

ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ ОДНОСТАДИЙНЫМ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНОМ

Молодин В.В.¹, Гасенко И.И.², Тимин П.Л.³

¹ Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), г.Новосибирск, 630008, РФ.

² Студент института строительства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), г.Новосибирск, 630008, РФ.

³ Студент института строительства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), г.Новосибирск, 630008, РФ.

Аннотация: Предлагаемые строительному рынку 3D-принтеры могут послойно выполнять несъёмную опалубку для последующего заполнения её армированным конструкционным бетоном и утеплителем. Применение одностадийного полистиролбетона с гранулами полистирола, вспучивающимися непосредственно в рабочей головке принтера, позволяют послойно формировать утеплённую стену на всю её ширину, сократив операцию возведения до одного технологического передела.

Ключевые слова: 3D-печать; полистиролбетон; одностадийный полистиролбетон.

SINGLE-STAGE POLYSTYRENE CONCRETE 3D PRINTING TECHNOLOGY

Molodin V.V.¹, Gasenko I.I.², Timin P.L.³

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Technology and Organization at Novosibirsk State University Architectural and Civil engineering (Sibstrin), Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

² Student of the Institute of Civil Engineering, at Novosibirsk State University Architectural and Civil engineering (Sibstrin), Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

³ Student of the Institute of Civil Engineering, at Novosibirsk State University Architectural and Civil engineering (Sibstrin), Novosibirsk, 630008, Russian Federation.

e-mail: molodin@sibstrin.ru, gasenko.ivan98@mail.ru, Timinpavel2.0@yandex.ru

Abstract: The 3-D printers offered to the construction market can perform retained form layer-by-layer for subsequent filling with reinforced structural concrete and insulation. The use of a single-stage polystyrene concrete with polystyrene granules bloated directly in the printer head allows to form layer-by-layer the insulated wall for its entire width and reduce the erection operation to one technological conversion.

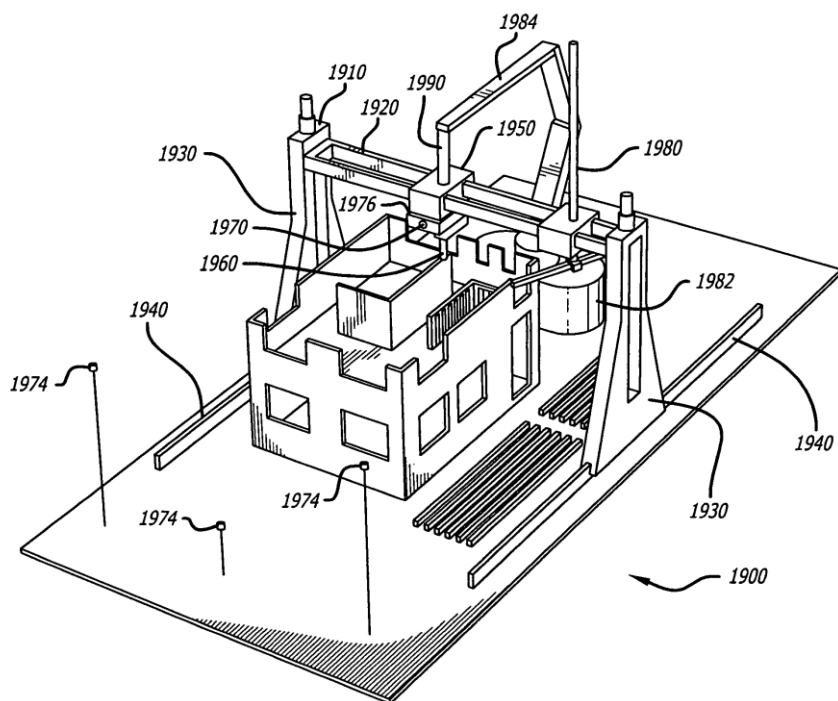
Keywords: 3D-printing; polystyrene concrete; technologies of single-stage polystyrene concrete.

1. Введение

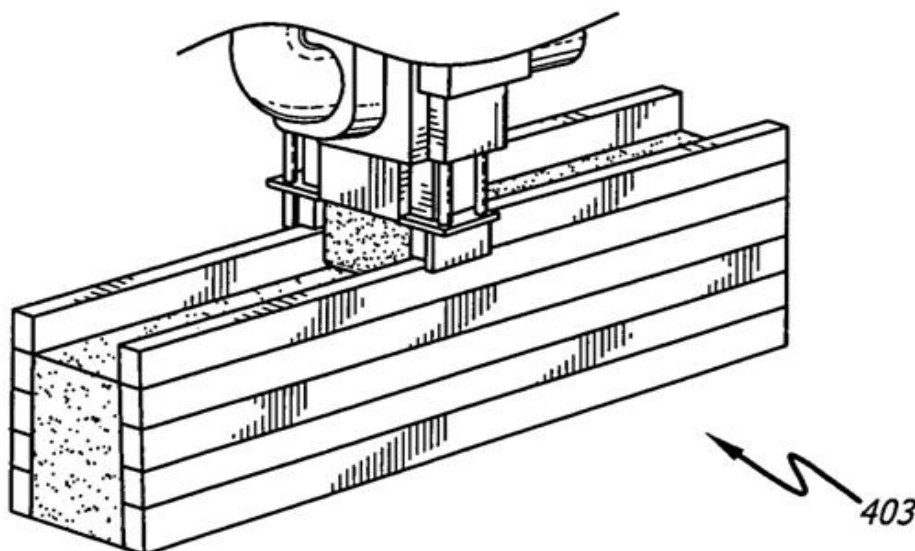
В рамках реализации Национального проекта «Жильё и городская среда» перед строителями России поставлены серьёзные задачи по увеличению ввода в эксплуатацию жилья и объектов социальной инфраструктуры. Только в Сибирском федеральном округе в 2019 году было введено без малого 7 млн. м² жилья, или 8,75% от ввода по России. Плановые показатели 2020 года ещё выше: 8 млн. 400 тыс. м². То

есть прирост должен составить 21% от достигнутого. Задача непростая. Для её решения придётся мобилизовать все имеющиеся ресурсы, широко внедрить новые технологии и материалы.

Одним из перспективных направлений современного строительства являются аддитивные технологии – послойное наращивание и синтез трёхмерных объектов путём добавления материала на основу. Первое предложение использования 3D-печати для нужд строительной отрасли зафиксировано патентом, выданным в США Бехроху Хошневису в 2004 году [1]. Предложенная им роботизированная система представляла собой порталный принтер с рабочей головкой в виде экструдера (рис.1), послойно выдавливающего сначала две боковые стенки из конструкционного бетона, а затем, во время второго прохода, заполняющего полость между ними теплоизолирующим или другим вяжущим материалом (рис. 2).



Фиг. 1. Общий вид порталного 3D-принтера по патенту США US7641461B2.



Общий вид рабочей головки портального 3D-принтера по патенту США US7641461B2.

Предложенное техническое решение долгие 12 лет было базовым. Оно интенсивно совершенствовалось как в части самого принтера, так и в части материала для экструдирования [2, 3,4,5,6]. За этот период было выдано более 300 патентов, усовершенствовавших систему. Начиная с 2014 года, технология в экспериментальном порядке вышла на стройплощадки. Китайская компания «WinSun» от полупроизводственных опытов перешла к печати реальных одно- и двухэтажных домов [7], используя громоздкий портальный принтер. Попытки преодолеть недостатки предшественников были предприняты компанией «DCP» (США), предложившей на рынок гидравлический кран с однопальцевым манипулятором, обладающим шестью степенями свободы и набором рабочих головок, включая экструдеры для работы с бетоном, термопластиком, грунтом и пенополиуританом.

В 2016 году на рынке появляется радиальный строительный 3d-принтер – разработка компании «Apis Cor» [8]. Он позволил серьёзно упростить конструкцию при увеличении технологических возможностей агрегата. Опыт применения показал преимущества радиального принтера над портальным, но технология экструдирования - послойное выдавливание сначала боковые стенки, а затем заполнение полости между ними - осталась неизменной. Примерно в это же время в университете Нанта совместно с «Nantes Digital Sciences Laboratory (LS2N)» разрабатывается 3D-принтер формирующий боковые стенки не из цементно-песчаной смеси, а из пенополиуритана [9]. Уже потом, полость между ними заполняется конструкционным бетоном. Такая стенка имеет конструктивную часть внутри и утепление снаружи. Применение пенополиуритана позволило ускорить процесс формирования жестких боковых стенок конструкции и одновременно утеплять её. Однако, высокая стоимость материалов и полиуретановые поверхности стены, требующие больших дополнительных затрат на

их защиту от солнечных лучей и отделку, при всей привлекательности проекта делают его малоперспективным.

В последние годы на строительном рынке стало известно о попытках реализовать 3D технологии с использованием глины для изготовления стеновых блоков [10], песка, который пропитывается клеящим составом [11]. Однако серьёзного продвижения на рынок 3D технологий пока нет.

Следует заметить, что все попытки усовершенствовать 3D-принтер и вяжущие материалы для экструдирования, предпринятые в последние годы, не изменили принципиального решения, заложенного в базовом патенте [1]. Сначала, составом на основе цемента, глины или пенополиуритана, формируется каркас стены или несъёмная опалубка, а затем, образовавшиеся полости заполняются утеплителем или конструкционным бетоном (рис.3)



Фиг. 3. Конструкция стены, выполненная с помощью 3D-принтера согласно традиционной технологии.

Разработанная технология имеет ряд недостатков, которые тормозят её широкое внедрение в строительную практику.

1. Высокая трудоемкость процесса получения конечного продукта. Сначала, посредством 3D-принтера одним вяжущим материалом формируется каркас стены или несъёмная опалубка. Затем, дождавшись потери подвижности экструдированного материала, сформировавшиеся полости частично сначала армируются, а затем заполняются конструкционным бетоном и частично заполняются утеплителем. Надо заметить, что все операции, кроме печати несъёмной опалубки выполняются вручную.

2. Возможно совмещение печати каркаса стены и одновременное заполнение формирующейся полости лёгким бетоном [1]. При этом, конструкция печатающей

головки и её эксплуатация существенно усложняется необходимостью включения в конструкцию двух систем подачи разных вяжущих материалов.

3. Потребность в достаточно быстром отверждении вяжущего материала каркаса стены, чтобы он мог выдержать вес уложенных сверху слоёв вяжущего материала и боковое давление вяжущего материала, заполняющего полости. При этом он не должен отверждаться слишком быстро потому, что это может привести к его затвердеванию внутри систем хранения и доставки материала.

4. Во-избежание расплывания нижних, ранее выдавленных слоёв под весом верхних, приходится делать технологическую паузу, что существенно усложняет процесс строительства и увеличивает его продолжительность.

5. Для успешной работы строительного 3D-принтера, использующего вяжущий материал на цементной основе необходимы положительные температуры или устройство тепляка в холодный период года.

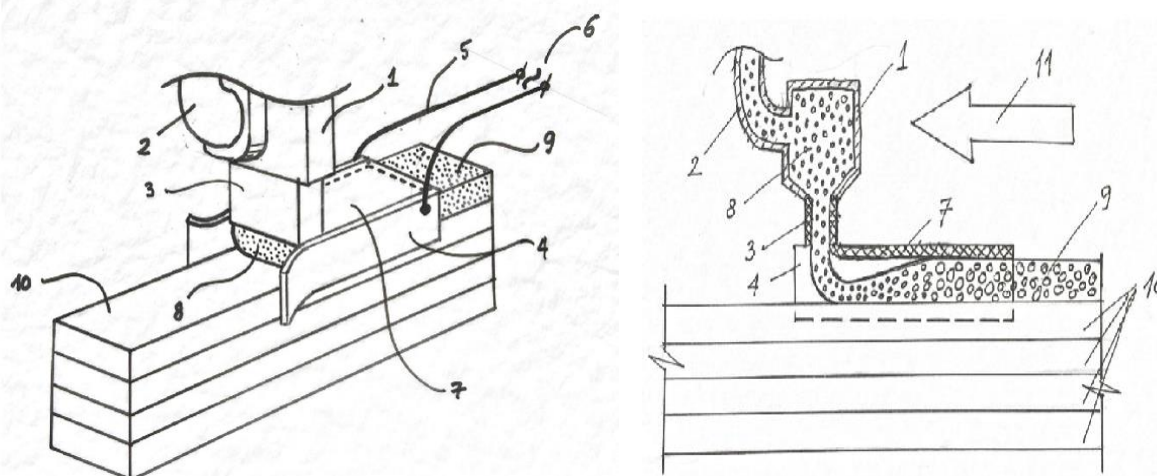
Целью настоящей работы является разработка аддитивной технологии изготовления ограждающих конструкций зданий, которая позволит преодолеть указанные выше недостатки и сможет обеспечить автоматизировано, без участия людей, возводить утеплённые стены с минимальным количеством технологических переделов.

Задача настоящего исследования – изучение возможности использования в качестве вяжущего материала полистиролбетона одностадийной технологии.

2. Технология 3D-печати одностадийным полистиролбетоном

Существенно упростить процесс создания ограждающих конструкций, с использованием 3D-принтера, позволяет технология *одностадийного полистиролбетона* [12], разработанная в НГАСУ (Сибстрин) [13]. Суть технологии заключается в том, что гранулы невспененного (бисерного) полистирола вводятся в цементно-песчанную смесь при её изготовлении. Плотность бисерного полистирола имеет один порядок с плотностью цементно-песчаной смеси. Поэтому в процессе перемешивания гранулы полистирола равномерно распределяются по массе материала. Готовая смесь помещается в пространство между пластинчатыми электродами, на которые подаётся электрический ток промышленной частоты, напряжением 220÷380 В. В процессе форсированного электроразогрева температура смеси быстро поднимается до 80°C, при которой гранулы бисерного полистирола вспучиваются, в разы, увеличиваясь в объёме. При этом, если смесь находится в замкнутом пространстве, то за счёт увеличения объёма гранул полистирола при вспенивании, происходит самоуплотнение материала. Изменяя количество полистирола в смеси, можно усиливать конструктивные или теплоизоляционные свойства материала.

Все преимущества *одностадийного полистиролбетона* реализуются для аддитивной технологии строительства зданий с утеплёнными стенами. Технология реализуется следующим образом (рис. 3). Полистиролбетонная смесь с невспененными гранулами бисерного полистирола 8 через систему подачи

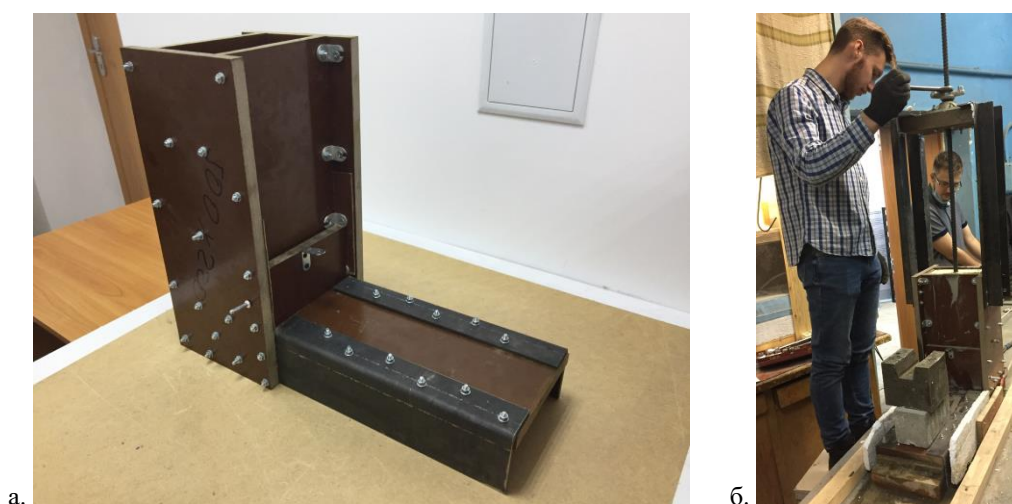


Фиг. 4. Принципиальное решение рабочей головки 3D-принтера для экструдирования полистиролбетонной смеси, укладываемой по одностадийной технологии.

вязущего материала 2 поступает в экструдер 1 и подогревается там до температуры близкой к температуре вспенивания полистирола, но не достигает её. Оттуда, через выпускное отверстие (сопло) 3, смесь выдавливается на поверхность ранее отформованного и потерявшего подвижность слоя полистиролбетона 10. Сопло 3 имеет поперечный размер равный ширине возводимой стены 10. Полистиролбетонная смесь 8 заполняет пространство между шпателями-электродами 4, которые, являясь частью печатающей головки 3D принтера, медленно и непрерывно перемещаются 11 вдоль стены. Электрический ток, напряжением 220÷380 В, поступающий из электрической сети 6 через кабели 5, проходит через полистиролбетонную смесь, быстро нагревая её. По достижении температуры 80°С гранулы полистирола размягчаются и под действием содержащегося в них, кипящего изопентана, вспениваются, многократно увеличиваясь в объёме, меняя качество смеси 9. В процессе нагрева и вспучивания гранул полистирола объём полистиролбетонной смеси 9 увеличивается и занимает всё пространство между шпателями-электродами 4, поверхностью ранее уложенного слоя 10 и прижимным шпателем 7, частично уплотняясь. Шпатели-электроды 4 и прижимной шпатель 7 формируют очередной слой стены из полистиролбетона 9, получившего в результате электротермообработки теплоизоляционные свойства. Обладая высокой температурой, полистиролбетон быстро, ещё в пространстве между шпателями-электродами, теряет подвижность и начинает интенсивно твердеть. Равномерно распределённые по объёму вспененные гранулы полистирола, являющиеся утеплителем, снижают теплотери из

конструкции в окружающую среду. Увеличивается продолжительность сохранения высоких температур внутри материала, чем обеспечивается интенсивное нарастание прочности полистиролбетона. Изменяя в рецептуре вяжущего материала содержание полистирола, в зависимости от потребности, можно увеличивать или уменьшать теплоизоляционные или конструкционные свойства стены.

Натурные испытания рабочей головки 3D-принтера для экструдирования полистиролбетонной смеси (рис. 4), укладываемой по одностадийной технологии, показали, что рабочий слой материала, сформированный по предложенной технологии, сохраняет целостность и не проявляет признаков подвижности. Укладка на него после первого прохода 3 D-принтера, через 15 минут, последующих рабочих слоёв материала на приобретённую форму и геометрические размеры первого практически не влияет.



Фиг. 5. Общий вид (а) и опытное испытание (б) рабочей головки 3D-принтера для печати ограждающих конструкций одностадийным полистиролбетоном.

Полученные образцы полистиролбетона исследовались на прочность и равномерность распределения вспененных гранул полистирола по массе материала.

Испытания кубиковой прочности образцов осуществлялись в 3, 7, 14 и 28 суточном возрасте. Для испытаний было выпилено по 3 стандартных образца. В таблице 1 представлены средние значения испытаний. Испытания производились на лабораторном прессе ПСУ-50.

Таблица 1-Динамика приобретения прочности полистиролбетоном

Вид твердения	3 суток, R, МПа	7 суток, R, МПа	14 суток, R, МПа	28 суток, R, МПа
Электроразогрев, D1200кг/м ³	3,83	7,71	9,38	12,73
Электроразогрев, D700 кг/м ³	2,72	5,05	5,87	7,46
Стандартная технология, D1200 кг/м ³	3,21	5,33	7,10	10,69

Анализируя результаты испытаний прочности полистиролбетона средней плотности D700 и D1200 после термообработки можно констатировать, что прочность образцов, изготовленных по одностадийной технологии выше прочности образцов естественного твердения. Структура полученного материала оказалась хорошей. Бисерный полистирол вспенился весь и по всему объёму. Средняя прочность в сравнении с полистиролбетоном стандартной технологии оказалась выше на 20%.

Однородность распределения гранул полистирола по массе материала определялась путём измерения теплопроводности плоских образцов, вырезанных из массива стены сечениями, перпендикулярными направлению возможного всплытия гранул.

Перед измерением теплопроводности образцы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 70°C в течение суток. Потеря массы образцов составляла около 5%. Измерялись: геометрические характеристики образца, электрическая мощность, необходимая для создания теплового потока и температура противоположных лицевых граней.

В ходе эксперимента, при помощи прибора для измерения теплопроводности ПИТ-2, определялась теплопроводность образцов выпиленных из стены, изготовленной из полистиролбетона средней плотности D700 и D1200, рабочей головкой 3D-принтера по *одностадийной технологии*, а также образца, выполненного по стандартной технологии средней плотности D1200 (табл.2).

Таблица 2-Послойная теплопроводность образцов полистиролбетона различной плотности

Слой	Теплопроводность (Вт/м·К)		
	Образец 1 (Электроразогрев, 1200 кг/м ³)	Образец 2 (Электроразогрев, 700 кг/м ³)	Образец 3 (Станд.технология, 1200 кг/м ³)
1 слой	0,2007	0,1283	0,2136
2 слой	0,1961	0,1274	0,2090
3 слой	0,1944	0,1268	0,2012
4 слой	0,1933	0,1261	0,1878
Расслоение	3,68%	1,56%	12,08%

Неоднородность образца, выполненного по предложенной технологии, составляет 3,68% против 12,08% у образца, выполненного по стандартной технологии. Значительное различие теплопроводности верхнего и нижнего слоя блока полистиролбетона, изготовленного по традиционной технологии, объясняется флотацией гранул вспененного полистирола и седиментацией растворной части.

3. Заключение

Практически все аддитивные технологии, предложенные строительному рынку, предполагают использование 3D-принтера для печати несъёмной опалубки из цементно-песчаного раствора песка, глины или пенополиуритана. Затем следуют стандартные (ручные) операции по армированию, бетонированию и утеплению будущей ограждающей конструкции. Известно, что в комплексе бетонирования строительных конструкций трудоёмкость опалубочных работ не превышает 40%. Следовательно, 3D-принтер возьмёт на себя только эту часть трудоёмкости. Остальное приходится делать руками рабочих.

Применение 3D-принтера, печатающего полистиролбетоном стену на всю ширину позволяет:

- упростив систему подачи вяжущего материала, формировать рабочий слой на всю ширину стены;
- за счёт высоких температур термообработки устранить подвижность вяжущего материала сразу по выходу его из рабочей головки и ускорить твердение;
- используя увеличение объёма гранул при их вспучивании обеспечить самоуплотнение полистиролбетона при формировании рабочего слоя;
- обеспечить равномерное распределение вспененных гранул полистирола по объёму материала стены, повысив тем самым её качественное термосопротивление;
- гарантировать заданные прочностные или теплоизоляционные характеристики материала возводимой стены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

[1] *Patent US7641461B2 Robotic systems for automated construction* [B29C64/106/](#)

[2] **Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В.** Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11-12. С. 2673-2676.

[3] **Удодов С. А.** 3D-печати в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей. // *VI Международная научно-практическая конференция МЦНС «Наука и просвещение»*. г. Пенза. 2017г. с. 58-61.

[4] **Лулева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина 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.

[5] **Рудяк К.А., Чернышев Ю.О.** Возведение зданий методом послойного экструдирования // *Современные концепции развития науки: материалы Междунар. науч.-практ. Конф. Казань*. 2016. С. 147-151.

[6] *Степанова Е.Ю., Барсуков Г.В., Степанов Ю.С. Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №8-2. Г. Тула. 2016. С. 243-249.*

[7] *Компания Winsun. 3D-проектирование домов [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.yhbm.com/index.php?a=lists&c=index&catid=67&m=content> (дата обращения: 14.12.2016).*

[8] *Стройка 3D: Никита Чен-юн-тай первым в России напечатал дом. [Электронный ресурс]. – <https://www.rbc.ru/magazine/2017/06/592567559a7947e1bb4b7ea9>*

[9] *Французский проект VATIPRINT по строительству дома с 3D-печатью «наизнанку» [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.3dprintingindustry.com/tags/ls2n/>*

[10] *Институт передовой архитектуры Каталонии использует естественный подход к 3D-печати на стройке [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.3dprintingindustry.com/tags/terra-performa/>*

[11] *The Metod and the Device [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/>*

[12] *[Молодин В.В., Васенков Е.В. Технология изготовления полистиролбетонных изделий и конструкций методом электроразогрева //Труды НГАСУ. – 2019. – Т.22, №1 \(71\). – С. 102-114.](#)*

[13] *ЗАЯВКА НА ПАТЕНТ*