

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.12737/article_5968b44f456809.68526098

*Лесовик В.С., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.,**Елистраткин М.Ю., канд. техн. наук, доц.,**Глаголев Е.С., канд. техн. наук, доц.,**Абсиметов М.В., аспирант,**Шаталова С.В., магистр,**Лесниченко Е.Н., магистрант**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА К СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D ПЕЧАТИ

mr.elistratkin@yandex.ru

Аддитивные технологии или строительная 3D печать, хотя и не обрели на настоящий момент большого практического значения, будут крайне востребованы в самом ближайшем будущем. Об этом свидетельствует обширный положительный опыт их применения в самых разных областях науки и техники. Для успешного внедрения в строительство требуется привести в соответствие показатели послойно изготавливаемых конструкций с предъявляемыми к ним требованиями, наиболее важным из которых является термическое сопротивление. Распространённый способ контурной печати с заполнением полостей теплоизоляционным материалом пока ещё далёк от совершенства. В этой связи актуальной является разработка технологии аддитивного изготовления (печати) полнотелых конструкций из поризованных материалов, в частности, неавтоклавногазобетона.

***Ключевые слова:** строительная 3D печать, неавтоклавный газобетон, управление поризацией, управление схватыванием.*

Введение. Строительная 3D печать или аддитивные (послойные) технологии возведения конструкций в настоящее время являются одним из направлений вызывающим живой интерес, как научного сообщества, так и представителей малого бизнеса, занимающихся производством строительных материалов [1–5].

Это обусловлено действительно заманчивыми перспективами, открываемыми строительной печатью: быстрота, гибкость архитектурных форм, экономия различных видов ресурсов и т.п. В то же время, не смотря на наличие впечатляющих примеров реализации данных технологий как отечественными, так и зарубежными производителями, на наш взгляд, концепция их развития находится в зачаточном состоянии [6–10].

Судя по публикациям, основное внимание разработчиков систем строительной печати сконцентрировано на способе экструдирования пластичных смесей, перекликающимся с печатью термопластиком в настольных 3d принтерах. Привлекательным в данном способе является простота его технической реализации и лёгкость создания объектов сложной конфигурации [11–14].

В тоже время можно отметить ряд серьёзных моментов, требующих совершенствования. Во-первых, сложные требования к реологии формовочных смесей и кинетике набора прочности.

Формовочная масса, с одной стороны, должна быть пластична для экструдирования, с другой стороны должна сохранять форму после укладки в конструкцию и быстро набирать первоначальную прочность для восприятия нагрузки от последующих наносимых слоёв. Как правило, данный вопрос решается за счёт применения комплекса добавок и повышенного расхода вяжущего, что обуславливает высокую стоимость расходных материалов для печати.

Во-вторых, поскольку для экструдирования используются непоризованные смеси, возникает вопрос о формировании требуемых теплотехнических показателей ограждающих конструкций. В качестве решения, производители оборудования предлагают печатать сотоподобные конструкции, с последующим заполнением внутренних полостей высокопористыми материалами, например, пенобетоном. Такой подход противоречит идеологии 3d печати в части получения полностью готовых объектов с помощью одного устройства, не решает вопрос мостиков холода, существенно повышает протяжённость треков перемещения формирующего устройства, понижая производительность системы.

В связи с этим, на наш взгляд, следует уделить большее внимание адаптации технологий традиционных материалов, нашедших широкое

применение на практике, досконально изученных и подтвердивших свою эффективность. Одним из таких материалов является ячеистый бетон.

Методология. Физико-механические показатели поризованных материалов и свойства композиционных вяжущих определялись по стандартным методикам, с обязательным условием обеспечения сопоставимости результатов.

Получение композиционных вяжущих производилось смешиванием 60 % (масс.) товарного бездобавочного портландцемента с минеральной добавкой оптимального состава, предварительно измельчённой до 500...520 м²/кг.

Сохранность во времени свойств формовочных газобетонных смесей оценивалась визуально.

Момент схватывания газобетонной массы определялся по способности выдерживать помещённую на его поверхность груз массой 10 г с диаметром основания 10 мм, что примерно соответствует нагрузке 130 кг/м².

Основная часть. Из существующих разновидностей ячеистых бетонов для 3d аддитивных технологий потенциально применимы его неавтоклавные виды. Пено- и газотехнологии имеют свои сильные и слабые стороны, однако в данной работе акцент сделан именно на неавтоклавный газобетон [15–16].

Основными предпосылками разработки вопросов технологии газобетона аддитивного формования, применительно к возведению ограждающих конструкций зданий, на наш взгляд являются следующие:

1. Формирование всей или значительной толщины конструкции из высокопористого материала решает вопросы обеспечения её требуемого термического сопротивления, освобождая от необходимости применять другие материалы в качестве утеплителя. Также в значительной степени касается и вопросов шумоизоляции.

2. Положительный баланс объёмов укладываемой формирующим устройством исходной (непоризованной) газобетонной смеси к полученному итоговому объёму конструкции. В процессе вспучивания материал увеличивается в объёме до 2,5...3 раз. Соответственно при одинаковой нагрузке формирующего устройства обычной и непоризованной газобетонной смесью, в последнем случае его производительность будет в 2...3 раза выше.

3. Уменьшенная толщина наносимого в один проход слоя материала (с учётом его последующей поризации) снижает нагрузку на ранее отформованные слои конструкции, уменьшая вероятность их деформирования и повышая производительность системы.

4. Пониженная теплопроводность поризованных систем способствует максимальному использованию теплоты экзотермических реакций вяжущих для ускорения процессов гидратации.

В тоже время очевидно и наличие следующих узких мест:

1. Пониженные прочностные показатели пористых структур по сравнению с плотными. При обеспечении уровня прочности послойно-отформованного газобетона сопоставимого с традиционным, данный момент не может служить серьёзным ограничением, поскольку, в отличие от топодобных конструкций (контурная печать), сформированных высокопрочным мелкозернистым бетоном, площадь сечения сплошных стен во много раз больше и способна воспринимать нагрузки характерные для малоэтажных зданий.

2. Плохая потенциальная приспособленность газобетонных смесей для печати конструкций сложной конфигурации.

3. Необходимость обеспечения сохранности формовочной смеси, загружаемой в расходный бункер формовочного устройства, до полной его выработки, и инициации процесса вспучивания непосредственно после укладки в конструкцию.

Как известно, классическая технология неавтоклавного газобетона заключается в поризации формовочной массы, состоящей из вяжущего вещества, наполнителей и, в некоторых случаях, мелкого заполнителя, водородом, образующимся при взаимодействии газообразователя (алюминиевой пудры или пасты) со щёлочью (гидроксидом кальция или натрия). Реакция газообразования протекает при любых положительных температурах, однако наиболее благоприятная скорость газовыделения имеет место в диапазоне 35...45 °С. При более высоких температурах резко ускоряются процессы структурообразования смесей на основе портландцемента, что может привести к преждевременной потере подвижности вспучиваемой массы. На наш взгляд лучшей заменой портландцементу, в подобных случаях, являются композиционные вяжущие. Способы и составы их получения на основе местного сырья, возможность их применения в технологиях различных материалов достаточно подробно изучены в целом ряде работ [17–19]. Такое решение даёт исследователю эффективные инструменты целенаправленного формирования их свойств в соответствии с решаемой задачей.

Главным аспектом адаптации технологии газобетона к особенностям строительной печати, на наш взгляд, является разделение формовочной массы на две составляющих:

– основную – раствор содержащий вяжущее, наполнители, заполнители и часть воды, однако не способный к самопроизвольной поризации;

– активирующую – комплекс добавок, обеспечивающий устойчивое протекание реакции газовой выделения и фиксацию полученной пористой структуры.

Смешивание данных двух составляющих частей должно происходить непосредственно в формующем устройстве перед укладкой массы в конструкцию, где и должно происходить вспучивание. Такой подход позволяет гармонизировать технические требования работы устройств послойного формования и физико-химические процессы протекающие в формовочной массе, без существенного усложнения технологии и излишних затрат.

В ходе предварительных экспериментов были опробованы различные схемы реализации предложенного подхода, были выявлены наиболее перспективные:

1. Исключение из формовочной массы части воды и газообразующего компонента, с установлением её температуры на уровне 20...30 °С, что обеспечивает сохранность (восстановимость) её основных свойств в течение более 30 мин. Активация процесса вспучивания производится введением суспензии газообразователя, желателно в горячем виде, с непродолжительным интенсивным перемешиванием смеси. Укладка должна производиться достаточно тонкими слоями, так как для окончательного разогрева применялись ИК-лампы, обеспечивающие прогрев формовочной массы до температуры 40...45 °С за 20...40 с.

2. Исключение из формовочной массы части воды и щелочного компонента (NaOH). Полученная смесь с температурой 20...25 °С, содержащая

газообразователь, имела приемлемую консистенцию и была пригодна к введению активатора на протяжении 25...30 мин. При этом наблюдалось некоторое самопроизвольное увеличение объёма массы не более чем на 5...10% к концу времени хранения, что, на наш взгляд, не является препятствием для практического применения данной схемы. Вероятно, что наличие в смеси зародышей газовых пузырьков к моменту введению активатора благоприятно влияет на динамику процесса поризации материала. Активация смеси производилась перемешиванием смеси с последовательным введением порции горячей воды и необходимой дозы горячего раствора гидроксида натрия. В результате смесь приобретала температуру 40...45 °С, полностью восстанавливала свою подвижность и вспучивалась в течение 5...8 мин.

Влияние дозировки NaOH на плотность получаемого газобетона показана на рис. 1 а. Как видно из графика интенсивное падение плотности начинается после прохождения точки 1 % гидроксида натрия от массы композиционного вяжущего. Увеличение дозировки до 2 % существенно повышает скорость протекания процесса поризации, делая его менее зависимым от различных неблагоприятных внешних факторов, однако повышается вероятность возникновения высолов на поверхности отформованной конструкции в процессе эксплуатации и потенциального негативного влияния щелочей на органические отделочные составы. Для дальнейших исследований была принята дозировка щелочного активатора 1...1,5 %.

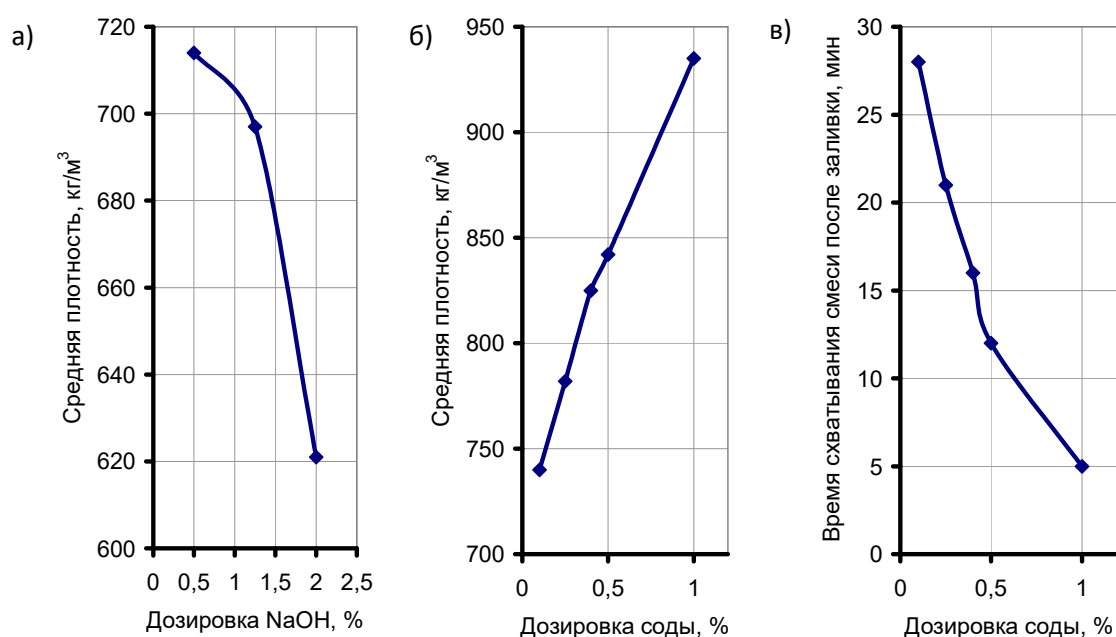


Рис. 1. Зависимость показателей газобетона от различных параметров

Ещё одной проблемой, присущей не только разработанным составам газобетона, но и непоризуемых масс для 3D печати, является достаточно продолжительное время схватывания и низкая скорость набора первоначальной прочности, необходимой для фиксации полученной структуры и укладки последующих слоёв. Разделение формовочной массы на две составляющих, позволяет использовать для решения этой проблемы сильные ускорители схватывания, такие, например, как питьевая сода, введение которых в обычном порядке (при первоначальном приготовлении смеси) затруднено излишне быстрым загустеванием.

Как видно из графиков (рис. 1 б, в) количество вводимого ускорителя практически линейно отражается на средней плотности и времени схватывания поризованного материала. При продолжительности протекания активной фазы процесса поризации материала 5...7 мин после ввода активатора, время схватывания смеси, учитывая постепенное развитие этого процесса, на наш взгляд, должно составлять не менее 10 мин, что соответствует дозировке питьевой соды не более 0,7% от массы композиционного вяжущего.

При средней плотности непоризованной формовочной смеси 2300 кг/м³, несущая способность газобетона после схватывания, фиксируемого по описанной выше методике, позволяет укладывать его слоями до 5...5,5 см, что после вспучивания обеспечит формирование слоя материала 10...15 см (в зависимости от средней плотности). Предлагаемая схема позволяет применять любые другие добавки эффективно регулирующие сроки схватывания и скорость нарастания пластической прочности материала.

В настоящий момент ведётся разработка формующего устройства для работы с газобетоном для лабораторного строительного принтера. При этом учитывается, что серьёзной технической проблемой является высокая начальная текучесть формовочной смеси, довольно быстро утрачиваемая ею в ходе вспучивания под действием ускорителя схватывания. На наш взгляд необходимостью является оснащение формующего устройства скользящими поддерживающими щитками, препятствующими первоначальному растеканию смеси в зоне выгрузки и вспучивания. Также данной цели может служить регулирование реологических характеристик формовочных масс, в частности повышение предела текучести, которое возможно осуществить рациональным выбором минеральной добавки в составе композиционного вяжущего [19–22].

Выводы. Предлагаемые схемы адаптации технологии неавтоклавного газобетона под 3D аддитивные технологии, содержат достаточно эффективные инструменты для управления процессами структурообразования, что всегда позво-

лит найти позитивный компромисс между параметрами работы формующего устройства, поведением формовочной смеси и показателями конечного материала.

Освоение технологии строительной печати поризованными составами позволит расширить её возможности, сблизив их с реально существующими потребностями, а именно формирования полнотелых конструкций с необходимыми теплотехническими показателями. Существенно расширив, тем самым, возможности строительной 3D печати, приблизив её возможности к реально существующим потребностям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвинцева Е. Битва за 3D: приживутся ли в России «напечатанные» дома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2016. Т. 9-10. С. 48–49.
2. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород, 2016. 286 с.
3. Ивасюта А.В., Иванов Н.А. Перспективы использования технологии 3d-печати при строительстве зданий и сооружений // Научное обозрение. 2016. № 9. С. 52–55.
4. Роцин В.А., Гнездилов С.Г. Применение объемной печати в строительстве // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 4. С. 16–21.
5. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калюшина С.В. Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 90–101.
6. Пермяков М.Б., Пермяков А.Ф., Давыдова А.М. Аддитивные технологии в строительстве // European Research. 2017. № 1 (24). С. 14–15.
7. Руднев И.В., Жаданов В.И., Соболев М.М. Аддитивные технологии в строительстве. Проблемы и перспективы // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. 2017. С. 932–935.
8. 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.
9. Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В. Влияние развития 3d-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-12. С. 2673–2676.
10. Обелова В.С., Круталевич С.Ю. Обзор строительных проектов, реализованных аддитивными технологиями // В сборнике: Дизайн и искусство - стратегия проектной культуры XXI века

(ДИСК-2016) сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей. 2016. С. 87–90.

11. Савицкий Н.В., Шатов С.В., Ожищенко О.А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры, 2016, № 3 (216). С. 18–26

12. Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Дребезгова М.Ю., Ермолаева А.Э. 3D-аддитивные технологии в сфере строительства // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 157–167.

13. Герасимов М.Д., Горшков П.С., Бражник Ю.В., Грудина В.А. Разработка предложений по использованию вариаций насадок (сопел) для строительного 3d принтера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 89–97.

14. Далинчук В.С., Власенко Д.А. Основные аспекты печати домов с помощью 3d принтера // Инновационное развитие. 2016. № 2 (2). С. 6–13.

15. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Сулейманов А.Г., Кара К.А. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих для энергоэффективного строительства // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 47–52.

16. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Реологические свойства газобетонной смеси на основе нетрадиционного сырья // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №3. С. 45–48.

17. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Савин А.В., Шадский Е.Е. Перспективы применения композиционных вяжущих при производстве железобетонных изделий // Вестник Иркутского

государственного технического университета. 2014. №5 (88). С. 95–99.

18. Вешнякова Л. А., Фролова М.А., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Михайлова О.Н., Махова Т.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 53–55.

19. Куприна А.А., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Гинзбург А.В. Композиционные вяжущие для эффективных строительных растворов [Электронный ресурс] // Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук, Баженова Юрия Михайловича. Белгород. 2015.

20. Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухина А.Е. 3d-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей // В сборнике: International innovation research Сборник статей победителей VI Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Г.Ю. Гуляева. 2017. С. 58–61.

21. Красикова О.В. Разработка цементных смесей с добавками на основе минеральной базы республики марий эл для печати строительных конструкций различного назначения для малоформатных 3d-принтеров // В сборнике: Интеллектуальная собственность и современные техника и технологии для развития экономики материалы IV республиканской молодежной научно-практической конференции в рамках Всероссийского студенческого форума «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России». 2016. С. 42–45.

22. Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Особенности формирования требований к строительнотехническим характеристикам бетонных смесей для 3d-печати // В сборнике: Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016) материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых. 2016. С. 407–410.

**Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Lesnichenko E.N.
NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE TECHNOLOGY ADAPTATION
TO THE 3D CONSTRUCTION PRINT**

Although additive technologies or 3D construction printing are at the moment not of great practical importance, it will be in high demand in the nearest future. This is evidenced by the extensive positive experience of their application in various fields of science and technology. For successful implementation in construction it is required to bring the indicators of layered fabricated structures into compliance with the requirements imposed on them, the most important of which is the thermal resistance. A common method of contour printing with the filling of cavities with thermal insulation material is still far from perfect. In this regard the technology of solid structures made of porous materials in particular non-autoclaved aerated concrete additive manufacturing (printing) development is important today.

Key words: 3D construction printing, non-autoclaved aerated concrete, porous control, hardening management.

Лесовик Валерий Станиславович, член-корр. РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: naukavs@mail.ru

Елистраткин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

Глаголев Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: bolotin@belregion.ru

Абсиметов Максим Владимирович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: absimetovmv@gmail.com

Шаталова Светлана Вячеславовна, магистр кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: shatalova.sv@yandex.ru

Лесниченко Евгений Николаевич, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: lesnichencko.zhenia@yandex.ru