

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ В МАССОВОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ахтямова Эльза Робертовна
инженер-технолог

Кропачев Роман Васильевич
генеральный директор

ООО «КР-ТРЕЙДИНГ», Казань

Аннотация. В статье описана технология строительства методом трехмерной печати. Цель работы – определить основные преимущества и недостатки метода в сравнении с традиционным способом строительства, а также сделать выводы о перспективности метода и направлениях развития. В работе уделяется внимание истории развития 3D-печати, принципу работы оборудования и разработке строительных смесей для печати.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, 3D-печать бетоном, аддитивное производство, строительный 3D-принтер.

Введение

Строительная отрасль считается одной из крупнейших отраслей страны и составляет порядка 8 % ВВП России. Ключевым строительным материалом этой сферы является бетон – это один из наиболее используемых строительных материалов в мире. Его популярность объясняется низкой ценой и доступностью сырья, прочностью, огнестойкостью и возможностью получать изделия практически любых форм. Строитель-

ный бетон изготавливается из цемента, воды наполнителей (например, песка, гравия) и добавок в различных пропорциях, что позволяет регулировать свойства конструкции.

Способов производства бетонных конструкций немного. Чаще всего бетон заливают в опалубку, распределяют и уплотняют его внутри. Это вызывает ряд проблем:

- Затраты труда. Это способ изготовления бетона требует значительных затрат труда при изготовлении формы, размещения арматуры (для железобетонных изделий). Опалубки не всегда можно использовать повторно. Например, формы из пенополистирола используются только один раз. Многоцветные опалубки после использования необходимо очищать и обрабатывать, что также очень трудоемко.
- Воздействие на здоровье рабочих. Потенциальную опасность представляют риск раздражения глаз, кожи, дыхательных путей, перенапряжение и статичные позы, химические ожоги. Также рабочие страдают от сбоев в работе оборудования, несчастных случаев и ненадлежащего соблюдения правил безопасности.
- Ограниченность геометрических форм. В связи с трудоемкостью изготовления опалубок для сложных геометрических форм, предпочтение отдается простым конструкциям, вследствие чего происходит неполная реализация уникальной дизайнерской мысли.
- Значительное количество строительных отходов. Место строительства во время работ превращается в свалку. По данным Европейской ассоциации по сносу зданий (EDA), ежегодно на планете образуется около 2,5 млрд. тонн строительных отходов [1].
- Необходимость уплотнения бетона. Обычно жесткие строительные смеси укладывают в опалубку и подвергают виброобработке для уплотнения. Это может привести к расслоению смеси, занимает много времени и требует специального оборудования. Проблема

решается использованием самоуплотняющихся бетонов, но они также требуют применения опалубок.

Альтернативой традиционным методам строительства может стать перспективное направление с большим потенциалом для совершенствования – это аддитивное производство. Аддитивное производство – это вид технологий производства объектов по трехмерной компьютерной модели. Материал, как правило, наносится послойно с помощью так называемого 3D-принтера. Метод позволяет изготавливать конструкции сложных форм при минимальном участии человека. В России, как и в мире в целом, этот вид строительства находится в зачаточном состоянии, хотя технология не новая.

История развития метода

Исследования в области трехмерной печати в строительстве начались еще в 1990-х годах. В 50-х годах была разработана роботизированная установка, выкладывающая кирпичи. В 60-х появился аппарат, выдавливающий цемент и работавший на изоциановой пене. В то время технология была непроработанной и не получила распространения. Лишь в 80-90-х годах в Японии появился роботизированный метод строительства, приближенный к современной 3D-печати зданий. В 1995 году была ранняя разработка Джозефа Пегна, она концентрировалась на создании техники формирования смеси песка и цемента, который можно было укладывать слоями [2]. Для селективного связывания материала использовался пар, но метод так и не был продемонстрирован. Однако примерно в это же время был запатентован метод доктора Бехрока Хошневиса (Университет Южной Калифорнии), который он назвал его контурной печатью (Contour Crafting) [3]. Новизна его разработок была в том, что он адаптировал шпатели для 3D-печати. Так появилась система, в которой два шпателя были прикреплены к соплу, выкладывающему бетон. Инновация значительно улучшила скорость создания объек-

тов и качество поверхности, и на сегодняшний день большинство конструкций аддитивного производства по всему миру создается именно послойной печатью. С того момента технология набирала популярность у разработчиков, строителей и архитекторов.

Помимо Хошневиса, новаторские исследования проводил Loughborough University, компании Winsun (Шанхай, Китай) и Total Kustom (Миннесота, США). Институт передовой архитектуры в Каталонии (IAAC) в 2014 году представил альтернативу строительству одиночными роботами. Вместо одного крупного устройства разработчики использовали группу небольших роботов, применяющих технологию сенсорного анализа для определения относительного положения для слаженной работы.

Развитие 3D-печати можно наглядно увидеть на инфографике (рис. 1), созданном в 2015 года Лангенбергом [4]. Схема представляет карту, где разработки связаны с местоположением, временем и материалом конструкции. Как видно, на графике, в 2012 году происходит поворотный момент. Число разрабатываемых объектов 3D-печати многократно увеличивается, превращая линейное развитие событий в экспоненциальное.

По прогнозам Markets and Markets, рынок 3D-печати продолжит свой рост во всем мире [5]. Трехмерная бетонная печать позволяет уменьшить количество строительных отходов на 30-60 %, может сократить время производства на 50-70 % и снизить затраты рабочей силы на 50-80 %. Агентство предполагает, что мировой рынок 3D-печати бетоном вырастет до 56,4 миллионов долларов к 2021 году.

Технология

Принцип работы заключается в экструзии (выдавливании) слой за слоем бетона по заданной трехмерной компьютерной модели. Бетон смешивается с водой и различными добавками и закачивается в шланг с помощью смесительного насоса. Шланг подсоединен к головке принтера,

расположенной в конце рычага робота. Под давлением насоса бетон подается к головке принтера. Конечная часть головки – сопло, из которого бетонная нить выходит из принтера и наносится на поверхность печати.

Производители экспериментируют с формой и размерами отверстий сопла, чтобы получить оптимальную по характеристикам нить. Так, например, Eindhoven University of Technology изначально использовали круглое отверстие диаметром 25 мм (пример – рис. 3), но круглую нить было трудно наслаивать. Затем использовали квадрат со стороной 25 мм, что было проще наслаивать, но в этом случае движение головки принтера приходилось ориентировать по касательной к траектории инструмента, иначе происходило скручивание нити. В конечном итоге разработчики остановились на отверстии 40×10 мм [27] (пример – рис. 2).

Большинство строительных принтеров имеют сопло с отверстием от одного до нескольких сантиметров в длину и в ширину. Например, Total Kustom работает с соплом 30×10 мм [6]. Бетонный принтер Loughborough University печатает через круглое отверстие диаметром 6-20 мм, укладывая слои шириной 6-25 мм [7]. Contour Crafting представила на симпозиуме стену, напечатанную слоем в 13 мм через сопло диаметром 15 мм [8]. Печать через круглое сопло упрощается тем, что направление движения устройства не зависит от направления осаждения. Для прямоугольных отверстий, напротив, требуется дополнительная ось вращения сопла.

В настоящий момент разработаны 3D-принтеры, которые могут построить здание высотой 6 м за несколько часов. Так, например, компания Winsun возвела особняк площадью 1100 кв. м всего за один день печати и двух дней сборки, для этого понадобилось всего трое рабочих. Как многие объекты аддитивного производства, здания конструировались слой за слоем из смеси, состоящей из цемента, песка, волокон и запатентованных добавок. Скорость строительства и низкие трудозатраты позволили создавать максимально доступные по цене дома – первые

10 объектов стоили немногим больше 3000\$. К 2017 году компания продала более 100 напечатанных домов [9].



Рис. 2. Строительный принтер TU/e

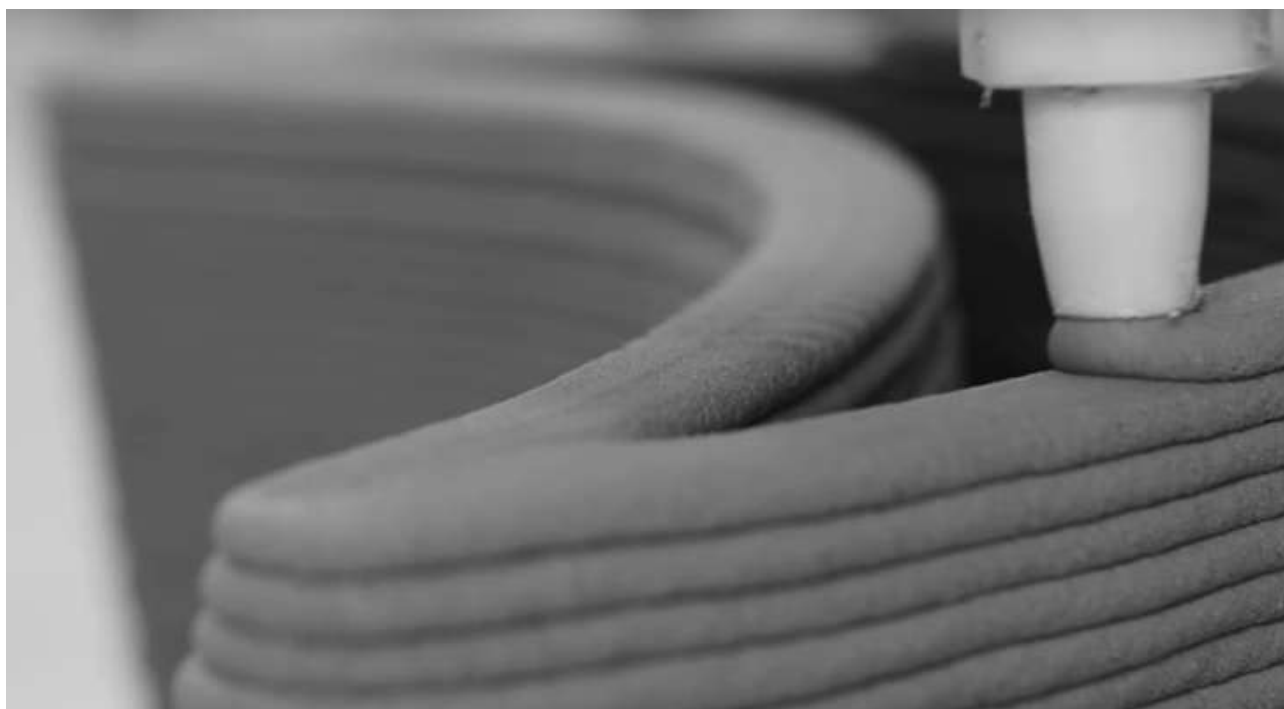


Рис. 3. Строительный принтер WASP

Перечислим самые выдающиеся объекты, созданные с помощью 3D-печати:

- Двухэтажное здание в Китае площадью 400 кв м было возведено в 2016 году всего за 45 дней (рис. 4). На строительство было затрачено 200 т бетона, а толщина стен составляла 25 см [10].



Рис. 4. Двухэтажное здание в Китае

- Офисное здание в Дубае площадью 250 кв. м было построено в 2015 году (рис. 5). В общей сложности для строительства потребовалось 17 дней и 140 000\$ [11].
- Отделка отеля Suite на Филиппинах размером 12,5*10,5*4 м – она закончилась в конце 2015 года [6] (рис. 6).
- - Два пятиэтажных жилых дома в Сучжоу (Китай) площадью 1100 кв м, построенных в 2015 году, стали следующим шагом от небольших объектов к более крупным (рис. 7).



Рис. 5. Офисное здание в Дубае



Рис. 6. Отделка отеля Suite на Филиппинах



Рис. 7. Пятиэтажный жилой дом в Китае

- Первое одобренное в Европе здание было возведено всего за один день в Копенгагене в конце 2017 года [12] (рис. 8). Площадь у объекта небольшая – всего 50 кв. м, но в связи со строгими строительными стандартами 3D-печать в Европе развивается медленнее.
- В конце 2016 года в Мадриде (Испания) был возведен первый пешеходный мост в парке Алькобендас (рис. 9). Его длина – 12 м, ширина 1,75 м.
- В 2017 году началось грандиозное строительство здания в форме ленты Мебиуса в Амстердаме (рис. 10). Объект площадью около 1100 кв. м может быть использован, как выставочная площадка [13].



Рис. 8. Первое одобренное здание в Европе



Рис. 9. Пешеходный мост в Испании

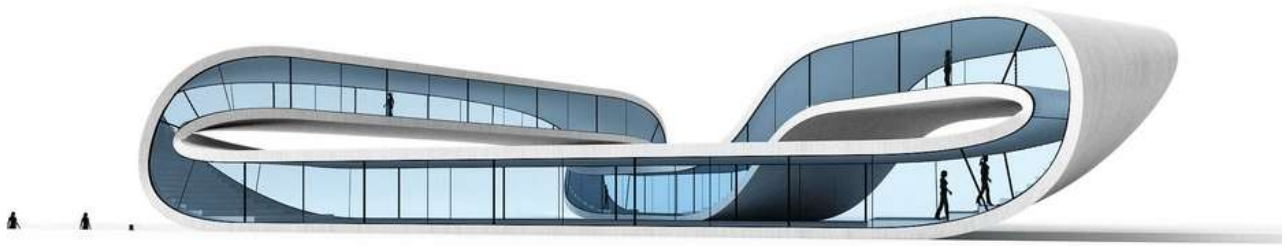


Рис. 10. Проект здания в Амстердаме

- В 2016 году недалеко от Москвы было построено самое известное «напечатанное» здание в России (рис. 11). Объект площадью 38 кв. м был создан всего за 24 часа и, согласно отчету Apis Cor, с учетом полной внутренней отделки и техники от Samsung обошелся всего в 10 134 \$ [14].



Рис. 11. Напечатанный дом в Сколково

- В конце 2017 года был построен первый «напечатанный» жилой дом в России (рис. 12). Строение располагается в Ярославле и занимает 298,5 кв. м. Коробка здания была отпечатана за один месяц в 2015 году, но возведение крыши и внутренняя отделка были закончены только через два года [15].



Рис. 12. Напечатанный дом в Ярославле

Виды строительных 3D-принтеров

Как мы уже писали выше, 3D-принтер – самостоятельный механизм, не требующий установки опалубок. Для постройки здания нужна только готовая компьютерная модель, быстротвердеющий бетон и ровная рабочая зона. Большинство из них печатают по единому принципу – путем наслоения бетонной смеси, выдавливаемой из сопла экструдера. Но есть исключения, например, принтеры D-Shape печатают наслоением

порошкового материала с последующим связыванием по всей ширине установки.

3D-принтеры отличаются размерами и конструкцией. Различают несколько видов строительных принтеров:

- Портальные принтеры – установки размером до 20 м. Оборудование представляет раму, по которой движется головка по осям X/Y. В них обычно используется три портала для поддержки головки. Порталы перемещаются с помощью шаговых двигателей, обеспечивающих наибольшую точность. Они предназначены для печати зданий по частям в цеху или целиком изнутри возводимого здания.
- Принтер типа «дельта», в отличие от портальных установок, не зависят от трехмерных направляющих и поэтому могут печатать более сложные фигуры. Здесь печатная головка подвешивается на тонких рычагах, которые крепятся к вертикальным направляющим.
- Минироботы IAAC – группа роботов, которые подключены шлангами к основному роботу и получают от него материал для печати. Это разработка достаточно уникальна, ее реализовал Институт прогрессивной архитектуры Каталонии (Испания). Интересно, что минироботы могут печатать не только стены, но и потолок [16].
- Принтер D-Shape, в отличие от предыдущих установок, не печатает стены наслаиванием нитей. Здесь наслаивают сухой порошковый материал, каждый его слой укладывается на желаемую толщину и уплотняется. Затем из сопла, установленного на портальной раме, наносится связующее вещество. В свою очередь, завершенная деталь вырывается из рыхлого порошка [7].

Бетонные смеси

Бетон для строительной печати должен подходить для экструзии через печатающую головку, которая выдавливает нити. Нити предыдущего слоя должны связываться с нитями следующего слоя для образо-

вания монолитной композиции. При этом бетон должен укладываться правильными ровными слоями, не растекаясь, и быть достаточно жестким, чтобы поддерживать следующие слои. Эта жесткость должна сочетаться со сниженным временем схватывания – накладываемые слои должны оставаться химически активными, чтобы образовывать единую структуру в месте соприкосновения [17]. Снижение скорости схватывания необходимо и для слаженной работы оборудования – так оно не будет забиваться затвердевающим бетоном.

Для печати используют мелкозернистые смеси, которые отличаются от традиционного бетона, каждая компания разрабатывает свою рецептуру, которая соответствует устройству принтера и его сопла, а также, производимого изделия. Самые важные параметры бетона для 3D-принтера – это прочность, скорость набора прочности, пластичность. Необходимую прочность бетона подбирается регулированием состава смеси – количества цемента и качества заполнителей, а также добавками суперпластификаторов. Пластифицирующие вещества значительно увеличивают подвижность смеси и уменьшают водоцементное отношение, что значительно повышает прочность бетона.

Loughborough University еще в 2012 году подробно описала работу по подбору оптимального состава бетонной смеси. На этом примере можно проследить определение основных параметров для свежей цементной смеси. Целью разработчиков было подобрать состав бетона с прочностью на сжатие 100 МПа и прочностью на изгиб 12 МПа на 28 день. Печать проводилась на порталном принтере с отверстием сопла 9 мм. Строительные смеси оценивались по четырем параметрам: экструдированность, удобоукладываемость, способность к сборке (buildability) и время действия (open time). Хорошая экструдированность достигалась так же, как при создании самоуплотняющегося и напыляемого бетона. При соблюдении этого условия, получались правильные самоуплотняющиеся нити с овальным поперечным сечением. Сложнее подобрать состав,

подходящий для сборки, – он достигался путем регулирования удобоукладываемости и пропорций смеси, а также от изменения удобоукладываемости с течением времени (время действия). Здесь разработчики столкнулись с дилеммой – способность к сборке требовала долгого времени действия, в противном случае смесь быстро теряет удобоукладываемость, что снижает скорость экструзии и может привести к блокировке оборудования. С другой стороны высокое время действия может привести к деформации нитей.

Под 9 мм ширину сопла выбрали песок с крупностью 2 мм. Связующим сырьем служил цемент первой группы, летучая зола и микрокремнезем. Для снижения водоцементного отношения, увеличения удобоукладываемости и повышения прочности использовался поликарбонатный суперпластификатор. Замедление схватывания осуществлялось с помощью нитротриметилфосфоновой и лимонной кислоты формальдегида – эти добавки необходимы для увеличения времени действия и облегчения постоянного потока во время печати. В смеси также применялся ускоритель твердения в виде смеси серной кислоты, соли алюминия и диэтаноламина. Для уменьшения усадки и предотвращения деформации в пластичном состоянии в смесь добавляли полипропиленовое волокно (длина 12 мм, диаметр 0,18 мм).

Всего было протестировано пять композиций с разным соотношением основных компонентов – песка, цемента, летучей золы, микрокремнезема и воды. Наилучшие параметры по выявленным четырем критериям были у смеси с В/Ц = 0,26 и составом связующего – 70 % цемента, 20 % летучей золы и 10 % микрокремнезема, 1,2 кг/м³ микропропиленовых волокон. Соотношение связующих компонентов к песку – 40 : 60. В смесь добавили 1 % суперпластификатора, 0,5 % замедлителя – с их помощью удалось достичь времени действия в 100 минут. Прочность на сжатие на 28 день составляла 110 МПа [17].

До этого исследования, в 2011 году Loughborough University описывала состав на основе цемента и гипса, но из-за большого количества пустот прочность получилась ниже – 80-88 МПа. Есть также упоминания о том, что компания Winsun в 2014 году использовала для печати высококачественный цемент и стеклянные волокна [18].

Contour Crafting в 2015 году проводила свои испытания строительного принтера с бетонной смесью, состоящей из цемента (CEM II A 42.5 R), песка разной степени крупности, летучей золы, микрокремнезема и суперпластификатора. Прочность после пяти дней выдержки была относительно невысокая – 45 МПа [19].

Liang and Liang предложили использовать смеси с высоким содержанием строительных отходов и переработанных материалов – это снижает стоимость жилья и позволяет быстро возводить дома так необходимые в Китае [20]. Но прочность подобных конструкций остается под вопросом. Есть также работы, где в качестве сырья заявлен обычный бетон. Например, HuaShang Tengda использовала бетон C30 для строительства двухэтажного здания [10], что может быть потенциальным сырьем для бюджетных конструкций. Также и в Ярославле «СПЕЦАВИА» производит принтеры, печатающие стандартным пескобетоном М-300. Печать производится слоями высотой 10 мм и шириной от 30 до 50 мм [15].

Преимущества технологии

- Низкие трудозатраты. Для строительства напечатанных объектов нужно на 50-80 % меньше трудозатрат. Участие людей нужно только для обслуживания машин, проведения коммуникаций, сборки конструкций.
- Быстрое строительство. При строительстве сразу на фундаменте возведение стен может происходить в считанные сутки. Самая времязатратная часть – это постройка крыши, проведение коммуникаций и внутренняя отделка.

- Минимум отходов. Традиционное строительство оставляет после себя тонны отходов в год. В основном это обрезки материалов, куски бетона, строительные леса и загрязненные опалубки. 3D-печать зданий оставляет намного меньше мусора и, более того, может использовать переработанные отходы в качестве составляющих бетонной смеси.
- Низкая цена. Первый напечатанный российский дом обошелся всего 560 тысяч рублей. В эту цену входит отделка и проведенные коммуникации.
- Архитектурная свобода. Разработчикам доступны практически любые геометрические формы, а строительство объектов с более замысловатой архитектурой занимает не намного больше времени, чем традиционные дома. Примером может служить детский замок Total Kustom [6] и двухэтажный особняк в Китае [10].
- Строительство на месте. Традиционное строительство требует огромных трудозатрат при перевозке бетонных плит. Вес некоторых из них достигает 5 тонн! 3D-печать зданий сразу на фундаменте решает эту проблему.

Недостатки технологии

- Несогласованность разработок – производители не делятся информацией, что замедляет развитие отрасли. Каждая компания, которая начинает работать в этой области, практически проводит исследования с нуля.
- Высокая цена принтера. Она может достигать 2,5 млн долларов. Для небольших организаций и временных проектов такая стоимость может быть неподъемной. К счастью, некоторые производители дают оборудование в аренду.
- Арматуру, проводку и канализацию до сих пор надо делать вручную. Мы предполагаем, что в дальнейшем эти процессы тоже будут ро-

ботизированы – подобными разработками уже активно занимается Contour Crafting. Они заявляют, что могут построить дом целиком всего за 24 часа [21].

- Грубая поверхность у большинства объектов. У стен, возведенных послойным методом ребристая поверхность. Чтобы сделать их ровной, необходима отделка – механическое выравнивание, штукатурка или применение облицовочных материалов.
- Чувствительность к внешним условиям. Печать нельзя проводить при отрицательных температурах и неблагоприятных погодных условиях. В холодное время вокруг стройки обычно возводят шатер – это требует отдельных затрат. Частично решить эту проблему можно разработав бетонную смесь с морозостойкими добавками, которая будет сохранять свои характеристики при отрицательных температурах.

Также некоторые исследователи ставят под вопрос прочность конструкций и их пригодность к суровым российским условиям [22]. Но как было показано выше, уже сейчас существуют смеси, из которых формируется бетон со стандартной прочностью от 100 МПа. Кроме того, бетон можно армировать полимерными волокнами и металлическими элементами, как это сделали Aris Cor при строительстве дома в Сколково [14]. При этом стены можно делать многослойными. Например, Contour Crafting печатает стены в три струи – две внешние и одна, зигзагообразная, внутренняя [21]. Свободное пространство между стенами можно наполнять более легким и пористым бетоном или теплоизоляционными материалами – это решает вопрос пригодности подобных сооружений в суровых погодных условиях.

Развитие строительной 3D-печати

По мнению исследователей [23], строительная печать будет развиваться в нескольких направлениях:

– *Повсеместное использование печати в несколько струй*

Интегрирование дополнительных сопел могло бы значительно увеличить скорость печати. Кроме того, такой способ строительства позволяет строить разными «чернилами» в соответствии с техническими требованиями. Однако подобное устройство требует правильного планирования, нити должны наслаиваться согласованно. Большинство современных принтеров печатают стену в один слой, поэтому наслоение многослойных участков требует больших временных затрат. Печать в три струи применяет Contour Craft – они создают стену с полыми ячейками. Воздух внутри ячеек позволяет снижать теплопроводность конструкции [21].

– *Разработка новых материалов*

Разработки материалов для строительной печати - сложная задача. В будущем ожидается широкий выбор различных смесей, которые можно будет подбирать и комбинировать под конкретные объекты. Среди них должны быть легкие, теплоизолированные, сверхпрочные и самовосстанавливающиеся композиции. Они помогут строить объекты, подходящие под заданные условия и сочетающие приемлемую цену и качество.

– *Армирование*

Одна из проблем 3D-печати – это низкая пластичность и прочность бетона на изгиб. В традиционном строительстве эта проблема решается армированием. Однако при печати это сделать не так просто. В объектах Lim et al, Contour Craft и Apis Cor [14; 21; 24] армирование пока делается вручную, и вертикальные стержни ограничивают архитектурную свободу, потому что вставляются в пустоты между стенами. Проблему можно было бы решить, дополнив печатающую головку пистолетом, который вставляет металлические стержни в нити, но в этом случае нужно правильно сконструировать силу проникновения и учесть деформации, которые могут возникнуть в бетоне. На практике уже применяют армиро-

вание волокнистыми материалами – это может быть полимер, стекло и металл. Есть даже патент, в котором предложено использовать нанотрубки [24]. Но здесь тоже есть сложность – нужно прорабатывать технологию, позволяющую равномерно распределять волокно по всему объему смеси.

– *Оптимизация параметров процесса*

Скорость печати, толщина слоя и скорость потока – это важные параметры процесса печати. Если скорость потока не согласована со скоростью экструзии, мы получим нити разной толщины. Это должно быть учтено при создании криволинейных объектов – когда головка проходит фрагменты с большой кривизной, скорость экструзии должна изменяться. В противном случае, вся структура будет нарушена. Еще одна проблема строительной печати – это неровные поверхность и пустоты между слоями. Их можно уменьшить, если снизить толщину нити, но в этом случае печать будет длиться дольше. Поэтому разработчикам придется учитывать заданное время строительства и возможность обработать полученную поверхность.

– *Квалификация рабочих*

Строительная печать требует квалифицированной рабочей силы. Специалистам нужно понимать роботизированные процессы, подбирать параметры печати и бетонные составы под конкретные архитектурные объекты. Когда строительная печать будет повсеместно использоваться, нынешним рабочим придется повышать свою квалификацию или менять сферу деятельности.

Вывод

Повсеместное распространение строительной печати - это лишь вопрос времени. Технология дает возможность быстро и с минимальными затратами возводить дома. Это может быть актуально в странах с большой численностью населения и недостатком жилья, например, Ин-

дии, Китае. А также в странах третьего мира, где люди вынуждены жить в бараках, построенных из подручных материалов. Быстрое строительство может применяться в местах стихийных бедствий – производить быстрые дома и временные убежища можно будет за считанные сутки. И такой способ строительства планирует применять NASA при возведении базы на Луне [26].

Мы ожидаем дальнейшего развития технологий. На наш взгляд, следующим шагом будет применение роботов, которые всю работу выполняют без участия человека - строят стены, армируют их, возводят крыши, проводят коммуникации, оснащают дома лестницами и окнами и делают внешнюю и внутреннюю отделку помещений. Не за горами и строительство многоэтажных конструкций - семь этажей и выше.

Всесторонняя разработка бетонных смесей поможет подбирать не только составы по конкретные условия и задачи, но использовать в качестве сырья отходы от строительства. Применение в бетонных растворах минеральных добавок также поможет поддержать экологию планеты – уменьшенное потребление цемента снизит выброс углекислого газа в атмосферу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Олейник С.П. Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2016. Т. 3. № 2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://resources.today/PDF/02RRO216.pdf>
2. Gardiner J. Exploring the emerging design territory of construction 3D printing – project led architectural research // Architecture & Design, RMIT University. 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:160277/Gardiner.pdf>
3. Khoshnevis B., Dutton R. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, Materials Technology // Materials Technology. Advanced Performance Materials. 2016. V. 13. 1998. Is. 2. P. 53-56.
4. Langenberg E. Mapping 20 years of 3D printing in Architecture by Erno Langenberg // 3D Printing Architecture. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.3dprintingarchitecture.net/?p=601>
5. 3D Concrete Printing Market Product Type (Walls, Floors & Roofs, Panels & Lintels), Concrete Type (Ready-Mix, High-Density, Precast, Shotcrete), Software (Design, Inspection, Printing), End-Use Sector (Architectural, Industrial, Domestic) – Forecast to 2021 // Markets and Markets. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-concrete-printing.asp>
6. 3D Printed Concrete Castle is Complete // 3D Concrete House Printer. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html>
7. Lim S., Buswell R., Le T. и др. Development of a viable concrete printing process // 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011), 29 June – 2 July 2011, Seoul, South Korea, P. 665-670. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/S20-3.pdf>

8. Hwang D., Khoshnevis B. Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting // 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea, 2004. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13583.pdf>
9. Winsun [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://futureofconstruction.org/case/winsun>
10. Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house>
11. Dubai unveils world's first 3D-printed office building // Cnet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cnet.com/news/dubai-unveils-worlds-first-3d-printed-office-building>
12. The construction of Europe's first 3D printed building has begun [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprinthuset.dk/europes-first-3d-printed-building/>
13. Landscape House in Amsterdam, the Netherlands [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.landscapehouse.nl/home>
14. 3D Printed House – World's 35 Greatest 3D Printed Structures [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-homes-buildings-3d-printing-construction>
15. Напечатанный на 3D-принтере дом в Ярославле готовится к заселению [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/news-3dtoday/printed-on-a-3d-printer-house-in-yaroslavl-prepares-to-move-in>
16. Small robots printing big structures // Minibuilders by IAAC. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://robots.iaac.net>
17. Le T.T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. 45 (8). P. 1221-1232.
18. Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry // Automation in Construction. 2016. 68. P. 21-31.
19. Implementation of a contour crafting system to a 3-dimensional concrete printer // 10th International DAAAM Baltic Conference «INDUSTRIAL ENGINEERING». 12-13 May 2015. Tallinn, Estonia.

20. Liang F., Liang Y. Study on the status quo and problems of 3D printed buildings in China // Global Journal of Human-Social Science. 2014. 14 (5). P. 7-10.
21. Contour Crafting's 3D-Printing Tech Can Build Homes On-Site in Under 24 Hours [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://futurism.com/contour-craftings-3d-printing-tech-can-build-homes-on-site-in-under-24-hours>
22. Будко А.А., Потехин А.А., Акопян А.А. Применение 3D принтеров в строительстве, достоинства и недостатки технологии // ИЦРОН. Секция № 6. Горная и строительная техника и технологии. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://izron.ru/articles/tekhnicheskie-nauki-tendentsii-perspektivy-i-tekhnologii-razvitiya-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itoga/sektsiya-6-gornaya-i-stroitel'naya-tekhnika-i-tekhnologii-spetsialnost-05-05-00/primenenie-3d-printerov-v-stroitelstve-dostoinstva-i-nedostatki-tekhnologii>
23. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda. 3D printing trends in building and construction industry: a review // Virtual and Physical Prototyping. Singapore Centre for 3D Printing. 2017. V. 12. Is. 3.
24. Lim S. et al. Development of a viable concrete printing process // Proceedings of the 28th international symposium on automation and robotics in construction (ISARC2011). Jeju Island, South Korea, 2011. P. 665-670.
25. Патент CN 201710799850, 2017-09-07. One kind of 3d printing method for building wall structure / 吕月林.
26. Building a Lunar Base with 3D Printing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sservi.nasa.gov/articles/building-a-lunar-base-with-3d-printing>
27. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. 2016. 11:3. P. 209-225.