

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14

Глаголев Е.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: sk31.es@gmail.com

3D-АДДИТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Аннотация. Представлены результаты исследования теоретических основ изготовления строительных материалов с помощью 3D-печати на основе композиционных вяжущих с применением различных способов формования, их практическая апробация на опытных образцах мелкозернистого бетона. Рассмотрены принципы регулирования структуры и свойств композитов за счёт применения минерального модификатора для возведения высотных строительных объектов по 3D-аддитивной технологии. Показано влияние характеристик компонентов сырья на свойства полученного композита. Структурообразование твердеющей цементосодержащей системы в присутствии минерального модификатора протекает более интенсивно за счёт высокой удельной поверхности и энергетической способности компонентов, представляющей собой активную минеральную добавку и основу для кристаллообразования новых гидратных соединений. Различие в прочностных показателях напечатанной стенки обусловлено направлением вырезки образца. Приложение разрушающей нагрузки вдоль направления формования 3D-принтера даёт несколько большую прочность, чем перпендикулярно направлению формования. Это явление можно объяснить формой слоя после затвердевания смеси, которая представляет собой эллипс в сечении.

Ключевые слова: 3D-аддитивные технологии, композиционные вяжущие, мелкозернистые бетоны, съёмная и несъёмная опалубка.

Введение. В настоящее время задача повышения эффективности бетонов, в том числе и мелкозернистых, так же, как и совершенствования технологий строительства, приобретает важное народнохозяйственное значение. Актуальность решения данной задачи заключается в повышении спроса на указанный вид строительной продукции, вследствие ускоренного развития строительства и реконструкции промышленных предприятий, связанное с курсом государства на развитие промышленного потенциала страны. Кроме того, большой объём монолитного мелкозернистого бетона используется в современном жилищном строительстве и при строительстве зданий общественного назначения, что требует применения эффективной технологии строительного производства, такой как 3D-печать. Повышение тонкости помола компонентов смеси, введение модификаторов и современных 3D-аддитивных технологий приводит к повышению производительности труда и качества получаемого продукта [1-4].

Одним из достоинств 3D-аддитивных технологий является быстрота строительства. С помощью 3D-печати можно построить здание площадью 250 м² за 18–20 часов. А с применением высокопрочных бетонов облегчается вся конструкция сооружения вследствие уменьшения толщины несущих элементов. Так, например, толщина стены при классе бетона В 60 может составлять 8 см, также как и перекрытия. Эта технология способствует экономии материальных и

энергетических ресурсов, снижает расход материалов. К тому же, по опыту китайских строителей, стала очевидной возможность использования в данной технологии вторсырья – измельчённых строительных отходов.

Повышению строительно-технических свойств композита, применяемого для сооружения объектов по 3D-аддитивной технологии, способствует использование высокопрочного мелкозернистого бетона на композиционном вяжущем, модифицированном минеральным модификатором. Минеральный модификатор получают раздельным помолом портландцементного клинкера и минеральных компонентов (5–7). Для повышения формуемости изделия в смесь вводят водоредуцирующую добавку (суперпластификатор), что даёт возможность получить материал с уникальными свойствами, отличающимися его от обычного бетона [5, 6].

Выявление взаимосвязи теоретических принципов создания оптимальной структуры композитов для 3D-аддитивных технологий с технологическими приемами современного материаловедения, разработка составов и технологии строительства объектов с использованием природных и техногенных сырьевых ресурсов является важной научно-практической задачей.

Применение мелкозернистых модифицированных бетонов повышенной прочности позволит получить технико-экономический эффект практически во всех областях строительства. Сокрытие расхода вяжущего, которое составляет

до 25 %, является одним из основных направлений в решении задачи снижения затрат на производство эффективных мелкозернистых бетонов на композиционных вяжущих, при получении которых расход топлива и клинкера сокращается на 25–30 % по сравнению с чисто клинкерными цементами.

Главным средством достижения поставленной цели является применение модифицирующих добавок и создание композиционного вяжущего. Наиболее революционными добавками считаются минеральные наполнители – микрокремнезем и высокодисперсные минеральные добавки, не содержащие органики. Данные добавки улучшают структуру цементного камня, что способствует повышению ранней прочности [7, 8].

Для повышения эффективности бетона нового поколения возможно также применение способа активации вяжущего. Активация может производиться в специальных устройствах, непосредственно в бетоносмесителях или с применением СВЧ-энергии.

Главной проблемой, которая сдерживает широкое применение 3D-аддитивных технологий в стройиндустрии, является отсутствие теоретической базы создания композитов нового поколения на эффективных композиционных вяжущих и оптимизация составов с новыми видами энергосберегающего сырья.

В последние годы во всем мире возрастает необходимость разработки композиций для новых систем строительства, в частности 3D-аддитивных технологий, которые позволят вести более длительную эксплуатацию и вносить меньшие затраты. В настоящее время использование мелкозернистых бетонов в строительстве значительно расширяется. В то же время многие сооружения меняют свое функциональное значение. Разработка эффективных мелкозернистых порошковых бетонов на основе композиционных вяжущих для 3D-аддитивных технологий – одно из актуальных направлений современного материаловедения.

Материалы и методы. В специфических условиях строительства зданий по 3D-аддитивным технологиям с учетом назначения возникают специальные требования к вяжущему и его структурообразованию. Для этого необходимо применение специальных модификаторов, содержащих в своём составе и минеральную, и органическую составляющую, которые обеспечивают высокую эффективность вяжущего. Для получения таких композиционных вяжущих были выполнены ряд поисковых исследований с целью изучения дольных соотношений основы – портландцемента, и минерального

модификатора, который обеспечил ускорение сроков схватывания цементного теста. Применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» заводской тонкости помола – 300 м²/кг, высокоактивный модификатор и гиперпластификатор «Melflux 5581».

В результате было определено эффективное содержание составляющих минерального модификатора (ММ) в композиционном вяжущем (КВ), их влияние на его твердение и свойства мелкозернистого бетона.

Строительство объектов с помощью 3D-аддитивных технологий может осуществляется как с применением опалубки, так и безопалубочным способом, методом прямого экструдирования бетонной смеси необходимой толщины, послойно.

Несмотря на большую индустриальность и перспективность безопалубочной технологии 3D-печати, возведение высотных объектов осложняется некоторыми трудностями:

- 1) обязательное армирование бетонных конструкций;
- 2) сооружение перекрытий многоэтажных каркасных зданий;
- 3) качество поверхности стен и других конструкций, контроль за производством работ.

Поэтому применение 3D-аддитивных технологий в строительстве многоэтажных зданий может быть реализовано с устройством различных видов опалубки (рис. 1).

Вид опалубки зависит от характера бетонизируемого объекта, технологии строительного производства, соотношения геометрических размеров, климатическими условиями в регионе строительства.

Требования к опалубке следующие:

- прочность;
- сохранение размеров во времени;
- удобство при установке арматуры и укладке бетонной смеси.

Материал должен удовлетворять, кроме стандартных, специальным требованиям, среди которых следующие особенности формовочных смесей и композитов, применяемых для высотного строительства: реотехнологический индекс – РТИ (экструдированность) и показатель несущей способности свежееотформованного слоя – П (пластическая прочность).

Основная часть. 3D-печать высотного строительного объекта осуществляется с применением опалубки. В качестве заполнителя для многокомпонентных композитов рекомендуется использовать отсев дробления кварцито-песчаника КМА фракции 0,315–1,25 мм. Если предъявляются повышенные требования к поверхности стен, то применение 3D-аддитивных технологий

при строительстве многоэтажных зданий может быть реализовано с устройством опалубки (рис. 1).



Рис. 1. Возведение зданий с применением опалубки по 3D-аддитивной технологии

Чаще всего, учитывая перечисленные факторы, при 3D-аддитивных технологиях, опалубку проектируют как несъемную. Основное преимущество несъемной опалубки – значительное сокращение затрат (~ в 2 раза) по сравнению со съемной, за счет исключения операции распалубки и уменьшения объема бетонной смеси, а также вследствие вхождения опалубки в состав стены.

ГОСТ Р 52085-2003 «Опалубка. Общие технические условия» классифицирует несъемную опалубку на три вида:

– включаемая в расчетное сечение конструкции;

– не включаемая в расчетное сечение конструкции;

– специальная.

По СНиП СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Общие положения» несъемную опалубку следует всегда учитывать, как составную часть стены.

Величина значения пластической прочности у смеси разработанного состава через 15 минут испытаний составляет 762,2 КПа, что значительно превосходит этот показатель для обычного бетона (133,0 КПа), также, как и РТИ, и прочность при сжатии (рисунок 2).

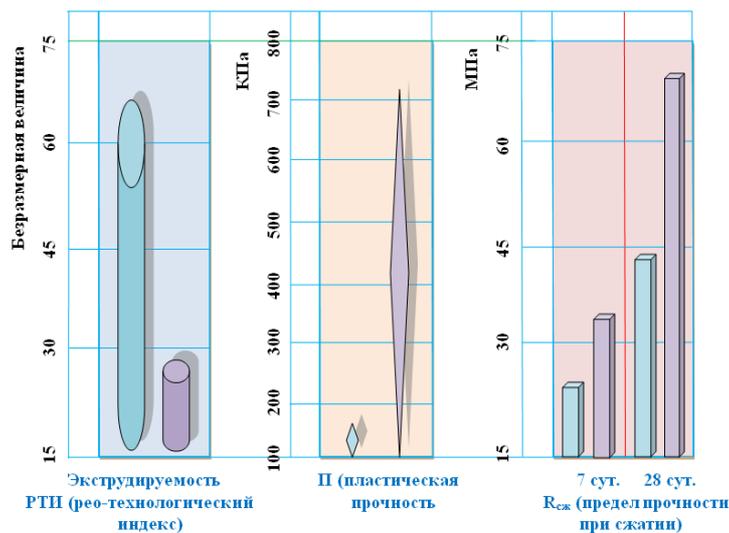


Рис. 2. Сравнение реологических характеристик смеси и бетона для 3D-аддитивных технологий
 Вид бетона: ● – обычный мелкозернистый бетон; ● – модифицированный мелкозернистый бетон

Результаты показали полную пригодность смеси к процессу формования по 3D-аддитивной технологии.

Поэтому, в 3D-аддитивной технологии используется несъемная опалубка, включаемая в

расчетное сечение стены, а всё сооружение является сборно-монолитным. При расчете опалубки на стадии возведения объекта важным является определение давления бетона на вертикальные или наклонные плоскости. В начальной стадии работ давление свежееуложенной бетонной смеси является гидростатическим, и зависит от высоты столба залитой в опалубку смеси, точнее от ее объема. В процессе твердения и набора прочности давление не увеличивается. Поэтому подбор опалубки и расчет давления на нее со стороны бетона, особенно для высотных зданий и сооружений, ведется с учетом только скорости бетонирования. Давление, оказываемое бетонной смесью на опалубку, зависит от нескольких факторов. Во-первых, оно может снижаться в результате за-висания бетонной смеси из-за зацепления за поверхность опалубки и образования сводов, кото-рые препятствуют передаче давления вышележа-щих слоев смеси на нижележащие. Во-вторых,

вследствие внутреннего трения смеси, увеличи-вающегося по мере схватывания бетона. Поэтому поверхность стенок опалубки стараются сделать наиболее гладкой, чтобы уменьшить торможение продвижению бетонной смеси из-за трения ее о стенки опалубки. В-третьих, давление зависит от степени армирования конструкции. Давление выше в малоармированных конструкциях.

Разработанный оптимальный состав для 3D-аддитивной технологии на портландцементе, подвергнутом домолу до удельной поверхности 500 м²/кг (состав № 7, таблица 1), имеет проч-ностные показатели примерно на 40-42 % превы-шающие таковые для контрольных образцов. Это стало возможным, благодаря введению в состав твердеющей смеси минерального модификатора при следующем соотношении компонентов: сме-шанослойных глинистых образований, песка и мела, равном 2:2:1 (таблица 1).

Таблица 1

Зависимость свойств композиционного вяжущего для 3D-печати от состава

№ п/п	Состав	Содержание компонентов, кг/м ³					В/Ц	ρ _{ср} , кг/м ³	R _{сж.} , МПа, в возр., сут.		R _{из.} , МПа, в возр., сут.	
		ПЦ	ВКП	ГП	ММ	Вода			7	28	7	28
1.	ПЦ(300) ¹ + ВКП ²	450	1500	–	–	189	0,42	1950	14,5	43,2	1,6	4,7
2.	ПЦ(300) + ВКП + ГП ³			1,35	–	171	0,38	1946	16,3	48,8	1,8	5,3
3.	ПЦ(300) + ВКП + ММ ⁴			–	13,5	180	0,40	1951	16,2	48,4	1,7	5,2
4.	ПЦ(300) + ВКП + ММ + ГП			1,35	13,5	162	0,36	1949	18,1	60,1	2,2	6,0
5.	ПЦ(500) ⁵ + ВКП	450	1500	–	–	198	0,44	1951	18,7	55,9	2,1	6,1
6.	ПЦ(500) + ВКП + ГП			1,35	–	189	0,42	1950	21,1	63,1	2,4	6,8
7.	ПЦ(500) + ВКП + ММ			–	13,5	193	0,43	1952	20,9	62,2	2,3	6,7
8.	ПЦ(500) + ВКП + ММ + ГП			1,35	13,5	189	0,42	1951	23,4	69,9	2,6	7,4

¹ПЦ(300) – портландцемент заводской тонкости помола (300 м²/кг); ²ВКП – Вольский кварцевый песок; ³ГП – гиперпластификатор Melflux 5581; ⁴ММ – минеральный модификатор; ⁵ПЦ(500) – портландцемент, подвергнутый домолу до удельной поверхности 500 м²/кг

Добавка гиперпластификатора «Melflux 5581» позволяет регулировать консистенцию формовочной смеси и структуру композита, его плотность и прочность, возможность снижения расхода вяжущего.

Укладку бетонной смеси необходимо производить в формы без дефектов с ровными поверхностями и гранями. Формование производится без перерывов, уплотнение заканчивается до начала схватывания.

Выводы

1. Таким образом, установлено, что на основе разработанных составов мелкозернистых высокопрочных бетонов возможно строительство многоэтажных зданий с помощью 3D-печати (рис. 3). Промышленное строительство высотных зданий с помощью 3D-принтера на разработанных составах и принципах быстрой прямой печати обеспечит повышенную долговечность

строения и позволит изготавливать тонкостенные объекты различной формы. Использование формовочных смесей высокопрочного мелкозернистого бетона повышенной жесткости и реологическими характеристиками (предельное напряжение сдвига, вязкость и период релаксации) требует дополнительного механического воздействия 3D-печати, которое может осуществляться с помощью вибрации, что обеспечивает эффективную ее укладку и получение устойчивой структуры стеновой конструкции. Для повышения производительности используется широкая печатающая головка, наносящая слой с двух проходов.

2. Благодаря оптимальным реологическим характеристиками: предельному напряжению сдвига, вязкости и периоду релаксации, показателю несущей способности свежееотформован-

ного слоя (пластической прочности, формоустойчивости), бетонная смесь высокопрочного мелкозернистого бетона обеспечивает эффективную ее укладку в процессе 3D-печати и получение устойчивой структуры строительной конструкции. Для этого обоснованы механизм и основные стадии процессов твердения формовочных смесей «композиционное вяжущее – минеральный модификатор – органическая добавка – мелкий заполнитель – вода» при строительстве высотных зданий и сооружений методом 3D-аддитивных технологий. Необходимые реологические характеристики, ускорение гидратации и набор прочности обусловлены использованием природного и техногенного сырья определенного генезиса, формированием полиминеральных и мелкозернистых новообразований гидросиликатов кальция различной основности, как динамически стабильной системы с интенсивным взаимодействием компонентов.



Рис. 3. Промышленный 3D-принтер для высотного строительства

3. Композиционное вяжущее, модифицированное новой минеральной добавкой, с компонентами с дефектной структурой, характеризуется повышенной скоростью твердения, обеспечивает высокоплотную структуру композита и способствует уменьшению деформационных характеристик материала. Различие в прочностных показателях напечатанной стенки обусловлено направлением вырезки образца. Приложение разрушающей нагрузки вдоль направления формования 3D-принтера даёт несколько большую прочность, чем перпендикулярно направлению формования. Это явление можно объяснить формой слоя после затвердевания смеси, которая представляет собой эллипс в сечении. Нагрузка, приложенная к меньшей оси эллипса, будет больше, чем к большей оси.

4. Высокопрочный мелкозернистый бетон, полученный по 3D-аддитивной технологии, проявляет снижение прочности по сравнению с образцами, сформованными в стандартных формах (до 15 %). При этом прочность, остается достаточной для 3D-печати высотных конструкций зданий и сооружений. Микроструктура образцов бетона на композиционном вяжущем с минеральным модификатором отличается высокой степенью сцепления цементного камня с заполнителем. В процессе гидратации композиционного вяжущего с гиперпластификатором и ММ распределение новообразований по всему объёму носит равномерный характер. Полученный мелкозернистый бетон характеризуется коротким периодом схватывания и сокращённым промежутком времени между началом и концом схватывания (около 2 час.). Оптимальные свойства разработанного мелкозернистого бетона на основе модифицированного композиционного вяжущего дают возможность строить высотные объекты с помощью современных 3D-принтеров, оборудованных системой вибрационного воздействия, что обеспечит эффективную ее укладку и получение устойчивой структуры строительного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016. Т. 49. No. 4. Pp. 1213–1220.
3. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Э. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом их генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 10–14.
4. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Милькина А.С. Особенности структуры бетонов нового поколения с применением техногенных материалов // Вестник СБАДИ. Разд. III. Строительство и архитектура. 2018. Т. 15. № 4 (62). С. 588–595.
5. Lesovik V.S., Pukharenko Y.V., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Fedyuk R.S., Ahmed Anees Al-Ani (Iraq). Powder fiber-reinforced concrete based on composite binder 20. *Internationale Baustofftagung. 2 Concretes and Durability of concrete*. 2018. Pp. 12–18.
6. Tolstoy A.D, Lesovik V.S., Glagolev E.S., Krymova A.I. Synergetics of hardening construction systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 327.

7. Глаголев Е.С. Композиты для 3D-аддитивного малоэтажного строительства // Научно-технические технологии и инновации Сборник трудов науч.-практ. конф. 2019. С. 95–99.

8. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Novikov K.Y., Strokova V.V. Powdered concretes on composition binders with application of technogene raw materials International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. Pp. 24726–24732.

9. On productivity of laser additive manufacturing Journal of Materials Processing Technology. 2018. T. 261. Pp. 213–232.

10. Nasir H., Ahmed H., Hass C, Goodruni P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States Construction Management Economic. 2014. Vol. 32. Pp. 595–607.

11. Klotz M., Horman M., A. Bodenschatz A lean modelling protocol for evaluating green project delivery. Lean Construction. 2007. Vol. 3(1). Pp. 1–18.

12. Дьяченко В.А., Челпанов И.Б., Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д. Материалы и про-

цессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 2015. 198 с.

13. Hack N., Lauer W.V., Gramazio F, Kohler M. Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance. Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. 2014. Kyoto. Pp. 139–148.

14. Collins T.M. Proportioning high-strength concrete to control creep and shrinkage. ACI Materials Journal. 1989. Vol. 86. No. 6. Pp. 576–580.

15. Хархардин А.Н. Топологическое состояние и свойства композиционных материалов // Известия ВУЗов. Строительство. Новосибирск. 1997. № 4. С.72-77.

16. Хархардин А.Н. Способ получения высокоплотных составов зернистого сырья // Известия ВУЗов. Строительство. Новосибирск. 1996. № 10. С. 56-60.

17. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. / НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП, ЦНИИПромзданий. 1987. 148 с.

Информация об авторах

Глаголев Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.es@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.01.2021 г.

© Глаголев Е.С., 2021

Glagolev E.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: sk31.es@gmail.com

3D-ADDITIVE BUILDING TECHNOLOGIES. THEORY AND PRACTICE

Abstract. The results of the study of the theoretical foundations of the manufacture of building materials using 3D printing based on composite binders with various molding methods and their practical testing on prototypes of fine-grained concrete are presented. The principles of regulating the structure and properties of composites through the use of a mineral modifier for the construction of high-rise building objects using 3D-additive technology are considered. The influence of the characteristics of the raw material components on the properties of the obtained composite is shown. The structure formation of the hardening cement-containing system in the presence of a mineral modifier proceeds more intensively due to the high specific surface area and energy capacity of the components, which is an active mineral additive and the basis for the crystal formation of new hydrate compounds. The difference in the strength characteristics of the printed wall is due to the direction of the sample cut. Applying a breaking load along the direction of forming of a 3D printer gives a slightly higher strength than perpendicular to the direction of forming. This phenomenon can be explained by the shape of the layer after solidification of the mixture, which is an ellipse in cross section.

Keywords: 3D additive technologies, composite binders, fine-grained concrete, removable and non-removable formwork.

REFERENCES

1. Batting N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. Zykova V.V. Karpenya A.N. Kim A.A.,

Finashenkov E.A. 3D printing in construction [3D-pechat v stroitelstve]. Construction of unique buildings and structures. 2017. No. 1(52). Pp. 27–46 (rus).

2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. No. 4. Pp. 1213–1220.
3. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E. Classification of active mineral additives for composite binders taking into account their genesis [Klasifikazija aktivnih mineralnih dobavok dlia kompozionnih vyazusih s uchotom ih genezisa]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 3. Pp. 10–14 (rus).
4. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Milkina A.S. Features of the structure of new generation concrete with the use of technogenic materials [Osobtnosti strukturi betonov novogo pokoleniya s primeneniem tehogennih materialov]. *Bulletin of SbADI. Sec. III. Construction and architecture*. 2018. Vol. 15. No. 4(62). Pp. 588–595 (rus).
5. Lesovik V.S., Pukharencov Y.V., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Fedyuk R.S., Ahmed Anees Al-Ani (Iraq). Powder fiber-reinforced concrete based on composite binder // 20. *Internationale Baustofftagung. 2 Concretes and Durability of concrete*. 2018. Pp. 12-18.
6. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Krymova A.I. Synergetics of hardening construction systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 327.
7. Glagolev E.S. Composites for 3-D additive low-rise construction [Kompoziti dlia 3D-additivnogo maloetagnogo stroitelstva]. "Science-intensive technologies and innovations" Collection works of scientific and practical conference. 2019. Pp. 95–99 (rus).
8. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Glagolev E.S., Novikov K.Y., Strokova V.V. Powdered concretes on composition binders with application of technogenic raw materials. *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8. No. 4. Pp. 24726–24732.
9. On productivity of laser additive manufacturing *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 261. Pp. 213–232.
10. Nasir H., Ahmed H., Hass C, Goodruni P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States *Construction Management Economic*. 2014. Vol. 32. Pp. 595–607.
11. Klotz M., Horman M., A. Bodenschatz A lean modelling protocol for evaluating green project delivery. *Lean Construction*. 2007. Vol. 3(1). Pp. 1–18.
12. Dyachenko V.A., Chelpanov I.B., Nikiforov S.O., Khozonkhonova D.D. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) [Materiali i prozessi additivnih tehnologii (distroeprototipirovanie)]. Ulan-Ude: Publishing house of the BNTs SB RAS. 2015. 198 p. (rus).
13. Hack N., Lauer W.V., Gramazio F, Kohler M. Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance. *Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*. 2014. Kyoto. Pp. 139–148.
14. Collins T.M. Proportioning high-strength concrete to control creep and shrinkage. *ACI Materials Journal*. 1989. Vol. 86. No. 6. Pp. 576–580.
15. Kharkhardin A.N. Topological state and properties of composite materials [Topologicheskoe sostoianie i svoistva kompozionnih materialov]. *Izv. Universities. Construction. Novosibirsk*. 1997. No. 4. Pp. 72–77.
16. Kharkhardin A.N. Method of obtaining high-density compositions of granular raw materials [Sposob polucheniia visokoplotnih sostavov zernistogo siria]. *Izv. Universities. Construction. Novosibirsk*. 1996. No. 10. Pp. 56–60.
17. Recommendations for the design and manufacture of steel fiber concrete structures. *NIIZHB. LenZNIIEP. TsNIIPromzdaniy*. 1987. 148 p.

Information about the authors

Glagolev, Evgeniy S. PhD, Associate Professor. E-mail: sk31.es@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Received 25.01.2021

Для цитирования:

Глаголев Е.С. 3D-аддитивные строительные технологии. Теория и практика // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 8–14. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14

For citation:

Glagolev E.S. 3D-Additive building technologies. Theory and practice. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 2. Pp. 8–14. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-8-14