is the development of complex organo-mineral additives of multifunctional action based on polycarboxylate plasticizers for concretes molded by additive manufacturing (3D printing).

Keywords: cement, concrete, plasticizing additive, 3D printing, additive manufacturing, 3DCP.

Please cite this article as: Mukhametrakhimov R.Kh. Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D printing. Construction Materials and Products. 2022. 5 (5). P. 42 – 58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58

ВВЕДЕНИЕ

Послойная экструзия растворных и бетонных смесей в технологии аддитивного производства определяет особые требования к их реологическим и технологическим свойствам, которые должны обеспечить перекачиваемость, бездефектную укладку, формоустойчивость, отсутствие дефектов в процессе и после твердения, требуемые эксплуатационные свойства затвердевшего композита и др. [1]. Учитывая особенности традиционно применяемых мелкозернистых бетонных смесей в виде повышенного расхода портландцемента, относительно высоких усадочных деформаций связанных с повышенным В/Ц отношением приводящим к образованию трещин [2-7], а также склонностью возникновения холодных швов [8-10] при существенных технологических перерывах при послойной экструзии слоев, и других дефектов, например, в виде невысокой связности смесей нарушающих геометрию формуемого изделия [11-16], очевидна необходимость исследования влияния добавок для бетонов и растворов применяемых в технологии 3D-печати.

Отсутствие процесса виброуплотнения смеси после ее печати обуславливает необходимость формирования относительно плотной и однородной структуры, а также устранения многих отмеченных выше недостатков за счет регулирования рецептуры, например, применения активных минеральных [17,18], пластифицирующих [19-22], органоминеральных добавок [23-25], нано-модификаторов [26-28], промышленных отходов [29-33], дисперсного армирования [34-43], активации смесей [44-47] и др.

Эффективность работы ПД зависит от многих факторов – вида портландцемента [48], требуемой подвижности в бетонных и растворных смесей для их формирования [49], условий твердения и др. [50], что необходимо учитывать при выборе добавок в технологии 3D-печати.

В работах [51, 52] показано, что исследуемые ПД на основе поверхностно-активных натриевых солей и лигносульфонатов не являются эффективными модификаторами реотехнологических и физико-механических свойств цементных бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати. Последние приводят к ускорению сроков начала, конца схватывания и набора пластической прочности. Однако данные ПД могут быть весьма эффективными в качестве компонентов комплексных органоминеральных добавок, обладающих синергетическим воздействием на реологические, технологические и физико-технические свойства бетонов.

Эффективность пластификаторов на поликарбоксилатной основе зависит от частоты прививки боковых цепей [53]. В технологии аддитивного производства значительный интерес представляет исследование эффективности различных видов поликарбоксилатных ПД в бетонах на портландцементе с различным минералогическим составом.

Цель работы – изучить влияние пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати.

Объект исследований: цементное тесто (ЦТ), бетонные смеси и бетоны, применяемые в технологии аддитивного строительного производства (3D-печати).

Предмет исследований: водопотребность и сроки схватывания, средняя плотность, пластическая прочность и формоустойчивость бетонной смеси, пределы прочности на сжатие и при изгибе бетона.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования выполнены в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Аддитивное производство образцов из бетона осуществляли методом экструзии материала на отечественном цеховом порталном строительном 3D-принтере марки «АМТ S-6044» производства ООО «СПЕЦАВИА», г. Ярославль (рис. 1).



Рис. 1. Строительный 3D-принтер марки «АМТ S-6044» в лаборатории аддитивных технологий строительного производства КГАСУ

Fig. 1. Construction 3D printer of the brand "AMT S-6044" in the laboratory of additive technologies of construction production of KSUAE

Для приготовления бетонной смеси применяли следующие исходные компоненты:

- а) вяжущее – портландцементы с различным минералогическим составом: ЦЕМ I 42,5 Н и ЦЕМ II/В-П 32,5 Н по ГОСТ 31108-2016;
- б) мелкий заполнитель – кварцевый песок по ГОСТ 8736-2014;
- в) пластифицирующие добавки: «MasterGlenium ACE 430», производства ООО «BASF Строительные системы» представляющую собой жидкость оранжевого или светло-коричневого

цвета, плотностью при 20 °С 1,06 г/см³, водородным показателем 3,5-7,5 рН, химическая основа – эфир поликарбоксилата; «MasterGlenium 115», производства ООО «BASF Строительные системы» представляющую собой жидкость светло-желтого цвета, плотностью при 20 °С 1,07 г/см³, водородным показателем 5,5-7,5 рН, химическая основа – эфир поликарбоксилата; «MasterGlenium SKY 591» производства ООО «BASF Строительные системы» представляющую собой жидкость коричневого цвета, плотностью при 20 °С 1,08 г/см³, водородным показателем 5-9 рН, химическая основа – эфир поликарбоксилата;

г) вода водопроницаемая, соответствующая ГОСТ 23732-2011.

Приготовление бетонной смеси осуществляли в гравитационном бетоносмесителе, перемешивание компонентов производили до достижения однородной массы в течение 10 минут.

Пластическую прочность исходных и модифицированных цементных композиций производили при помощи пенетрометра согласно ASTM C403 – Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance (рис. 2).



Рис. 2. Определение кинетики набора прочности пенетрометрическим методом
Fig. 2. Determination of the kinetics of strength gain by the penetrometric method

Предельное напряжение сдвига бетонных смесей на границе гравитационной растекаемости определяли с применением вискозиметра по методике [54].

Формоустойчивость определяли по количеству слоев, которые можно напечатать без технологических перерывов исключая существенные деформации и разрушение.

Твердение исследуемых образцов осуществлялось при относительной влажности воздуха (50±20)%, температуре (20±2) °С в течение 28 суток. Среднюю плотность бетонов определяли по ГОСТ 12730.1-78, прочность – по ГОСТ 5802-86 и ГОСТ 10180-2012.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На первом этапе исследовано влияние поликарбоксилатных ПД на нормальную плотность (НГ) и сроки схватывания портландцемента (табл. 1). Установлено, что все исследуемые ПД приводят к снижению нормальной плотности ЦТ. Наиболее эффективными из числа рассматриваемых являются ПД «MasterGlenium 115» и «MasterGlenium 430», которые в зависимости от концентрации (0,5-2 %) снижают НГ ЦЕМ I 42,5Н на 5,25–10,6% и 4,5–11,37 соответственно; НГ ЦЕМ II/В-П 32,5Н – на 0–10,75% и 0,37–13,94% соответственно.

Установлено, что на ПЦ ЦЕМ II/В-П 32,5Н исследуемые ПД приводят преимущественно к замедлению сроков схватывания ЦТ, что связано повышенной водопотребностью ПЦ с минеральными добавками. При этом на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н ПД «MasterGlenium 115» и «MasterGlenium 591» приводят к существенному ускорению сроков схватывания. К незначительному ускоре-

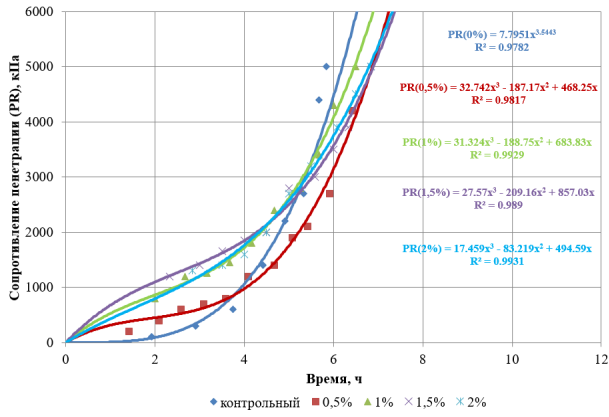
нию начала и конца схватывания ЦТ (на 10 мин) приводит использование ПД «MasterGlenium 430» в количестве 0,5% от массы вяжущего. При этом ее введение в количестве 1,0-2,0% способствует замедлению начала (на 26-82 мин) и конца (84-91 мин) схватывания ЦТ.

Таблица 1. Влияние ПД на нормальную густоту и сроки схватывания портландцемента: над чертой – ЦЕМ I 42,5Н, под чертой – ЦЕМ II/В-П 32,5Н

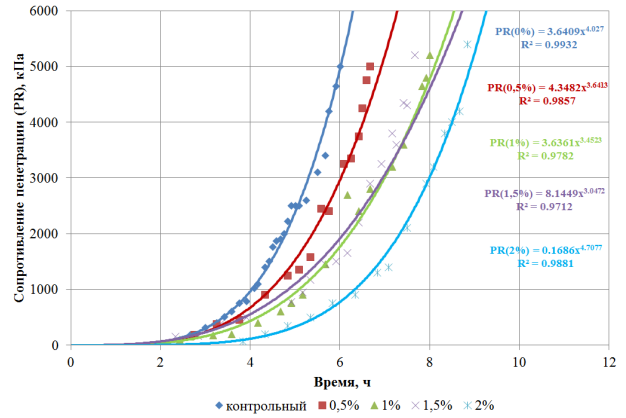
Table 1. The effect of plasticizers on the normal density and setting time of Portland cement: above the line – CEM I 42.5N, below the line – CEM II / V-P 32.5N

Вид ПД	Содержание ПД, % от массы вяжущего	Сроки схватывания, мин		В/Ц для НГ
		начало	конец	
-	-	<u>231 мин</u>	<u>266 мин</u>	<u>0,3200</u>
		218 мин	338 мин	0,4050
MasterGlenium 430	0,5	<u>221 мин</u>	<u>256 мин</u>	<u>0,2675</u>
		262 мин	345 мин	0,4050
	1,0	<u>300 мин</u>	<u>350 мин</u>	<u>0,2396</u>
		285 мин	382 мин	0,3775
1,5	<u>313 мин</u>	<u>353 мин</u>	<u>0,2290</u>	
	330 мин	405 мин	0,3275	
MasterGlenium 115	0,5	<u>9 мин</u>	<u>21 мин</u>	<u>0,2750</u>
		265 мин	310 мин	0,4013
	1,0	<u>22 мин</u>	<u>89 мин</u>	<u>0,2425</u>
		228 мин	274 мин	0,3688
1,5	<u>38 мин</u>	<u>132 мин</u>	<u>0,2200</u>	
	255 мин	315 мин	0,3275	
MasterGlenium 591	0,5	<u>42 мин</u>	<u>377 мин</u>	<u>0,3075</u>
		280 мин	335 мин	0,3960
	1,0	<u>72 мин</u>	<u>213 мин</u>	<u>0,2650</u>
		285 мин	325 мин	0,3690
1,5	<u>89 мин</u>	<u>248 мин</u>	<u>0,2490</u>	
	290 мин	330 мин	0,3350	
2,0	<u>15 мин</u>	<u>25 мин</u>	<u>0,2363</u>	
	325 мин	370 мин	0,3088	

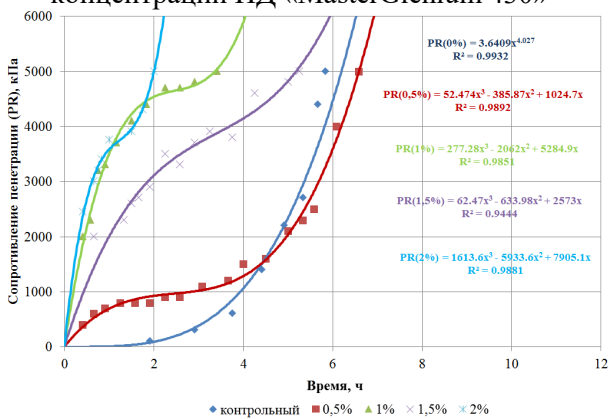
На втором этапе с применением пенетрометрического метода изучены пластические прочностные цементных систем, модифицированных различными концентрациями исследуемых ПД (рис. 3).



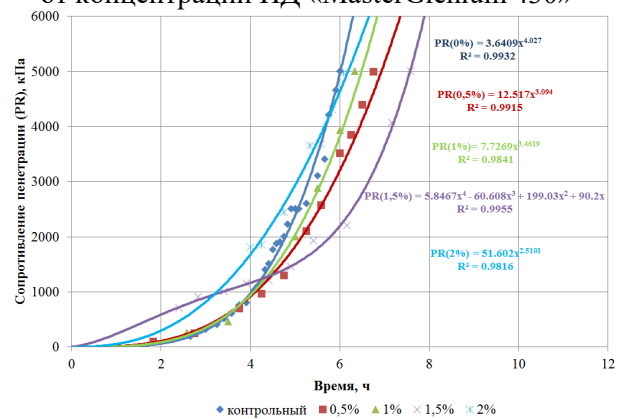
А) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 430»



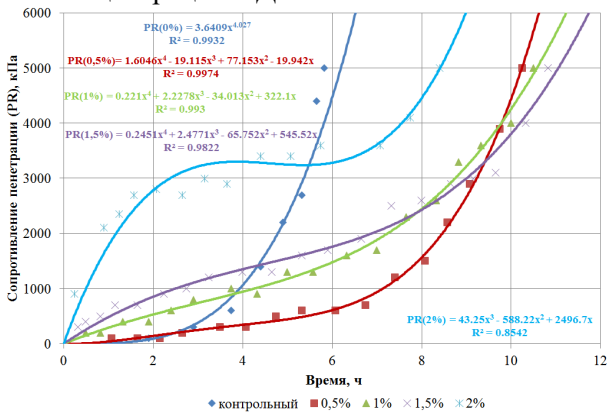
Б) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ II/B-П 32,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 430»



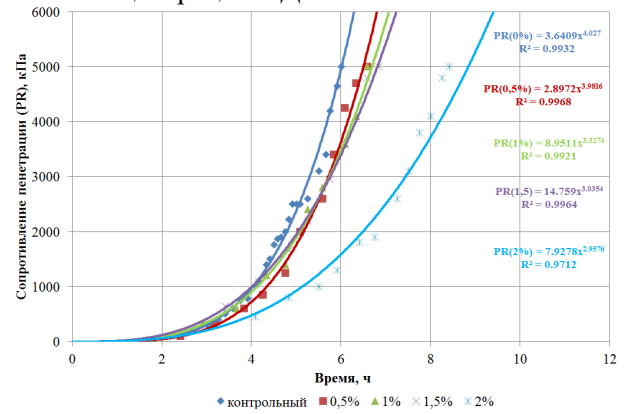
В) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 115»



Г) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ II/B-П 32,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 115»



Д) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 591»



Е) Зависимость кинетики набора прочности цементной системы на ПЦ ЦЕМ II/B-П 32,5Н от концентрации ПД «MasterGlenium 591»

Рис. 3. Зависимости кинетики набора прочности цементных систем от вида ПЦ, вида и концентрации ПД

Fig. 3. The dependences of the kinetics of the strength set of cement systems on the type of cement, the type and concentration of plastisizer

Анализ данных приведенных на рис. 3 свидетельствует, что изучение пластической прочности цементных систем во времени пенетрометрическим методом в отличие от сроков схватывания отражает более полную картину структурообразования. Исследуемые ПД оказывают различное влияние в зависимости от вида применяемого ПЩ и концентрации добавки.

ПД «MasterGlenium 430» в количестве 0,5-2,0 % приводит к росту пластической прочности цементных систем на основе ПЩ ЦЕМ I 42,5Н (рис. 3А) в интервале 3,5-5 ч по сравнению с контрольным составом. В последующие сроки разница величин сопротивления пенетрации незначительна. Работа данной добавки в исследуемых концентрациях в цементных системах на основе ЦЕМ II/В-П 32,5Н существенно отличается (рис. 3Б) и приводит к замедлению роста пластической прочности по сравнению с контрольным составом.

ПД «MasterGlenium 115» приводит к ускорению набора пластической прочности систем на основе ЦЕМ I 42,5Н в количестве 1,0-2,0% (рис. 3В). При меньшей дозировке (0,5%) происходит увеличение пластической прочности в интервале от 0 до 4 ч по сравнению с немодифицированным составом, в последующие сроки значения близки к контрольному составу.

В системах на основе ЦЕМ II/В-П 32,5Н (рис. 3Г) использование ПД «MasterGlenium 115» в количестве 0,5-1,0% не приводит к существенному изменению пластической прочности. Увеличение содержания данной ПД до 1,5-2% приводит к слабому росту пластической прочности в интервале 0,5-4 ч и незначительное замедлению в последующие сроки.

ПД «MasterGlenium 591» в количестве 2,0% приводит к существенному росту пластической прочности системы на основе ЦЕМ I 42,5Н в начальный период гидратации (0 – 3 ч) и к его замедлению в последующие сроки (рис. 3Д). Меньшее количество ПД от 0,5 до 1,5% приводит к умеренному ускорению роста пластической прочности в первые 4,5 ч и к значительному замедлению в последующие сроки по сравнению с контрольным составом. При введении 2% данной ПД в цементную систему на основе ЦЕМ II/В-П 32,5Н происходит замедление набора пластической прочности по сравнению с контрольным составом (рис. 3Е).

Выполненный анализ свидетельствует о весьма умеренном влиянии всех исследуемых поликарбоксилатных ПД на кинетику набора пластической прочности цементных систем с минеральными добавками осадочного происхождения на основе ЦЕМ II/В-П 32,5Н (не происходит чрезмерного ускорения или замедления по сравнению с контрольным составом, что благоприятно при проектировании составов бетонов). Применение исследуемых поликарбоксилатных ПД для модификации цементных систем на основе ЦЕМ I 42,5Н позволяет в зависимости от концентрации ускорять или замедлять набор пластической прочности цементного теста, что открывает более широкие возможности для управления процессами их структурообразования. Следует отметить, что менее эффективны ПД «MasterGlenium 115» в количестве 1-2% и ПД «MasterGlenium 591» в количестве 2% от массы ПЩ, которые приводят к чрезмерному ускорению роста пластической прочности в начальные сроки, что менее благоприятно для послойной экструзии бетонных и растворных смесей на их основе.

Для выполнения следующего этапа исследований по изучению зависимостей средней плотности и предельного напряжения сдвига смесей приняты такие концентрации ПД при которых не происходит избыточного ускорения их структурообразования в начальный период, что обеспечивает жизнеспособность смесей для их применения в технологии аддитивного производства. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 свидетельствует, что исследуемые ПД не приводят к существенному изменению средней плотности бетонной смеси. Предельное напряжение сдвига бетонных смесей при этом изменяется заметно: при введении 0,5% ПД «MasterGlenium 430» предельное напряжение сдвига увеличивается на 11,5%; при введении 0,5% ПД «MasterGlenium 115» – увеличивается на 70,5%; при введении 1% ПД «MasterGlenium 591» предельное напряжение сдвига уменьшается на 15,4%.

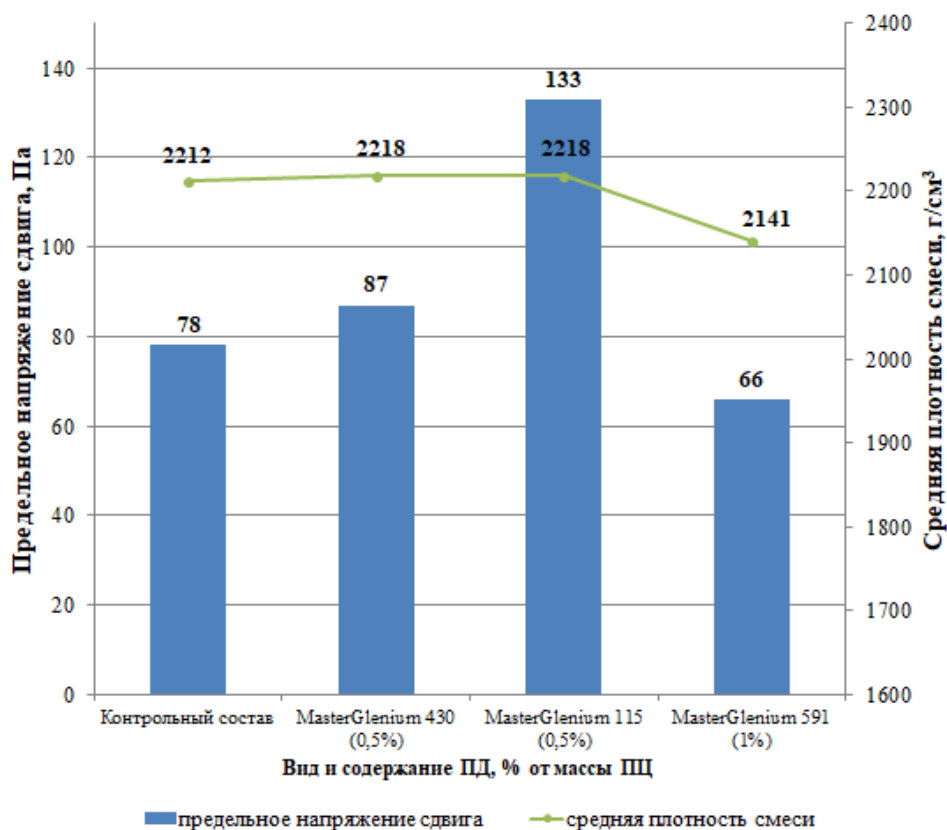


Рис. 4. Зависимости средней плотности и предельного напряжения сдвига бетонной смеси от вида и концентрации поликарбоксилатных ПД на ЦЕМ I 42,5Н

Fig. 4. The dependence of the average density and the ultimate shear stress of the concrete mixture on the type and concentration of polycarboxylate plasticizer on the CEM I 42.5N

На следующем этапе изучена формоустойчивость напечатанных слоев из мелкозернистых бетонных смесей, модифицированных исследуемыми ПД (рис. 5). Наиболее эффективными ПД по критерию повышения формоустойчивости напечатанных слоев на ЦЕМ I 42,5Н являются «MasterGlenium 430» и «MasterGlenium 115», на ЦЕМ II/В-П 32,5Н – «MasterGlenium 591».

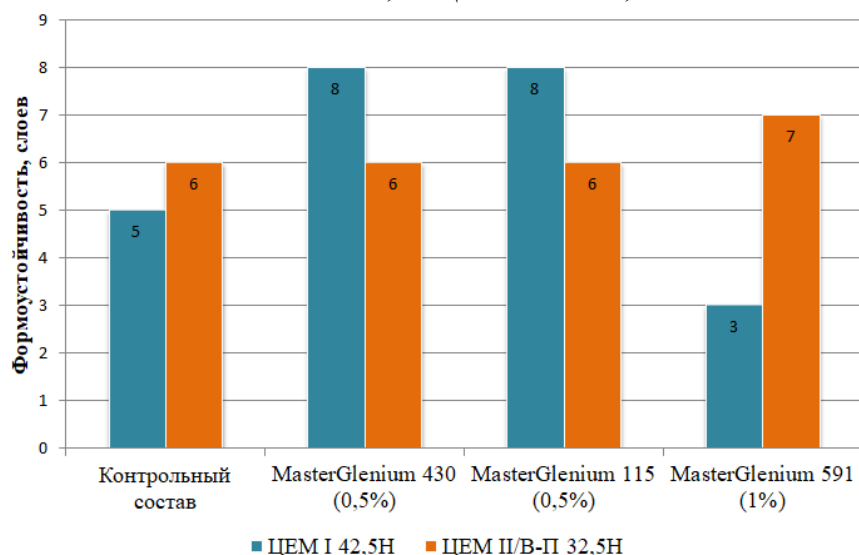


Рис. 5. Зависимости формоустойчивости напечатанных слоев от вида поликарбоксилатного ПД и вида ПЩ

Fig. 5. The dependence of the form stability of printed words on the type of polycarboxylate plasticizer and the type of portland cement

Далее изучены пределы прочности на сжатие и при изгибе мелкозернистого бетона, модифицированного исследуемыми поликарбоксилатными ПД. Концентрация ПД принята с учетом результатов предыдущего этапа исследований. Результаты приведены на рис. 6, 7.

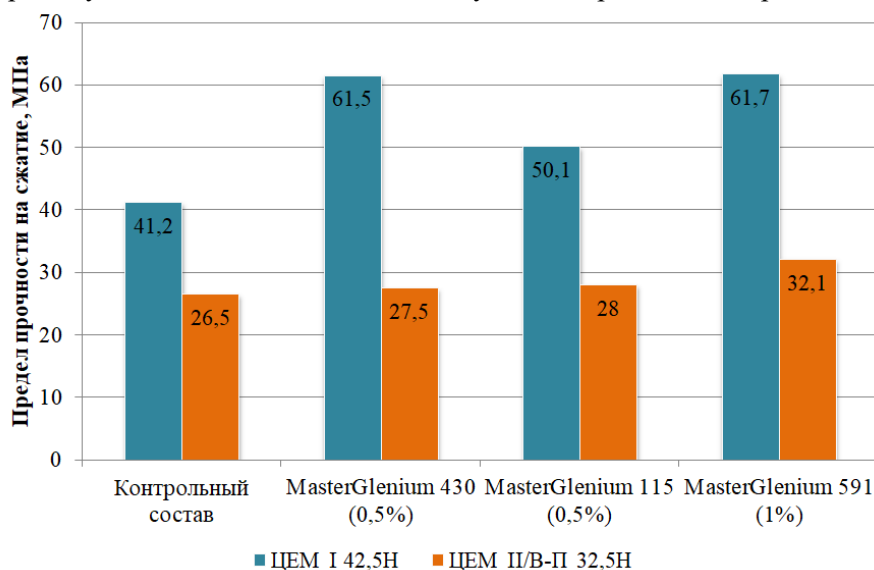


Рис. 6. Зависимости пределов прочности на сжатие мелкозернистого бетона от вида поликарбоксилатного ПД и вида ПЦ

Fig. 6. The dependence of the compressive strength of fine-grained concrete on the type of polycarboxylate plasticizer and the type of portland cement

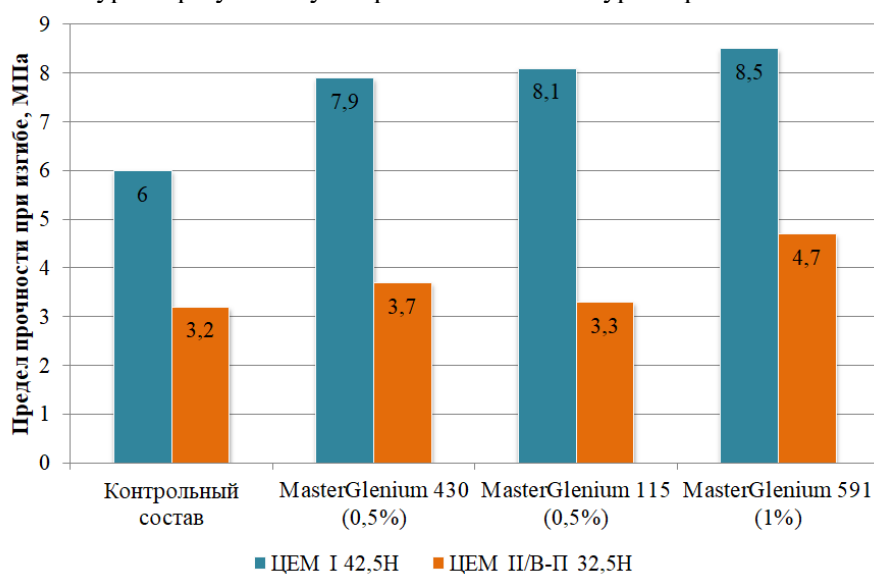


Рис. 7. Зависимости пределов прочности при изгибе мелкозернистого бетона от вида поликарбоксилатного ПД и вида ПЦ

Fig. 7. The dependence of the bending strength of fine-grained concrete on the type of polycarboxylate plasticizer and the type of Portland cement

Установлено, что наибольший рост пределов прочности на сжатие и при изгибе при введении исследуемых ПД наблюдается на ПЦ ЦЕМ I 42,5Н. Так, при введении 0,5% ПД «MasterGlenium 430» прочность при сжатии и изгибе увеличиваются на 49,3% и 31,6% соответственно; при введении ПД «MasterGlenium 115» – на 21,6% и 35% соответственно; при введении ПД «MasterGlenium 591» – на 49,8% и 41,7% соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что исследуемые ПД на основе эфиров поликарбоксилатов в рассмотренных концентрациях являются эффективными модификаторами реотехнологических и физико-механических свойств цементных бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати.

2. Пенетрометрическим методом установлено умеренное влияние всех исследуемых поликарбоксилатных ПД на изменение пластической прочности смесей на основе ЦЕМ II/В-П 32,5Н с минеральными добавками (не происходит чрезмерного ускорения или замедления по сравнению с контрольным составом, что благоприятно при проектировании составов бетонов. Применение исследуемых поликарбоксилатных ПД для модификации цементных систем на основе ЦЕМ I 42,5Н позволяет в зависимости от концентрации ускорять или замедлять набор пластической прочности цементного теста, что открывает более широкие возможности для управления процессами структурообразования цементных систем. ПД «MasterGlenium 115» в количестве 1-2% и ПД «MasterGlenium 591» в количестве 2% от массы ПЦ приводят к чрезмерному ускорению роста пластической прочности в начальные сроки, что менее благоприятно для сплошной экструзии бетонных и растворных смесей на их основе.

3. Пластификация бетонных смесей поликарбоксилатными пластификаторами приводит к изменению величины предельного напряжения сдвига: наибольшее увеличение (на 70,5%) наблюдается при введении 0,5% ПД «MasterGlenium 115»; снижение (на 15,4%) наблюдается при введении 1% ПД «MasterGlenium 591»; при введении 0,5% ПД «MasterGlenium 430» наблюдается увеличение на 11,5%.

4. Наиболее эффективными ПД по критерию повышения формоустойчивости напечатанных слоев на ЦЕМ I 42,5Н являются «MasterGlenium 430» и «MasterGlenium 115», на ЦЕМ II/В-П 32,5Н – «MasterGlenium 591».

5. Экспериментально определено, что наибольшая эффективность ПД по критерию увеличения прочности затвердевших композитов достигается при использовании в качестве вяжущего ПЦ ЦЕМ I 42,5Н. Так, введение в смесь «MasterGlenium 430» в количестве 0,5% приводит к увеличению прочности при сжатии и изгибе на 49,3% и 31,6%; при введении ПД «MasterGlenium 115» – на 21,6% и 35%; при введении ПД «MasterGlenium 591» – на 49,8% и 41,7% соответственно.

6. Интерес для дальнейших исследований представляет разработка комплексных органо-минеральных добавок полифункционального действия на основе поликарбоксилатных ПД для бетонов, формируемых методом аддитивного производства (3D-печати).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке ООО «3Д-Строй» и стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1051.2021.1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Klyuev S., Klyuev A., Fediuk R., Ageeva M., Fomina E., Amran M., Murali G. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D printing // Construction and Building Materials. 2022. № 338. P. 127644. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127644. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822013198>
- [2] Мухаметрахимов Р.Х., Горбунова П.С. Роль дисперсного армирования в формировании технологических свойств и реологических свойств бетонных смесей для строительной 3D-печати // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. 2019. С. 270 – 274.
- [3] Soltan D.G., Li V.C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing // Cement and Concrete Composites. 2018. № 90 (March). P. 1 – 13. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017

- [4] Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar // *Materials*. 2019. № 12 (10). P. 12101708. DOI:10.3390/ma12101708
- [5] Slavcheva G.S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 481 (1). P. 012043. DOI:10.1088/1757-899X/481/1/012043
- [6] Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste // *Scientific.Net. Key Engineering Materials*. 2019. № 799. P. 282 – 287. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.799.282. URL: <https://www.scientific.net/KEM.799.282>
- [7] Kruge P.J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. (December). Stellenbosch University, 2019.
- [8] Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. № 172. P. 468 – 475. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232>
- [9] Chen Y., Jansen K., Zhang H., Romero Rodriguez C., Gan Y., Çopuroğlu O., Schlangen E. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study // *Construction and Building Materials*. 2020. № 262. P. 120094. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
- [10] Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2020. № 244. P. 118305. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118305
- [11] Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати // *Известия КГАСУ*. 2022. № 1 (59). С. 64 – 79. DOI:10.52409/20731523_2022_1_64
- [12] Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. Т. 4. № 4 (42). С. 350 – 359.
- [13] Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27 – 46. DOI:10.18720/CUBS.52.3. URL: www.unistroy.spbstu.ru
- [14] Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В. Основные направления оптимизации структуры и свойств мелкозернистых бетонов, формируемых методом послойного экструдирования (3D-печати) / *Каз. гос. архит.-строит. ун-т. Казань, Деп. в ВИНТИ* 27.06.2019, №44-В2019, 2019. 63 с.
- [15] Mukhametrakhimov R., Ziganshina L., Kadyrov R., Statsenko E. Structure of 3D-Printed Concrete by X-ray Computed Tomography 2023. P. 425 – 436.
- [16] Mukhametrakhimov R. Ziganshina L. Improvement of Technology and Quality Control of 3DCP 2023. P. 83 – 97.
- [17] Мухаметрахимов Р.Х., Изотов В.С. Влияние активных минеральных добавок на гидратацию вяжущего и физико-механические свойства фиброцементных плит // *Известия КГАСУ*. 2011. № 2 (16). С. 213 – 217. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2011/213_217_Muhametrahimov_Izotov.pdf (date of application: 21.10.2018)
- [18] Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Мустафина А.Р. Исследование влияния добавок термоактивированных смесей на свойства композиционного цемента // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 2 (40). С. 220 – 227.
- [19] Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Лукманова Л.В. Влияния пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 382 – 387.

- [20] Якупов М.И., Морозов Н.М., Боровских Е.В., Хозин В.Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 257 – 261.
- [21] Богданов Р.Р., Пашаев А.В., Журавлев М.В., Калимуллин А.А. Гиперпластификаторы на основе эфира поликарбоксилата и полиарила и их влияние на физико-технические свойства цементных композиций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 46 (4). с. 265 – 273.
- [22] Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Лукманова Л.В. Влияние пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // Известия КГАСУ. 2016. № 38 (4). С. 382 – 387.
- [23] Успанова А.С., Хаджиев М.Р., Исмаилова З.Х., Баснукаев И.Ш. Анализ влияния методов введения органоминеральной добавки в строительные растворы на мелких песках // Строительные материалы и изделия. 2021. № 4 (4). С. 32 – 40.
- [24] Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Комплексная добавка для повышения эффективности гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 70 – 73.
- [25] Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Стоянов О.В. Влияние комплексной добавки извести, молотой керамзитовой пыли и суперпластификатора на состав и структуру композиционного гипсового вяжущего // Вестник КТУ. 2013. № 16 (19). С. 66 – 70.
- [26] Жуйков С.В. Использование нанотехнологий для проектирования строительных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2021. № 4 (6). С. 26 – 47.
- [27] Перцев В.Т., Перова Н.С., Леденев А.А., Загоруйко Т.В. Влияние наноструктурирующих компонентов на характеристики цементного камня и свойства высокопрочных и термостойких бетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 49 (3). С. 163 – 171.
- [28] Хузин А.Ф., Габидуллин М.Г., Бадертдинов И.Р., Рахимов Р.З., Абрамов Ф.П., Юмакулов Р.Э. Низембаев А.Ш., Перепелица Е.М. Комплексные добавки на основе углеродных нанотрубок для высокопрочных бетонов ускоренного твердения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 23 (1). С. 221 – 226.
- [29] Тольпин Д.Ф., Тольпина Н.М. Эффективный способ переработки бетонного лома 3d-печати // Строительные материалы и изделия. 2021. № 4 (2). С. 12 – 18.
- [30] Морозов Н.М., Степанов С.В., Галеев А.Ф. Применение промышленных отходов в цементных композициях // Интеграция науки, общества, производства и промышленности. 2016. С. 36 – 39.
- [31] Морозов Н.М., Степанов С.В., Хозин В.Г. Ускоритель твердения бетона на основе гальванического шлама. Инженерно-строительный журнал. 2012. № 34 (8). С. 67 – 71.
- [32] Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе низкомарочного сырья и отходов промышленности // Вестник Технологического университета. 2016. № 19 (24). С. 56 – 59.
- [33] Файзрахманов И.И., Халиуллин М.И., Леклу А.Н., Амири О. Использование тонкодисперсных отсевов бетонного лома в цементных композициях для получения строительных растворов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 38 (4). С. 395 – 401.
- [34] Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Таскин А.В., Тимохин Р.А., Клюев С.В., Сезар К. Повышение ударной вязкости фиброзобетона // Строительные материалы и изделия. 2020. № 3 (6). с. 5 – 16.
- [35] Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Влияние полипропиленовых волокон на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Технологического университета. 2015. № 18 (1). С. 135 – 137.

- [36] Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Лукманова Л.В. Структура и свойства гипсоцементно-пуццолановой матрицы, армированной целлюлозными волокнами // Известия КГАСУ. 2018. 3 (45). С. 210 – 219. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36263107_66873147.pdf
- [37] Боровских И.В., Хозин В.Г. Изменение длины базальтовых волокон при получении композиционного вяжущего для высокопрочных базальтофибробетонов. Известия КГАСУ. 2009. № 2 (12). С. 233 – 237. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_13036578_64743173.pdf
- [38] Galautdinov A., Mukhametrakhimov R. Fiber-Reinforced Building Composites Based on Mineral Binders. 2023. P. 415 – 423.
- [39] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. To the Question of Fiber Reinforcement of Concrete. Materials Science Forum. 2019. № 945. P. 25 – 29. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.25. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.25>
- [40] Klyuev S.V., Bratanovskiy S.N., Trukhanov S.V., Manukyan H.A. Strengthening of Concrete Structures with Composite Based on Carbon Fiber // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. № 16 (7). P. 2810 – 2814. DOI:10.1166/jctn.2019.8132. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/10.1166/jctn.2019.8132>
- [41] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Fiber Concrete for Industrial and Civil Construction. Materials Science Forum. 2019. № 945. P. 120 – 124. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.120. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.120>
- [42] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Experimental Study of Fiber-Reinforced Concrete Structures. Materials Science Forum. 2019. № 945. P. 115 – 119. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.115. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.115>
- [43] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Fibers and their Properties for Concrete Reinforcement // Materials Science Forum. 2019. № 945. P. 125 – 130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.125. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.125>
- [44] Pimenov S. Heavyweight Concrete Based on Hydromechanochemically Activated Binder. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012098
- [45] Pimenov S.I. Features of the structure formation of a cement stone after hydro-mechanochemical activation of cement // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. № 49 (3). P. 46 – 58.
- [46] Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Механоактивированное гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе модифицированного низкомарочного сырья. Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43). С. 187 – 195.
- [47] Халиуллин М.И., Димиева А.И., Файзрахманов И.И. Влияние добавок механоактивированных минеральных наполнителей на свойства композиционных гипсовых вяжущих. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 50 (4). с. 386 – 393.
- [48] Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Влияние портландцементов с различным минералогическим составом на основные свойства композитов, сформованных методом послойного экструдирования (3D-печати) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 2 (51). С. 37 – 49. DOI:10.52409/20731523_2021_2_37. URL: https://elibrary.ru/doi_resolution.asp?doi=10.52409%2F20731523_2021_2_37
- [49] Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence Of Cement-Sand Mortar Mobility On The Quality Of 3D Printed Hardened Composite // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. № 94. P. 9404. DOI:10.4123/CUBS.94.4
- [50] Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 102 (2). P. 10206. DOI:10.34910/MCE.102.6

- [51] Мухаметрахимов Р.Х. Влияние пластифицирующих добавок на основе поверхностно-активных натриевых солей на свойства бетонов, применяемых в технологии 3D-печати // Полимеры в строительстве: научный интернет журнал. 2022. № 1 (10). С. 47 – 61.
- [52] Мухаметрахимов Р.Х. Влияние пластифицирующей добавки на основе лигносульфоната на свойства мелкозернистых бетонов в технологии аддитивного производства // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2022. № 6. С. 23 – 26.
- [53] Вовк А.И. Upgrade добавок: чем может помочь химия. Технологии бетонов. 2014. № 8. С. 8 – 11. URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2014-08/8-11.pdf>
- [54] Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны 2006. 368 с.

REFERENCES

- [1] Klyuev S., Klyuev A., Fediuk R., Ageeva M., Fomina E., Amran M., Murali G. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2022. 338. P. 127644. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127644. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822013198>
- [2] Mukhametrakhimov R.H., Gorbunova P.S. The role of dispersed reinforcement in the formation of technological properties and rheological properties of concrete mixtures for construction 3D printing. *Actual problems and prospects of development of the construction complex*. 2019. P. 270 – 274. (rus.)
- [3] Soltan D.G., Li V.C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 2018. 90 (March). P. 1 – 13. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017
- [4] Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar. *Materials*. 2019. 12 (10). P. 12101708. DOI:10.3390/ma12101708
- [5] Slavcheva G.S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 481 (1). P. 012043. DOI:10.1088/1757-899X/481/1/012043
- [6] Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste. *Scientific.Net. Key Engineering Materials*. 2019. 799. P. 282 – 287. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.799.282. URL: <https://www.scientific.net/KEM.799.282>
- [7] Kruge P.J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. (December). Stellenbosch University, 2019.
- [8] Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of surface moisture on interlayer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. 172. P. 468 – 475. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232>
- [9] Chen Y., Jansen K., Zhang H., Romero Rodriguez C., Gan Y., Çopuroğlu O., Schlangen E. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*. 2020. 262. P. 120094. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
- [10] Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2020. № 244. P. 118305. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118305
- [11] Mukhametrakhimov R.H., Ziganshina L.V. Technology and quality control of construction 3D printing. *News of KSUAE*. 2022. 1 (59). P. 64 – 79. DOI:10.52409/20731523_2022_1_64 (rus.)

- [12] Additive technology of construction of buildings and structures using a construction 3D printer. Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering 2017. V. 4. 4 (42). P. 350 – 359. (rus.)
- [13] Vatin N.I., Chumakova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpine A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D printing in construction. Construction of unique buildings and structures. 2017. 1 (52). P. 27 – 46. DOI:10.18720/CUBS.52.3. URL: www.unistroy.spbstu.ru (rus.)
- [14] Mukhametrakhimov R.H., Lukmanova L.V. The main directions of optimization of the structure and properties of fine-grained concrete formed by the method of layer-by-layer extrusion (3D printing). Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Dep. in VINITI 27.06.2019, №44-V2019, 2019. 63 p. (rus.)
- [15] Mukhametrakhimov R., Ziganshina L., Kadyrov R., Statsenko E. Structure of 3D-Printed Concrete by X-ray Computed Tomography 2023. P. 425 – 436.
- [16] Mukhametrakhimov R., Ziganshina L. Improvement of Technology and Quality Control of 3DCP2023. P. 83 – 97.
- [17] Mukhametrakhimov R.H., Izotov V.S. The effect of active mineral additives on the hydration of the binder and the physico-mechanical properties of fiber cement slabs. News of KSUAE. 2011. 2 (16). P. 213 – 217. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2011/213_217_Muhametrahimov_Izotov.pdf (date of application: 21.10.2018) (rus.)
- [18] Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Mustafina A.R. Investigation of the effect of additives of thermally activated mixtures on the properties of composite cement. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2017. 2 (40). P. 220 – 227. (rus.)
- [19] Mukhametrakhimov R.H., Galyautdinov A.R., Lukmanova L.V. Effects of plasticizing additives on the basic properties of gypsum-cement-pozzolan binder based on low-grade and man-made raw materials. Proceedings of KSUACE. 2016. 4 (38). P. 382 – 387. (rus.)
- [20] Yakupov M.I., Morozov N.M., Borovskikh E.V., Khozin V.G. Modified fine-grained concrete for the construction of monolithic coatings of airfield runways. Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2013. 4 (26). P. 257 – 261. (rus.)
- [21] Bogdanov R.R., Pashaev A.V., Zhuravlev M.V., Kalimullin A.A. Hyperplasticizers based on polycarboxylate ether and polyaryl and their effect on the physical and technical properties of cement compositions. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. 46 (4). P. 265 – 273. (rus.)
- [22] Mukhametrakhimov R.H., Galautdinov A.R., Lukmanova L.V. Influence of plasticizing additives on the basic properties of gypsum-cement-pozzolan binder based on low-grade and technogenic raw materials. Proceedings of KSUACE. 2016. 38 (4). P. 382 – 387. (rus.)
- [23] Usпанова A.S., Khadzhiev M.R., Ismailova Z.H., Basnukaev I.S. Analysis of the influence of methods of conducting organomineral additives in building mortars on fine sands. Construction materials and products. 2021. 4 (4). P. 32 – 40. (rus.)
- [24] Izotov V.S., Mukhametrakhimov R.H., Galyautdinov A.R. Complex additive for improving the effectiveness of gypsum cement-pozzolan binder. Construction materials. 2016. 8. P. 70 – 73. (rus.)
- [25] Khaliullin M.I., Gayfullin A.R., Rakhimov R.Z., Stoyanov O.V. The effect of a complex additive of lime, ground expanded clay dust and superplasticizer on the composition and structure of composite gypsum binder. Bulletin of KTU. 2013. 16 (19). P. 66 – 70. (rus.)
- [26] Zhuikov S.V. The use of nanotechnology for the design of building structures. Construction materials and products. 2021. 4 (6). P. 26 – 47. (rus.)
- [27] Pertsev V.T., Perova N.S., Ledenev A.A., Zagoruiko T.V. The influence of nanostructuring components on the characteristics of cement stone and the properties of high-strength and heat-resistant concrete. Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. 49 (3). P. 163 – 171. (rus.)

- [28] Khuzin A.F., Gabidullin M.G., Badertdinov I.R., Rakhimov R.Z., Abramov F.P., Yumakulov R.E., Nizembayev A.Sh., Perepelitsa E.M. Complex additives based on carbon nanotubes for high-strength accelerated hardening concrete. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013. 23 (1). P. 221 – 226. (rus.)
- [29] Tolypin D.F., Tolykina N.M. Effective method of processing concrete scrap 3d printing. *Construction materials and products*. 2021. 4 (2). P. 12 – 18. (rus.)
- [30] Morozov N.M., Stepanov S.V., Galeev A.F. Application of industrial waste in cement compositions. *Integration of science, society, production and industry*. 2016. P. 36 – 39. (rus.)
- [31] Morozov N.M., Stepanov S.V., Khozin V.G. Concrete hardening accelerator based on galvanic sludge. *Civil Engineering Journal*. 2012. 34 (8). P. 67 – 71. (rus.)
- [32] Mukhametrakhimov R.H., Galautdinov A.R. Gypsum-cement-pozzolan binder based on low-grade raw materials and industrial waste. *Bulletin of the Technological University*. 2016. 19 (24). P. 56 – 59. (rus.)
- [33] Fayzrakhmanov I.I., Khaliullin M.I., Lilu A.N., Amiri O. The use of fine-dispersed screenings of concrete scrap in cement compositions for obtaining building mortars. *Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016. 38 (4). P. 395 – 401. (rus.)
- [34] Fedyuk R.S., Liseitsev Yu.L., Taskin A.V., Timokhin R.A., Klyuev S.V., Cesar K. Increasing the impact strength of fibro concrete. *Construction materials and products*. 2020. 3 (6). P. 5 – 16. (rus.)
- [35] Izotov V.S., Mukhametrakhimov R.H., Galyautdinov A.R. The influence of polypropylene fibers on the basic properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Bulletin of the Technological University*. 2015. 18 (1). P. 135 – 137. (rus.)
- [36] Mukhametrakhimov R.H., Galyautdinov A.R., Lukmanova L.V. Structure and properties of gypsum-cement-pozzolan matrix reinforced with cellulose fibers. *Proceedings of KSUACE*. 2018. 3 (45). P. 210 – 219. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36263107_66873147.pdf (rus.)
- [37] Borovskikh I.V., Khozin V.G. Changing the length of basalt fibers in the preparation of a composite binder for high-strength basalt fiber concrete. *Proceedings of KSUACE*. 2009. 2 (12). P. 233 – 237. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_13036578_64743173.pdf (rus.)
- [38] Galautdinov A., Mukhametrakhimov R. *Fiber-Reinforced Building Composites Based on Mineral Binders*. 2023. P. 415 – 423.
- [39] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. To the Question of Fiber Reinforcement of Concrete. *Materials Science Forum*. 2019. 945. P. 25 – 29. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.25. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.25>
- [40] Klyuev S.V., Bratanovskiy S.N., Trukhanov S.V., Manukyan H.A. Strengthening of Concrete Structures with Composite Based on Carbon Fiber. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019. 16 (7). P. 2810 – 2814. DOI:10.1166/jctn.2019.8132. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/10.1166/jctn.2019.8132>
- [41] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Fiber Concrete for Industrial and Civil Construction. *Materials Science Forum*. 2019. 945. P. 120 – 124. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.120. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.120>
- [42] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Experimental Study of Fiber-Reinforced Concrete Structures. *Materials Science Forum*. 2019. 945. P. 115 – 119. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.115. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.115>
- [43] Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V., Klyuev A.V. Fibers and their Properties for Concrete Reinforcement. *Materials Science Forum*. 2019. 945. P. 125 – 130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.125. URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.125>

- [44] Pimenov S. Heavyweight Concrete Based on Hydromechanochemically Activated Binder. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012098
- [45] Pimenov S.I. Features of the structure formation of a cement stone after hydro-mechanochemical activation of cement. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. 49 (3). P. 46 – 58.
- [46] Mukhametrakhimov R.H., Galyautdinov A.R. Mechanically activated gypsum-cement-pozzolan binder based on modified low-grade raw materials. Proceedings of KSUACE. 2018. 1 (43). P. 187 – 195. (rus.)
- [47] Khaliullin M.I., Dimieva A.I., Fayzrakhmanov I.I. Influence of additives of mechano-activated mineral fillers on the properties of composite gypsum binders. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. 50 (4). P. 386 – 393. (rus.)
- [48] Mukhametrakhimov R.H., Ziganshina L.V. Influence of Portland cement with different mineralogical composition on the basic properties of composites formed by layer-by-layer extrusion (3D printing). Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2021. 2 (51). P. 37 – 49. DOI:10.52409/20731523_2021_2_37 (rus.) URL: https://elibrary.ru/doi_resolution.asp?doi=10.52409%2F20731523_2021_2_37
- [49] Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence Of Cement-Sand Mortar Mobility On The Quality Of 3D Printed Hardened Composite. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. № 94. P. 9404. DOI:10.4123/CUBS.94.4
- [50] Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer. Magazine of Civil Engineering. 2021. 102 (2). P. 10206. DOI:10.34910/MCE.102.6
- [51] Mukhametrakhimov R.H. The influence of plasticizing additives based on surfactants of sodium salts on the properties of concrete used in 3D printing technology. Polymers in construction: scientific online journal. 2022. 1 (10). P. 47 – 61. (rus.)
- [52] Mukhametrakhimov R.H. Influence of a plasticizing additive based on lignosulfonate on the properties of fine-grained concrete in additive manufacturing technology. Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2022. 6. P. 23 – 26. (rus.)
- [53] Vovk A.I. Upgrade of additives: how chemistry can help. Concrete technologies. 2014. 8. P. 8 – 11. URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2014-08/8-11.pdf> (rus.)
- [54] Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete 2006. 368 p. (rus.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Мухаметрахимов Р.Х.,

e-mail: muhametrahimov@mail.ru, тел. +7(843) 510-47-31, ORCID ID: 0000-0003-2062-5289, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194452261>, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Технологий строительного производства», кандидат технических наук, доцент

Mukhametrakhimov R.Kh.,

e-mail: muhametrahimov@mail.ru, tel.: +7(843) 510-47-31, ORCID ID: 0000-0003-2062-5289, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194452261>, Kazan State University of Architecture and Engineering, Department «Construction Production Technologies», Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Поступила в редакцию 5 августа 2022 г.
Принята в доработанном виде 12 сентября 2022 г.
Одобрена для публикации 2 октября 2022 г.

Received: August 5, 2022.
Revised: September 12, 2022
Accepted: October 2, 2022