

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: shatalova.sv@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Строительная 3D-печать является одной из передовых технологий строительства в эпоху повсеместной цифровизации. Основной идеей строительной печати является создание готового изделия или конструкции одной установкой по заданной цифровой модели. Одним из препятствий на пути широкого внедрения является отсутствие комплексных решений по конструкции печатаемых стен, обеспечивающих выполнение как конструктивных, так и теплотехнических требований, а также отсутствие доступных материалов, позволяющих получать смеси для строительной печати, максимально оптимизированные под особенности 3D-принтера. При этом, важным условием коммерческой привлекательности 3D-технологий является сведение к минимуму первоначальных затрат, а также доступность сырьевой базы, способствующих их освоению малым и средним бизнесом. В статье предлагается комплексное решение по разработке и созданию стеновых конструкций, заключающееся в чередующейся печати одним устройством (в разных режимах) несъёмной опалубки из мелкозернистого бетона с заполнением внутреннего пространства пенобетонной смесью на основе гипсоцементного вяжущего. Данное решение обеспечивает выполнение конструктивных и теплотехнических требований на основе доступных стандартных компонентов (товарных вяжущих), максимально оптимизированных под особенности строительного принтера.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, гипсоцементное вяжущее, реологический технологический индекс, printableность, формоустойчивость.

Введение. Одной из наиболее революционных технологий, способствующей повышению эффективности строительства и экономии всех видов ресурсов в настоящий момент является строительная 3D-печать, постепенно выходящая из лабораторий на строительные площадки.

Строительная печать – это аддитивная технология строительства, которая позволяет получить полноценную строительную конструкцию любой сложности по цифровой модели с использованием одной установки (3D-принтера) из различных материалов в короткие сроки [1].

Основной проблемой масштабного внедрения таких технологий является отсутствие комплексных решений по конструкции печатаемых стен, обеспечивающих выполнение как конструктивных, так и теплотехнических требований, а также недостаток доступных материалов, позволяющих получать смеси для строительной печати, максимально оптимизированные под особенности 3D-принтера. При этом, важным условием коммерческой привлекательности 3D-технологий является сведение к минимуму первоначальных затрат, а также доступность сырьевой базы, способствующих освоению их малым и средним бизнесом, являющимися на данный момент основными проводниками инноваций.

На сегодняшний день значительную научную проработку и практическое применение в области строительной печати получили смеси на

основе портландцементов. Известны исследования, направленные на поиск путей повышения их эффективности за счёт применения комплексов химических и минеральных добавок [2–7], модификации цементной вяжущей основы [8–10], использования особых технологических приёмов их получения [11, 12]. При этом сами используемые цементы отличаются высокой энергоёмкостью получения, а бетоны на их основе зачастую имеют неоптимальные для строительной печати реотехнологические показатели и характеристику нарастания ранней прочности.

В тоже время известны работы [13–15], рассматривающие строительство малоэтажных зданий посредством строительной 3D-печати из гипсовых композиций при соблюдении определенных условий. Однако данные технологические решения сопряжены с повышенным расходом вяжущего (ввиду невысокой марочной прочности) и не всегда достаточной водостойкостью гипса.

Эти недостатки возможно нивелировать применением композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) [16]. Однако, на наш взгляд, присутствие в составе КГВ минеральной добавки, в качестве которой сегодня рекомендуются дорогостоящие товарные продукты (микрокремнезём, метакаолин и др.) либо отходы производств (отходы ММС, бой тяжелого бетона и др.), имеющие непостоянный состав и не обладающие стабильными свойствами, усложняет технологию

производства и повышает стоимость аддитивного строительства, что не выгодно малому бизнесу и выступает сильным демотивирующим фактором освоения данной сферы деятельности.

Исходя из этого, перспективным является применение гипсоцементных вяжущих без дополнительного введения минеральной добавки, путем смешения только двух товарных компонентов - гипсового вяжущего и портландцемента типов ЦЕМ II, ЦЕМ III (имеющих в своём составе минеральные добавки), качество и свойства которых изначально гарантированы производителем. Возможность и эффективность применения данных вяжущих в строительной 3D-печати была рассмотрена ранее [17].

Другой существенной проблемой является обеспечение требуемых теплотехнических показателей стеновой конструкции, возводимой методом 3D-печати, которые на данный момент достижимы только с применением утеплителей. Такие решения идут в разрез с основными идеями 3D печати – созданием готового строительного решения в едином технологическом цикле.

На наш взгляд решением этой проблемы на данном этапе может быть чередующаяся печать одним устройством (в разных режимах) несъёмной опалубки с заполнением внутреннего пространства пенобетонной смесью. Такое решение является удобным в части практической реализации и обеспечивает ряд дополнительных преимуществ: повышение несущей способности конструкции за счёт наличия слоёв конструкционного материала, а также защита поризованного композита от внешних воздействий в процессе эксплуатации и т.п. При этом следует обеспечить совместимость композитов плотного слоя (контура конструкции) и поризованного слоя (заполнения печатного контура) на всех стадиях процесса печати и эксплуатации.

В связи с вышеизложенным, целью исследования стало изучение вопросов получения мелкозернистых бетонов для печати контуров стеновых конструкций и пенобетонов для их заполнения, омоноличивания и теплоизоляции методом 3D-печати на основе гипсоцементных вяжущих, а также исследование их свойств.

Материалы и методы. Сырьевыми компонентами для проведения исследований были выбраны: гипсовое вяжущее α -модификации марки ГВВС-16 (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»); портландцемент (ПЦ) ЦЕМ II/В-III 42,5Н (ООО «Южно-уральская ГПК»); кварцевый песок с $M_{кр}=1,4$ (ООО «Формматериалы», Воронежская обл.); синтетический пенообразователь (ПО) «Пеностром» (ООО «ЩИТ» г. Шебекино,

ТУ 0250-001-22299560-97); замедлитель схватывания PLAST RETARD PE (Италия); суперпластификатор на базе поликарбоксилатов ПК тип R «Полипласт», (Россия); вода (ГОСТ 23732–2011).

Строительная печать пластичными смесями отличается от традиционных технологий и требует новых методов измерения и нормирования особых свойств. Это связано с тем, что требования к этим композитам выходят за рамки традиционного бетоноведения и их оценка известными методами невозможна или не эффективна. В связи с этим определение специальных свойств смесей для строительной печати и осуществлялось с применением, как стандартных методик, так и оригинальных, разработанных и утверждённых в БГТУ им. В.Г. Шухова [18]. К ним относятся: оценка пригодности смеси к печати (принтабельность) и оценка несущей способности свежееотформованного слоя (формоустойчивость).

Для численной оценки степени «печатаемости» авторы [18, 19] предлагают ввести понятие *реологического технологического индекса* смесей (РТИ, RTI), аппаратное обеспечение и методика определения которого будут воспроизводить ключевые особенности реальных процессов. Для определения величины РТИ (RTI) использовали прибор для определения реологического технологического индекса смесей (ПОРТИС) (рис. 1).

Величина реологического технологического индекса смеси соответствует глубине погружения поршня после цикла из 30 встряхиваний с частотой 1 Гц. Глубину погружения поршня определяют как разность между величиной выступа верхней части поршня до и после цикла встряхиваний, измеряемой с погрешностью ± 1 мм.

Определение несущей способности свежееотформованного раствора осуществляют для дисперсных растворных смесей по давлению в граммах на квадратный миллиметр приводящему к 10 % деформации раствора по высоте (при высоте образца 30 мм на 3 мм). Ячейка со смесью помещается на прибор с установленным штампом и контейнером для смеси. Ячейка размещается таким образом, чтобы рёбра штампа были параллельны сторонам ячейки и центрируется относительно него. Нижняя поверхность штампа, предварительно протёртая влажной тканью, подводится к поверхности смеси, и в соответствии с принятым способом осуществляется постепенное нагружение штока. Система нагружения и фиксации усилия должны обеспечивать измерение усилия, оказываемого на смесь, вызвавшего изменение её высоты на 10 % от исходной.



Рис. 1. Прибор для определения реологического технологического индекса смесей (ПОРТИС):
1 – конический корпус; 2 – поршень определенной массы; 3 – столик с отверстиями для выхода смеси;
4 – пружинные фиксаторы

Общий вид системы для определения указанных показателей представлен на рисунке 2.

Большой практический интерес представляет динамика изменения несущей способности

слоя в ранний период времени (0–30 мин), поскольку она лимитирует скорость наращивания высоты конструкции.



Рис. 2. Комплект оборудования и приспособлений для определения несущей способности свежесформованного слоя

Основная часть. Как уже упоминалось ранее, серьезным фактором, сдерживающим развитие строительной 3D-печати, выступает дефицит доступных и эффективных смесей. Составы, применяемые для печати, фактически являются мелкозернистыми бетонами. Однако для успешного формирования слоёв конструкции путём экструдирования они должны сочетать в себе два ключевых специальных, то есть ненормируемых для обычных бетонов, свойства [18]:

принтабельность (печатаемость, экструдирруемость), под которой предлагается понимать

комплекс качественных и количественных характеристик смеси и принтера, которые должны быть обеспечены для переработки смеси в конструкцию или изделие. При неизменных характеристиках и режимах работы самого принтера данное определение может быть сформулировано как: принтабельность – комплекс качественных и количественных характеристик смеси, необходимый для эффективной переработки в конструкцию или изделие;

формоустойчивость, которую предлагается характеризовать двумя взаимодополняющими показателями:

- несущей способностью свежееотформованного слоя;
- временем фиксации структуры, оцениваемым через способность смеси выдерживать определённое количество последовательно уложенных слоёв.

По отдельности эти свойства могут быть легко обеспечены стандартными методами, но особенность составов для 3D-печати заключается именно в их сочетании.

В мелкозернистых бетонных смесях, содержащих более двух частей заполнителя, доля цементного теста сравнительно не велика, обеспечить за счёт регулирования его реологии хороший уровень принтабельности и формоустойчивости крайне затруднительно. Поэтому, на наш взгляд, обязательным условием получения эффективных экономичных составов является вовлечение заполнителя в формирование спецсвойств. Для практической реализации данного тезиса и придания печатаемости и формоустойчивости предполагается использование сочетания двух добавок: пластифицирующей (СП) и воздухововлекающей - пенообразователя (ПО).

Добавка пенообразователя в подобных системах выполняет 3 функции:

- снижает поверхностное натяжение менисков воды между песчинками, контактирующими между собой через минимальные прослойки гипсоцементного теста;
- выступает в роли смазки при перемещении песчинок относительно друг друга в процессе экструдирования;
- создаёт и поддерживает существование многочисленных мелких пузырьков воздуха, соизмеримых по размерам с частицами заполнителя, но имеющих при деформации смеси нулевое трение. То есть две песчинки, разделённые воздушным пузырьком, не могут механически контактировать, и перемещаются друг относительно друга свободно.

Повышение несущей способности свежееотформованного слоя смеси, при ее частичной поризации, обеспечивается тем, что после определённого момента она достаточно быстро утрачивает специальные свойства, существенно раньше начала схватывания вяжущего, что, вероятно, связано с ростом удельной поверхности твёрдой фазы и преадсорбцией значительной доли молекул ПО на вновь сформированную поверхность.

Наиболее очевидным следствием частичной поризации мелкозернистых бетонов для печати контуров конструкций является:

- снижение нагрузки на нижерасположенные слои, ввиду уменьшения массы единичного слоя. Следствием этого может стать возможность последовательной (без перерыва) печати большего количества слоёв, либо увеличение высоты единичного слоя, что также будет способствовать повышению темпов ведения работ;

- увеличение объёма получаемой смеси по сравнению с непоризованным композитом, следствием чего является уменьшение удельной материалоёмкости стеновых конструкций, экономия различных видов ресурсов на разных стадиях жизненного цикла материала.

Негативными аспектами частичной поризации можно считать снижение прочности материала, и как следствие, его долговечности в жёстких режимах эксплуатации.

С учётом рассмотренных аспектов, на основе двухкомпонентных гипсоцементных вяжущих, были разработаны составы мелкозернистого бетона для печати контуров ограждающих конструкций с различным содержанием мелкого заполнителя (1:2, 1:3, 1:4), для которых были определены основные характеристики. Для сравнения был использован состав на цементном вяжущем, придание специальных свойств которому осуществлялось на тех же принципах.

В таблице 1 представлены рецептуры и основные физико-механические характеристики смесей для печати контуров конструкций.

Как видно из представленных данных, повышение доли вяжущего в смеси ведёт к закономерному росту прочности, который, тем не менее, не всегда пропорционален его расходу. Так, переход на состав Вяжущее:Песок = 1:3 взамен 1:4, обеспечивает практически пропорциональный прирост прочности, а с состава 1:4 на 1:2 (двукратное повышение расхода вяжущего) - лишь в 1,72 раза. При этом более богатые составы демонстрируют тенденцию к ощутимому повышению плотности, что свидетельствует о меньшей степени поризации, необходимой для обеспечения принтабельности. Увеличение плотности также приводит к относительно небольшому приросту коэффициента конструктивного качества (ККК), свидетельствуя о меньшей эффективности использования вяжущего в более богатых составах.

Вне зависимости от обеспечиваемых составами прочностных показателей, приоритетным моментом при разработке смесей для строительной печати является их пригодность для подачи в конструкцию с помощью формующего устройства определённого типа. В качестве основного критерия печатаемости (экструдированности) получаемых смесей был принят, предложенный в БГТУ им. В.Г. Шухова, показатель реологического технологического индекса (РТИ) [18].

Таблица 1

Составы и свойства мелкозернистых бетонов для печати контуров конструкций

№ п/п	Состав, масс частей			В/Вяз	Добавки, % от массы вяжущего			ρ , кг/м ³	R1, МПа	R7, МПа	R28, МПа	ККК, 28 сут	Принтабельность (РТИ), мм	F, количество циклов попеременного замораживания и оттаивания
	Г16	ЦЕМ П- (Ш)	Песок		ПО, %	Замедлитель, %	СП, %							
1	0,5	0,5	4	0,4	0,3	0,05	0,6	1639	2,6	4,8	8,2	5	78	–
2			4	0,38	0,3	0,05	0,6	1720	2,9	5,8	10,7	6,2	56	50
3			4	0,35	0,3	0,05	0,6	1815	3,1	6,3	11,1	6,1	22	–
4	0,5	0,5	3	0,38	0,3	0,05	0,6	1980	3,2	8,6	14,6	7,4	64	–
5			3	0,35	0,3	0,05	0,6	2010	3,8	8,8	15,3	7,6	54	55
6			3	0,32	0,3	0,05	0,6	2017	4,0	9,4	14,8	7,3	29	–
7	0,5	0,5	2	0,38	0,3	0,05	0,6	2005	6,3	13,7	17,2	8,6	46	56
8			2	0,35	0,3	0,05	0,6	2049	6,4	14,5	16,9	8,2	28	–
9			2	0,33	0,3	0,05	0,6	2094	6,9	14,7	17,6	8,4	23	–
10К	0	1	4	0,35	0,3	–	0,8	1905	–	9,2	12,7	6,7	55	–

Как видно из таблицы 1, изменение В/Вяз отношения и количества заполнителя при прочих равных условиях оказывает ощутимое влияние на принтабельность смесей – величину реологического технологического индекса (РТИ). Оптимальное значение РТИ смеси, в отсутствие на настоящий момент стандартизации параметров формирующих устройств строительных принтеров, определяется индивидуально для каждой конкретной установки. Для использованного в работе лабораторного строительного принтера наилучшие показатели печати (стабильность подачи, качество трека) достигаются при использовании смесей с величиной РТИ в диапазоне 40...60 мм. При этом работоспособность принтера сохраняется и при применении смесей в расширенном на $\pm 10...15$ мм диапазоне. Однако смеси с РТИ > 60 мм имеют избыточный выход (корректируемый программно) и пониженную несущую способность свежееотформованного слоя (формоустойчивость). Смеси с пониженным РТИ < 40 мм требуют включения вибратора на сопле, а также могут иметь ощутимые изменения показателя выхода в начале и конце работы с замесом.

Следующим важным специальным показателем смесей для строительной печати является формоустойчивость, характеризующая способность свежееуложенной смеси выдерживать собственный вес и вес вышерасположенных слоёв при нормированной величине деформации. Также большой практический интерес представляет динамика изменения несущей способности слоя в ранний период времени (0–30 мин), поскольку она лимитирует скорость наращивания

высоты конструкции. Также следует учитывать, что изучение указанного показателя имеет смысл только для смесей, имеющих требуемый уровень принтабельности. Оценка величины показателя несущей способности свежееотформованного (НССС) слоя производилась также по методике, разработанной в БГТУ им. В.Г. Шухова [18].

На рисунке 3 показаны различия в изменении деформативности смесей в зависимости от вида вяжущего и времени с момента укладки. Значения по оси X соответствуют времени нагружения (с) и степени текущей деформации при скорости процесса 3 мм/с для образцов с высотой 30 мм, находящихся в специальных П-образных формах. Как видно из рисунка, для смесей на основе гипсоцементного вяжущего характерна несколько меньшая исходная несущая способность, по сравнению с составом на основе портландцемента, которая существенно повышается в течение первых 15 мин. Судя по графикам, у цементного состава повышение несущей способности слоя за это время не существенно, и достигается только за счёт тиксотропного загущения, в то время как гипсоцементное вяжущее, при нахождении в состоянии покоя, способно к образованию ранних кристаллических структур. Структурирующее действие в гипсоцементных вяжущих проявляется достаточно для первичной фиксации структуры композита, но не является препятствием для экструирования смеси.

В течение последующих 15 мин несущая способность гипсоцементного композита (рис. 3, а) продолжает прогрессивно нарастать, что обусловлено приближением к моменту схватыва-

ния гипсовой составляющей. Несущая способность цементного композита (рис. 3, б) возрастает по сравнению с начальным значением только в ≈ 3 раза, оставаясь на уровне меньшем

чем, гипсоцементный композит демонстрировал в 15 мин.

На рисунке 4 представлено соотношение несущей способности слоя с количеством слоёв, создающих подобную нагрузку.

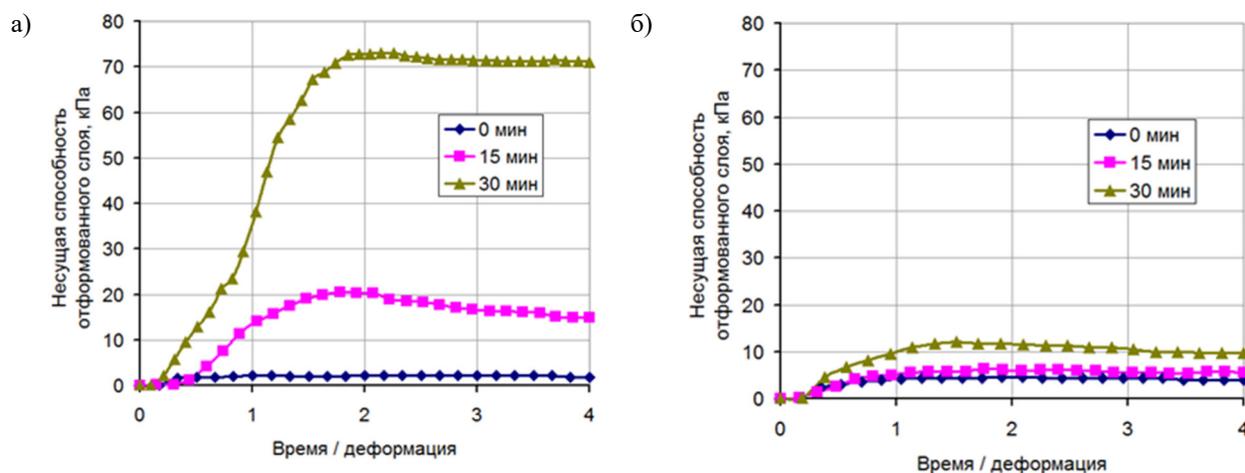
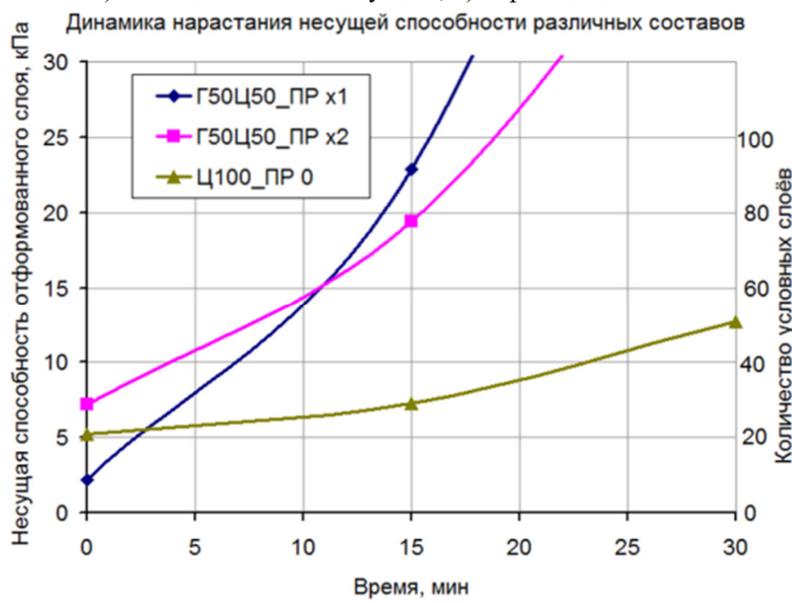


Рис. 3. Кривые сопротивления деформированию смеси для строительной печати (1:4) на основе:
 а) гипсоцементного вяжущего, б) портландцемента



а)



б)

Рис. 4. а) возможная динамика наращивания высоты конструкции при печати смесями на основе цементного (Ц100_ПР 0) и гипсоцементного вяжущего с замедлителем схватывания (Г50Ц50_ПР×1, Г50Ц50_ПР×2) при высоте слоя составляющей 0,7 ширины;

б) результат печати разработанными гипсоцементными составами

Как видно, все рассмотренные составы допускают последовательную укладку от 10 до 30 слоёв с указанными параметрами. Однако следует учитывать, что фактически рекомендуемое значение, по нашему представлению, должно быть уменьшено минимум в 2...2,5 раза. Это связано с тем, что процесс укладки слоёв сопровождается дополнительным давлением выходящей из сопла смеси, наличием усилий в горизонтальной плоскости и вибраций, связанных с перемещением формирующего устройства, эксцентриситетов, возникающих из-за невозможности обеспечить абсолютную соосность укладываемых слоёв. В то же время, при печати реальных конструкций, укладка последующего слоя всегда осуществляется через некоторое время, необходимое для отрисовки всего трека. С учётом неизбежных интервалов между укладкой слоёв и высокой динамикой нарастания несущей способности, смеси на основе гипсоцементного вяжущего пригодны для непрерывного увеличения высоты конструкций даже при использовании строительных принтеров с высокой производительностью и небольших размерах печатаемого объекта (изделия).

На основе гипсоцементных вяжущих также были разработаны составы пенобетонов - для заполнения внутренних полостей и омоноличивания конструкций, при подаче смеси с помощью принтера. Особенностью предложенных решений является применение одинаковой вяжущей композиции и поризующей добавки для получения бетонов разного функционального назначения. Необходимость такого подхода обусловлена упрощением технологического цикла получения разных типов смесей и логистики снабжения сырьём объекта аддитивного строительства, улучшением условий совместной работы двух различных материалов за счёт обеспечения максимальной степени подобия на минералогическом и микроструктурном уровнях, снижения инфильтрации различных агентов между материалами.

Разработка составов пенобетонов осуществлялась с учётом наработок ряда исследователей [20–23].

В таблице 2 представлены физико-механические показатели пенобетона на гипсоцементном вяжущем для омоноличивания аддитивно-возводимых стеновых конструкций. В качестве контрольного выступал состав на основе портландцемента.

Таблица 2

Составы и физико-механические показатели пенобетона на различных вяжущих

№	Вид вяжущего	В/Вяж	ПО, %	Замедл., %	ρ , кг/м ³	R5, МПа	R14, МПа	R28, МПа	λ , Вт/(м·К)
1	Г16 + ЦЕМ II- (Ш)	0,45	0,25	0,05	570	1,32	1,73	2,04	0,13
2		0,57	0,25	0,05	470	0,93	1,27	1,57	0,11
3	ЦЕМ II- (Ш)	0,5	0,25	–	550	0,72	1,42	1,90	0,13

Как видно из таблицы 2, с использованием разработанного вяжущего получены составы пенобетона с плотностью менее 500 кг/м³, с прочностью более 1,5 МПа. Несмотря на то, что данный уровень прочностных показателей не является рекордным для данного типа материалов, следует учитывать, что высокие темпы начального структурообразования в наибольшей степени отвечают требованиям строительной печати, позволяя непрерывно наращивать высоту конструкции без дополнительных перерывов на набор прочности.

В рамках лабораторной апробации технологии печати контурных стеновых конструкций с пенобетонным заполнением на основе гипсоцементных вяжущих была разработана специальная цифровая модель тестового образца, имеющего криволинейные боковые поверхности для демонстрации возможности технологии строительной печати (рис. 5).

В рамках теста на стеклянную подложку осуществлялась печать контурной опалубки, которая состояла из 10 последовательно укладываемых слоёв частично поризованного мелкозернистого бетона.

Высота слоя была принята 15 мм, при диаметре сопла 20 мм и фактической ширине получаемого трека 30...35 мм. Затем, через определённое время, с помощью принтера внутренний объём тестовой модели заполнялся пенобетонной смесью в 4 прохода. При этом, время фиксации структуры для составов на гипсоцементном вяжущем позволяло осуществлять заполнение опалубки пенобетонной смесью непосредственно после окончания печати (с учётом переналадки оборудования).

Таким образом, предлагаемые решения позволяют изготавливать стеновые конструкции из формовочных мелкозернистых и пенобетонных смесей на основе гипсоцементного вяжущего методом строительной 3D-печати для объектов малозэтажного строительства.

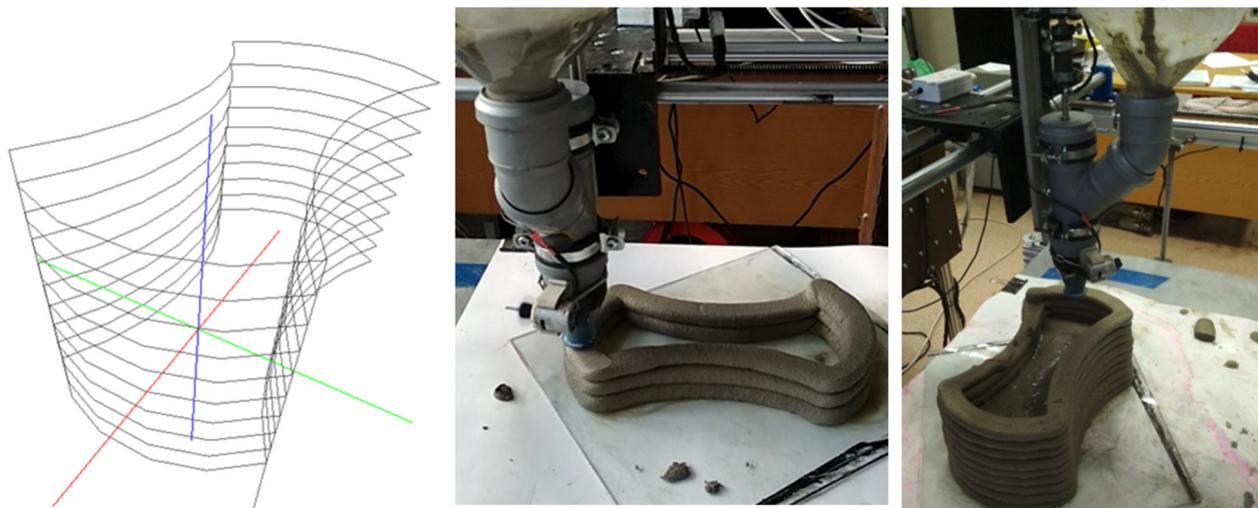


Рис. 5. Модель для тестирования разработанных составов и решений

Выводы.

1. Установлено, что создание в конструкционных мелкозернистых бетонах частичной пористости за счёт введения ПО, при содержании от 2 частей заполнителя, является эффективным способом придания смесям для строительной печати прintrабельности и формоустойчивости.

2. Фиксация структуры конструкционных (условно-плотных) мелкозернистых бетонов в ранний период (до схватывания вяжущего) происходит за счёт переадсорбции части ПО из водного раствора на ранние гидратные фазы, вследствие чего возрастает действие структурирующих капиллярных сил в зонах контакта частиц заполнителя, и несущая способность системы повышается.

3. Предложены составы мелкозернистых формовочных смесей на основе гипсоцементных вяжущих с комплексом химических добавок – пенообразователем, суперпластификатором и замедлителем сроков схватывания для эффективной 3D-печати контуров стеновых конструкций прочностью 10,7–17,2 МПа, средней плотностью 1700–2000 кг/м³, морозостойкостью 50 циклов.

4. Разработаны составы конструкционно-теплоизоляционных пенобетонов на основе гипсоцементных вяжущих для внутреннего заполнения и омоноличивания с характеристиками: средней плотностью 450–570 кг/м³, прочностью 1,5–2 МПа, теплопроводностью 0,11–0,13 Вт/(м·К). Применение для пенобетонов разработанных гипсоцементных вяжущих обеспечивает получение материала с качественной поровой структурой, высокими физико-механическими показателями.

5. Разработано комплексное технологическое решение для строительной 3D-печати, позволяющее изготавливать стеновые конструкции,

удовлетворяющие прочностным и теплотехническим требованиям.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6–14. doi:10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178
2. Khoshnevis B., Hwang D., Yeh Z. Mega-scale fabrication by contour crafting // International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. Vol. 1. №. 3. Pp. 301–320. doi:10.1504/IJISE.2006.009791
3. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. // Automation in Construction. 2013. №. 29. Pp. 50–67. doi:10.1016/J.AUTCON.2012.08.006
4. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and structures. 2012. Vol. 45. №. 8. Pp. 1221–1232. doi:10.1617/s11527-012-9828-z
5. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F. 3D Concrete printing: machine and mix design // International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 6. №. 6. Pp. 48–53.
6. Khalil N. Aouad G., Rémond S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars // Construction and Building

Materials. 2017. Vol. 157. Pp. 382–391. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109

7. Lin J.C., Wu X., Yang W. Application of P.O and R-SAC mortar for 3D printing in construction // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 292. Pp. 79–83. doi:10.1088/1757-899X/292/1/012070

8. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3d-printable materials setting and hardening // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1043 MSF. Pp. 37–42. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.37

9. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S.Ng. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry // Cem. Concr. Res. 112. 2018. Pp. 96–110. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014.

10. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results // J. ASTM Int., 2009. 7 (1). Pp. 1–10.

11. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete // Cem. Concr. Res. 112. 2018. Pp. 86–95. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

12. Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing. // Measurement and physical origin, submitted to Cem. Concr. Res. 2017. Pp. 217–222. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105787

13. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. Materials and Structures. 2008. Vol. 41. №. 4. Pp. 649–662. doi:10.1617/s11527-007-9271-8

14. Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухина А.Е. Уточнение состава сухой строительной смеси для 3d-печати методом математического моделирования // В сборнике трудов конференции European scientific conference, г. Пенза, 30 июля 2017 г. С. 132–138.

15. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3d-печати малоэтажных жи-

лых зданий. Проблемы и перспективы // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 39–44. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44

16. Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю., Моторькин Д.А., Лесниченко Е.Н., Бочарников А.Л. Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 45–52. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52

17. Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintech bit 2020. Innovations and technologies in construction. 2020. 012007. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012007

18. Стандарт организации ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова СТО 02066339-043-2020 «Смеси для получения композитов методом строительной печати на цементном вяжущем». Методы испытаний. Белгород, 2020. 22 с.

19. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Y., Pospelova M.A., Alfimova N.I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete // Materials Science Forum. 2021. T. 1017. C. 71–80. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.71

20. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 128 с.

21. Удачкин И.Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 8–9.

22. Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Неавтоклавный поризованный бетон на основе топливной золы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 2 (10). С. 6–18. doi:10.46573/2658-7459-2021-6-18

23. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Y., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974 MSF. Pp. 125–130. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.974.125

Информация об авторах

Шаталова Светлана Вячеславовна, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Елистраткин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шеремет Алена Анатольевна, ассистент кафедры дизайна архитектурной среды. E-mail: ajiyonka@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.05.2022 г.

© Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А., 2022

***Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: shatalova.sv@yandex.ru*

DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE SOLUTION FOR 3D PRINTING OF WALL STRUCTURES

Abstract. *Construction 3D printing is one of the advanced construction technologies in the era of widespread digitalization. The main idea of construction printing is to create a finished product or structure with one installation according to a given digital model. One of the obstacles to widespread implementation is the lack of integrated solutions for the construction of printed walls, ensuring the fulfillment of both structural and thermal engineering requirements, as well as the lack of available materials that allow obtaining mixtures for construction printing, maximally optimized for the features of a 3D printer. At the same time, an important condition for the commercial attractiveness of 3D technologies is the minimization of initial costs, as well as the availability of raw materials that contribute to their development by small and medium-sized businesses. The article offers a comprehensive solution for the development and creation of wall structures, consisting in alternating printing with one device (in different modes) of a fixed formwork made of fine-grained concrete with filling the interior space with a foam concrete mixture based on gypsum cement binder. This solution ensures the fulfillment of structural and thermal engineering requirements based on available standard components (commodity binders), maximally optimized for the features of the construction printer.*

Keywords: *construction 3D printing, gypsum cement binder, rheotechnological index, printability, shape stability.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for construction printing [Formirovaniye svoystv kompozitsiy dlya stroitel'noy poligrafii]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 6–14. doi:10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178 (rus)
2. Khoshnevis B., Hwang D., Yeh Z. Mega-scale fabrication by contour crafting. International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. Vol. 1. №. 3. Pp. 301–320. doi:10.1504/IJISE.2006.0097913.
3. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. Automation in Construction. 2013. №. 29. Pp. 50–67. doi:10.1016/J.AUTCON.2012.08.006
4. Le T. T., Austin S.A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T. Mix design and fresh prop-

erties for high-performance printing concrete // Materials and structures. 2012. Vol. 45. №. 8. Pp. 1221–1232. doi:10.1617/s11527-012-9828-z

5. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F. 3D Concrete printing: machine and mix design. International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 6. No. 6. Pp. 48–53.

6. Khalil N. Aouad G., Rémond S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157. Pp. 382–391. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109

7. Lin J.C., Wu X., Yang W. Application of P.O and R-SAC mortar for 3D printing in construction. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 292. Pp. 79–83. doi:10.1088/1757-899X/292/1/012070

8. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3d-printable materials setting and hardening. Materials Science Forum. 2021. Vol.

1043 MSF. Pp. 37–42. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.37

9. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S.Ng. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry. *Cem. Concr. Res.* 112. 2018. Pp. 96–110. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014.

10. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results. *J. ASTM Int.*, 2009. 7 (1). Pp. 1–10.

11. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cem. Concr. Res.* 112. 2018. Pp. 86–95. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

12. Keita E., Bessais-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Week bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing. Measurement and physical origin, submitted to *Cem. Concr. Res.* 2017. Pp. 217–222. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105787

13. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. *Materials and Structures.* 2008. Vol. 41. No. 4. Pp. 649–662. doi:10.1617/s11527-007-9271-814.

14. Udodov S.A., Belov F.A., Zolotukhina A.E. Refinement of the composition of dry building mix for 3d printing by mathematical modeling. In the proceedings of the European scientific conference, Penza, July 30, 2017. Pp. 132–138. (rus)

15. Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsyn D.A., Kinzyabulatova D.F., Nedoseko I.V. The use of gypsum compositions in construction 3D printing technologies of low-rise residential buildings. Problems and prospects. *Building materials.* 2021. No. 8. Pp. 39–44. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44 (rus)

16. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezhgova M.Yu., Motorykin D.A., Lesnichenko E.N., Bocharnikov A.L. Composition and rheological properties of molding mixtures on composite gypsum binder [Sostav i reologicheskiye svoystva formovochnykh smesey na kompozitsionnom gipsovom vyazhushchem]. *Building materials.*

2021. No. 8. Pp. 45–52. doi:10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52 (rus)

17. Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintech bit 2020. Innovations and technologies in construction.* 2020. 012007. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012007

18. The standard of the organization of the V.G. Shukhov BSTU STO 02066339-043-2020 "Mixtures for the production of composites by meth of construction printing on cement binder". Test methods [Standart organizatsii V.G. Shukhova BGTU STO 02066339-043-2020 «Smesi dlya proizvodstva kompozitsionnykh materialov metodom stroitel'noy pechati na tsementnom vyazhushchem». *Metody ispytaniy*]. Belgorod, 2020. 22 p. (rus)

19. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Y., Pospelova M.A., Alfimova N.I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete. *Materials Science Forum.* 2021. Vol. 1017. Pp. 71–80. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.71

20. Anikanova T.V., Rakhimbayev Sh.M. Foam concrete for intensive construction technologies [Penobeton dlya intensivnykh tekhnologiy stroitel'stva]: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2015. 128 p. (rus)

21. Udachkin I.B. Key problems of foam concrete production development. *Building materials [Klyuchevyye problemy razvitiya proizvodstva penobetona. Stroitel'nyye materialy]*. 2002. No. 3. Pp. 8–9. (rus)

22. Belov V.V., Barkaya T.R., Gulyaev P.V. Non-autoclave porous concrete based on fuel ash [Nevtoklavnyy yacheisty beton na osnove zoly topliva]. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies.* 2021. No. 2 (10). Pp. 6–18. doi:10.46573/2658-7459-2021-6-18 (rus)

23. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezhgova M.Y., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder. *Materials Science Forum.* 2019. Vol. 974 MSF. Pp. 125–130. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.974.125.

Information about the authors

Shatalova, Svetlana V. Assistant. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernysheva, Natalya V. DSc, Professor E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Valery S. DSc, Professor E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Elistratkin, Michail Y. PhD, Assistant professor. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sheremet, Alena A. Assistant. E-mail: ajiyonka@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 26.05.2022

Для цитирования:

Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А. Разработка комплексного решения для 3d-печати стеновых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

For citation:

Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3d printing of wall structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19