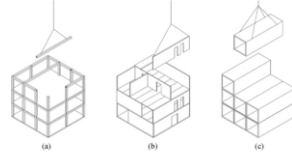


# Теплотехнические свойства модульной аддитивной ограждающей конструкции

## 1. Модульное строительство

Сборное строительство относится к строительному процессу, при котором строительные компоненты (модули) изготавливаются на заводе и доставляются на строительную площадку для формирования целого здания. В зависимости от степени готовности выделяют три класса сборных конструкций: одноэлементные 1D (а), панельные 2D (б) и объемные 3D (в) системы. Панельное 2D и объемное 3D строительство, также известны как **модульное строительство**.

Ожидается, что применение модульного строительства способно обеспечить население более доступным по цене жильем за счет более быстрого возведения, экономии на транспортной логистике и рабочих единицах.



Применение **модульного строительства** наиболее актуально для **создания типовых многоквартирных домов, гостиниц, школ, больниц, офисов, студенческих общежитий** и других видов зданий, где предпочтение отдается повторяющимся элементам

## 2. Аддитивное строительство

Одним из вариантов создания готовых строительных модулей является метод 3d-печати. Трехмерная печать бетоном (3DCP) также известна как аддитивное производство, **Additive Manufacturing AM**. 3DCP подразумевает под собой автоматизированный процесс, в ходе которого создаются бетонные конструкции путем экструзии бетона слой за слоем через сопло с цифровым управлением. С помощью аддитивной технологии можно изготавливать, как отдельные элементы здания, так и здание целиком.

Здания и элементы зданий (стеновые модули, например), выполненные методом 3d-печати, **могут иметь сложную геометрическую форму** в плане и по высоте, способствующую созданию выразительной архитектуры.



3D -печатное бетонное здание в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты (Apis Cor)



3D -печатное бетонное здание в Наньцзине, Китай



3D -печатное бетонное здание в Спбурге, Россия

## 3. Актуальность, цель и задачи исследования

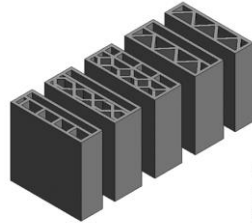
- Общемировой ежегодный рост рынка строительной 3D печати составляет 25.5% по данным компании Verified Market Research
- Мировой объем рынка 2017 года оценивается в 8.08 млрд.\$., прогноз на 2025 год - 49,74 млрд.\$ 40% общего объема рынка строительной 3D печати в России составляют малые архитектурные формы и малоэтажная застройка
- Поскольку технология 3D-печати активно развивается и позволяет печатать элементы зданий и здания целиком, **важно исследовать данную конструкцию с точки зрения теплотехнических качеств** и сделать оценку потенциала её энергоэффективности

**Цель исследования** – определение теплотехнических свойств ограждающей конструкции, выполненной с применением аддитивных технологий, методом численного моделирования.

**Задачи исследования:**

- Изучение, обобщение и анализ существующих ограждающих конструкций, созданных аддитивным методом;
- Печать образца и проведение первой серии испытаний;
- Расчет сопротивления теплопередаче.

## 4. Конструкции, созданные аддитивным способом

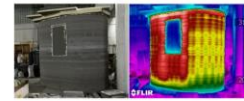


Варианты однокамерных и многокамерных ограждающих конструкций, которые чаще всего используются в 3D-печатном строительстве, такими компаниями как Apis Cor, WinSun, Contour Crafting Corporation и др.

### Определение теплотехнических свойств

действующие СП не позволяют достоверно определять теплотехнические свойства большинства ограждающих конструкций, поскольку:

- Аддитивные конструкции обладают высокой неоднородностью
- Послойная структура конструкций, переменная толщина

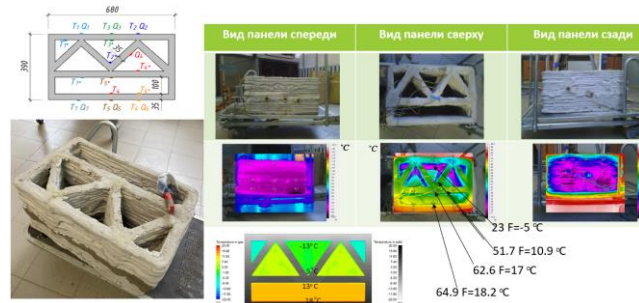


## 5. Испытания в Климатических камерах



### Постановка задачи

Конвективный теплообмен (помещение):  $T_{ext} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Конвективный теплообмен (улица):  $T_{ext} = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$



## 6. Расчет сопротивления теплопередаче

Фактическое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, имеющей неравномерность температур поверхностей:

$$R_c = \frac{F}{\sum \frac{F_i}{R_{0i}}}$$

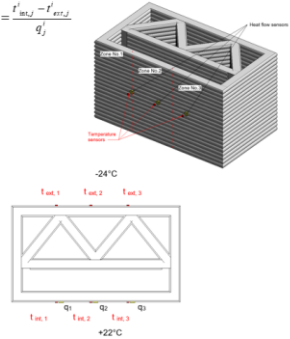
Сопротивление теплопередаче характерной изотермической зоны  $\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ :

$$R_{0i} = \frac{t'_{int,i} - t'_{ext,i}}{q'_i}$$

$i$  – индекс, обозначающий номер эксперимента

$j$  – индекс, обозначающий номер изотермической зоны

1 день испытаний											
Дата	Время	N исп.	Ав7Д2			Ав5Д2			Датчики		
			T7	T1	Q7	T5	T3	Q5	T6	T2	Q6
22.12.2021	11:22	1	20,12	15,47	12,089	20,23	15,4	10,018	20,11	15,27	9,197
22.12.2021	11:37	2	20,87	-17,98	20,049	21,06	-9,07	14,773	20,81	-10,97	17,499
22.12.2021	11:52	3	21,27	-18,56	22,127	21,52	-12,84	15,958	21,21	-12,78	16,907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.12.2021	9:37	90	20,27	-22,01	21,585	20,32	-20,81	16,436	20,14	-21,43	18,123
23.12.2021	9:52	91	20,27	-22,01	23,035	20,33	-20,86	16,113	20,13	-21,45	16,627
23.12.2021	10:07	92	20,27	-22,01	22,799	20,34	-20,86	16,786	20,15	-21,45	17,139
23.12.2021	10:22	93	20,26	-22,08	21,917	20,33	-20,83	16,793	20,16	-21,49	18,307
23.12.2021	10:37	94	20,35	-22,22	24,326	20,44	-20,94	18,142	20,24	-21,31	18,61
23.12.2021	10:52	95	20,43	-21,88	23,733	20,49	-20,7	17,277	20,3	-21,25	17,331
23.12.2021	11:07	96	20,46	-22,07	22,739	20,51	-20,85	16,324	20,32	-21,48	17,655
23.12.2021	11:22	97	20,46	-21,98	22,79	20,54	-20,79	18,984	20,34	-21,23	17,227
Среднее значение:			20,41203	-22,0822	20,44022	20,4725	-20,8205	15,32339	20,29688	-21,4045	15,83523



Базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче для региона Санкт-Петербурга  $R_{0TP} = 3,11\text{ м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»

2 день испытаний											
Дата	Время	N исп.	Ав7Д2			Ав5Д2			Датчики		
			T7	T1	Q7	T5	T3	Q5	T6	T2	Q6
24.12.2021	20:11	1	20,39	8,7	8,51	20,43	11,76	6,552	20,37	9,78	6,574
25.12.2021	20:26	2	20,41	-18,55	8,117	20,45	-9,36	6,067	20,4	-11,73	6,022
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.12.2021	19:26	94	20,22	-22,56	23,506	20,29	-21,43	18,403	20,07	-21,52	18,475
25.12.2021	19:41	95	20,25	-22,52	25,461	20,29	-21,42	18,642	20,09	-21,53	20,05
25.12.2021	19:56	96	20,22	-22,48	25,165	20,27	-21,41	20,654	20,05	-21,57	19,698
25.12.2021	20:11	97	20,21	-22,37	24,414	20,29	-21,34	18,858	20,03	-21,48	19,746
Среднее значение:			20,60651	-22,3688	25,64216	20,68186	-21,5531	19,38519	20,45674	-21,4521	19,73777

3 день испытаний											
Дата	Время	N исп.	Ав7Д2			Ав5Д2			Датчики		
			T7	T1	Q7	T5	T3	Q5	T6	T2	Q6
27.12.2021	17:26	1	16,98	17	-6,573	16,96	16,63	4,584	17,06	16,43	-3,887
27.12.2021	17:41	2	20,61	-17,39	33,048	20,73	-7,84	23,926	20,54	-9,17	21,258
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.12.2021	16:41	94	20,28	-22,25	24,938	20,35	-21,43	19,141	20,12	-21,95	18,93
28.12.2021	16:56	95	20,35	-22,41	25,365	20,41	-21,46	19,618	20,17	-21,98	19,178
28.12.2021	17:11	96	20,35	-22,41	26,159	20,41	-21,46	20,147	20,18	-21,93	20,29
28.12.2021	17:26	97	20,27	-22,45	25,129	20,34	-21,48	17,449	20,12	-22	20,058
Среднее значение:			20,40714	-22,3832	23,87616	20,66998	-21,5102	17,96975	20,25254	-21,864	18,30088

	Испытание 1, $R_c$ , $\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	Испытание 2, $R_c$ , $\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	Испытание 3, $R_c$ , $\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
Зона 1	2,078	1,675	1,792
Зона 2	2,694	2,163	2,324
Зона 3	2,663	2,123	2,301
Итоговое $R_c$	2,437	1,962	2,110

Требуется дополнительное утепление

## 7. Выводы

1. Рассмотрен недостаток исследований в области энергоэффективности ограждающих конструкций, созданных аддитивным методом: основными причинами являются - отсутствие методики проведения теплотехнического расчета конструкций.
2. Напечатана панель аддитивным способом с размерами 390x680x310 мм. Проведена первая серия испытаний в климатической камере. Выполнена тепловизионная съемка образца.
3. Сопротивление теплопередаче изучаемой конструкции составляет 2,16  $\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , требуется дополнительное утепление. Запланирован эксперимент с утеплением конструкции.

## Доклад подготовили:

Ватин Н.И., д.т.н., профессор, зав. ЛСКМ, ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого  
 Немова Д.В., к.т.н., ведущий научный сотрудник ЛСКМ, ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

Васильева И. Л., младший научный сотрудник ЛСКМ, ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого  
 докладчик (почта iravassilek@mail.ru)