



Research Article

Received: August 20, 2023

Accepted: September 20, 2023

Published: October 7, 2023

ISSN 2304-6295

# Energy-efficient structures and technologies in additive construction

Olshevskiy, Vyacheslav Yanushevich<sup>1</sup> Nemova, Darya Viktorovna<sup>1</sup> Dontsova, Anna Evgenyevna<sup>1\*</sup> Andreeva, Daria Sergeevna<sup>1</sup> Kotov, Evgeny Vladimirovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter The Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation; 79119199526@yandex.ru (O.V.Ya.); nemova\_dv@spbstu.ru (N.D.V.); anne.dontsoova@gmail.com (D.A.E.); tarasovads@gmail.com (A.D.S.)

Correspondence:\* email [anne.dontsoova@gmail.com](mailto:anne.dontsoova@gmail.com); contact phone [+79811889300](tel:+79811889300)

## Keywords:

Enclosing structure; Energy efficiency; Additive technology; Construction 3D printing; Concrete 3D printing; Additive Construction

## Abstract:

**The object of research** is the improvement of the thermal resistance of the buildings' enclosing structures created with the use of additive technologies. **Method.** Numerical research, experimental investigations, and secondary analysis of existing data on heat conductance of 3D printed building envelopes were used to investigate the energy efficiency of the building envelopes. The energy efficiency of 3D-printed buildings is based on two main factors: the efficiency of engineering systems and the efficiency of thermal protection. The heat transfer coefficient (U-value) of a 3D-printed wall is influenced by the internal configuration of the wall and by the materials used. The influence of the wall configuration on the U-value of the structure and the efficiency of the insulating material was evaluated based on numerical calculations and CFD modeling data. These two approaches were compared. It was detected that the wall configuration with zigzag internal stiffening diaphragms is the most efficient. The presence of mineral wool insulation in the wall structure increases the heat transfer resistance of the wall, but the efficiency of thermal insulation also depends on the wall configuration. Different wall configurations were investigated, and the change in U-values varied from 32% to 64% when the insulation was considered. **Results.** The results of empirical calculations of U-values for insulated walls showed extremely low results compared to the U-values obtained from CFD modeling. The high divergence of the results makes it impossible to use the empirical approach to calculate U-values for complex walls. Since 3D-printed walls are mostly made of concrete, the possibility of reducing the thermal conductivity of the concrete was investigated. Aerogel powder in the amount of 15% by volume was added to the concrete mixture. Heat conductivity measures of the manufactured samples showed a 25% reduction average in the heat conductivity of the concrete specimens.

## 1 Introduction

Технология 3D-печати строительных конструкций из бетона в настоящее время развивается, поскольку обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами возведения бетонных конструкций [1]. Интерес к указанной области повышается и среди исследователей. Интеграция методов модульного строительства с технологией 3D-печати обеспечила бы устойчивое решение задач современного строительства.

Строительная отрасль играет ключевую роль в экономическом развитии стран. Основные проблемы, которые встречаются в сфере строительства, это высокое энергопотребление, длительные сроки строительства, высокие производственные затраты. Применение аддитивных



технологий может иметь решающее значение при проектировании экологических и энергоэффективных ограждающих конструкций зданий. Материалы, используемые для печати и заполнения ограждающих конструкций могут быть теплоизолирующими и способствовать снижению теплопотерь зданий.

Аддитивное производство, 3D-печать — это процесс изготовления трехмерных объектов с помощью 3D-принтера из данных 3D-модели под управлением компьютерных программ. Масштаб применения варьируется от печати микрофункциональных деталей до печати крупномасштабных конструкций и зданий [2], [3]. Технология строительной 3D-печати является ресурсосберегающей альтернативой традиционному использованию бетона в строительстве, что делает перспективным ее применение с учетом перспектив глобального потепления [4]. Примерами зданий, напечатанных на 3D-принтере, являются комплекс зданий «Офис будущего» в Дубае, ОАЭ и «Aris Cor House» в Москве, Россия. Здания «офисов будущего» — это полноценные здания, оснащенные системами водоснабжения, электроснабжения, телекоммуникаций и кондиционирования воздуха. В ходе проекта элементы зданий были напечатаны в Китае, а затем доставлены в Арабские Эмираты. В результате реализации проекта затраты на рабочую силу сократились с 50% до 80%, а строительные отходы - с 30% до 60%. Дом «Aris Cor» площадью около 40 квадратных метров был построен в Москве. Стоимость возведения здания составила 10 000 долларов, и все строительные-монтажные работы производились на стройплощадке, в отличие от строительства «офисов будущего» [5].

Основные преимущества 3D-печати зданий это снижение трудозатрат и потерь ресурсов, повышение скорости строительства и свобода в создании архитектурно-выразительных форм [6]. Обзор основных материалов, технологий и проектов в сфере строительной 3D-печати приведен в работе [7]. Обзор методов 3D-печати в бетонном строительстве приведен в статье [8].

В статье [9] исследуются характеристики огнестойкости 20 различных конфигураций 3D-печатных стен с использованием достоверных конечно-элементных моделей в условиях нормированной огневой нагрузки. Выявлено, что несущие пустотные стены, возведенные по аддитивной технологии, обладают значительной огнестойкостью, которая повышается при использовании минераловатной теплоизоляции. Значительное улучшение противопожарных характеристик происходит при увеличении толщины стен, что согласуется с выводами по предыдущим аналогичным исследованиям [10].

В работе [11] проведена экспериментальная и численная оценка теплопроводности стен, возводимых по аддитивной технологии, и сравнение их характеристик с параметрами стен из полнотелого бетона. Наличие воздушных зазоров в ограждающих конструкциях значительно влияет на общий коэффициент теплопроводности [12]. Авторами показано, что при выборе подходящей конфигурации стены для 3D-печати, её сопротивление теплопередаче может стать выше, чем у аналогичной полнотелой стены. Поэтому выбор конфигурации 3D-печатных стен должен быть тщательно продуман с учетом термического сопротивления материала, а введение в бетонную смесь различных добавок может повысить его теплозащитные свойства [13]–[16]. Эти выводы согласуются с исследованием [10], в рамках которого было проведено сравнение энергоэффективности жилых зданий с различными внутренними конфигурациями 3D-напечатанных стен. Энергоэффективность таких ограждающих конструкций может быть повышена посредством изменения внешнего профиля стены с учётом климатических данных региона строительства [17]. Так, в исследовании показано, что применение стен с озеленением, напечатанных на 3D принтере, снизило температуру в здании летом, а также понизило энергопотребление здания в теплый период года. Свобода проектирования, которую обеспечивает применение аддитивных технологий, позволяет создать ограждающие конструкции, интегрированные с высокоэффективными инженерными системами.

Энергозатраты на отопление, вентиляцию и кондиционирование зданий имеют тенденцию к возрастанию [18],[19]. Как было выявлено в работе [20], энергопотребление зданий на инженерные системы составляет 38% от общего энергопотребления. При этом, в коммерческих зданиях энергопотребление в нерабочее время может превышать энергопотребление в рабочие часы в ряде сценариев [21]. Измерение энергопотребления существующих зданий производится, как правило, экспериментальным методом. Новые здания проектируются с учетом требований устойчивого развития и снижения энергопотребления. Энергопотребление зданий прогнозируется с применением численных методов [22] и технологий информационного моделирования зданий (BIM) [23],[24]. Поэтому, повышение энергоэффективности инженерных систем внесет значительный вклад в снижение энергопотребления зданий [19],[25]. Применение принципов

пассивного энергосбережения при проектировании зданий позволяет достичь сокращения годового энергопотребления на 30-35% [26]. Исследование влияния конфигурации 3D-печатной стены на её сопротивление теплопередаче проведено в работе [10]. В рамках исследования [27] сопротивление ограждающих стен теплопередаче было повышено до необходимого, посредством рассмотрения различных конфигураций ограждающих стен. Вместе с этим, было предложено введение в конструкцию стены встроенных накопителей теплоты с фазовым переходом, что повысило скрытую теплоемкость конструкций и снизило энергозатраты на охлаждение здания. Применение теплоносителя с фазовым переходом для повышения теплозащитных свойств ограждающей конструкции описано также в работе [28].

В результате проведенного литературного обзора можно сделать вывод, что энергоэффективность зданий, созданных методом аддитивного строительного производства, зависит от двух основных факторов: энергоэффективности инженерных сетей и систем здания и уровня тепловой защиты здания (энергоэффективности ограждающих конструкций). В данной работе будут рассмотрены и предложены основные научно-обоснованные решения повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий, созданных методом 3D печати. Объектом исследования является сопротивление многослойных стен теплопередаче. В рамках статьи будет рассмотрено два предмета исследования: конфигурация многослойных стен и их несущий материал. Цель исследования – снижение теплопередачи ограждающей конструкции, напечатанной на 3D-принтере. В рамках статьи решаются следующие задачи:

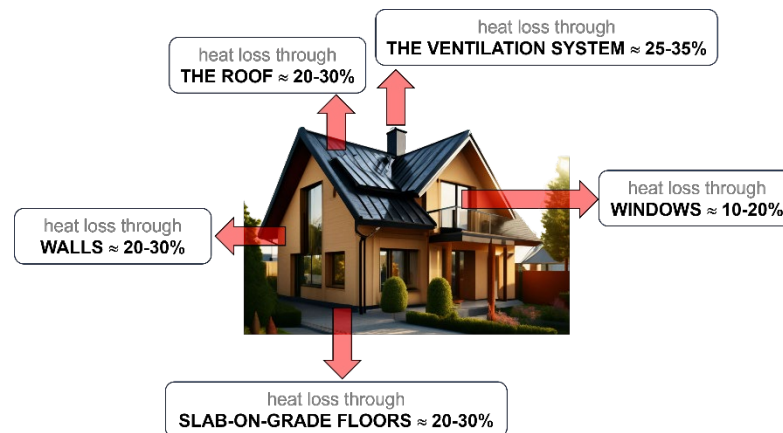
1. Среди рассматриваемых вариантов ограждающих конструкций, определить конфигурацию стены с наивысшим сопротивлением теплопередаче.
2. Оценить достоверность традиционных методов расчета сопротивления теплопередаче при оценке 3D-печатных конструкций сложной внутренней конфигурации.
3. Оценить влияние конфигураций стен на эффективность работы теплоизоляционных материалов.
4. Оценить возможности снижения теплопередачи бетона для 3D-печати.

## 2 Materials and Methods

Чем меньше потребление тепловой энергии, тем более энергоэффективным является здание. Потребление тепловой энергии необходимо прежде всего для компенсации теплопотерь. Теплопотери в зданиях можно разделить на два типа:

1. Трансмиссионные: через ограждающие конструкции здания (кровля, стены, светопрозрачные конструкции, двери, перекрытия и покрытия).
2. Инфильтрационные: через систему вентиляции и неплотности оболочки здания

Структура теплопотерь не является стандартной и зависит от архитектурных, конструктивных и инженерных решений здания. В среднем, для частного жилого здания трансмиссионные и инфильтрационные теплопотери распределяются в следующем соотношении (Рисунок 1).



**Рис. 1 - Стандартное распределение теплопотерь в частном жилом здании**  
**Fig. 1 - Average heat loss distribution values of a detached residential house**

Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания как для традиционных зданий, так и для созданных методом аддитивного строительного производства,

являются наиболее значительными в структуре затрат тепловой энергии на его отопление. Для восполнения потерь тепловой энергии к зданию необходимо подвести тепло. В здании может существовать собственная изолированная система отопления, что более характерно для малоэтажных и небольших зданий. Также, при наличии систем централизованного отопления и районных котельных здание может потреблять тепловую энергию от этих систем, что более характерно для многоэтажной городской застройки. Чем выше сопротивление теплопередаче внешней оболочки здания, тем меньшими оказываются потери тепловой энергии во внешнюю среду. Сокращение теплотерь здания снижает потребность в тепловой энергии, и, как следствие, сокращает расходы на обслуживание и эксплуатацию здания.

## 2.1 Энергоэффективные ограждающие конструкции, выполненные с применением аддитивных технологий

Стены зданий, возводимые с применением аддитивных технологий, классифицируются по: назначению, характеру статической работы, однородности материала, размещению утеплителя в полостях конструкции, последовательности расположения утеплителя, материалу, армированию, а также по наличию диафрагмы жесткости.

По назначению ограждающие конструкции разделяют на наружные, защищающие помещение от природно-климатических воздействий, и внутренние, которые отвечают конструктивно-экологическим, санитарно-гигиеническим эксплуатационным, эстетическим и экономическим требованиям помещений.

По характеру статической работы конструкции могут быть несущими, самонесущими, и ненесущими, выполняющими роль перегородок в помещении.

По однородности материала стены могут быть однородными, т.е. быть заполненными одним материалом, и неоднородными, т.е. состоять из нескольких материалов (Рисунок 2).

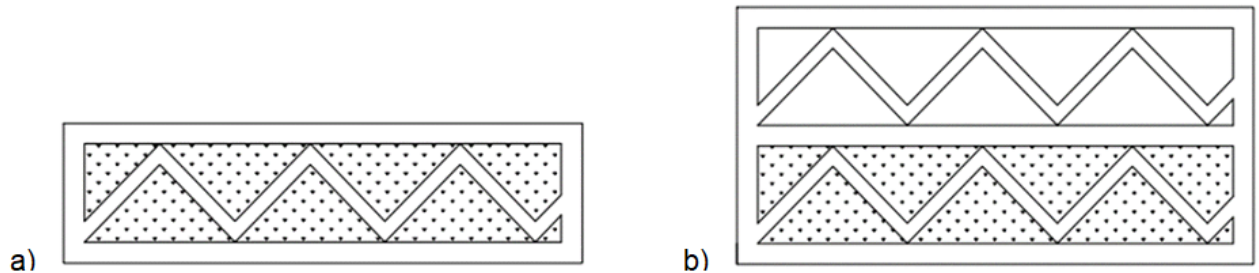


Рис. 2 - а) однородная ограждающая конструкция; б) неоднородная ограждающая конструкция

Fig. 2 - a) homogeneous enclosing structure; b) inhomogeneous enclosing structure

При частичном заполнении неоднородные стеновые конструкции содержат закрытые воздушные полости наряду со слоями строительных материалов. Неоднородные стены с полным заполнением состоят из различных материалов и не имеют воздушных полостей (Рисунок 3).

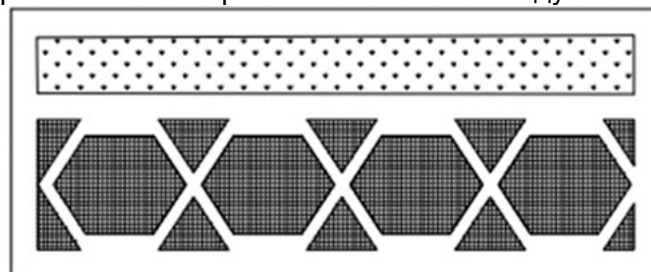


Рис. 3 - Неоднородная ограждающая конструкция с полным заполнением

Fig. 3 - Completely filled inhomogeneous enclosing structure

В неоднородной конструкции теплоизоляционный материал может размещаться на наружной поверхности стены, а также на внутренней и в полостях стены. Утепление стен с наружной и внутренней стороны может осуществляться как одновременно с процессом возведения конструкций, так и по завершению строительства стен. Внутреннее размещение



теплоизоляционного материала в полости стены производят параллельно с возведением каркаса стен.

Структуру стеновой конструкции можно разделить на каркас и внутреннее заполнение. Для печати каркаса используют бетонную смесь и фибробетон. В зависимости от конструктивного решения, для заполнения стены используется тяжелый или легкий бетоны, а также теплоизоляционные материалы в виде волокнистых минераловатных и вспененных полимерных утеплителей, засыпок из различных материалов. Для изготовления бетонной смеси можно использовать наномодифицированные материалы или материалы, которые производятся на основе техногенных отходов [13]–[16].

В зависимости от конструктивного решения проекта каркас напечатанной конструкции стен может быть с диафрагмой жесткости и без нее. Форма диафрагмы жесткости может быть синусоидальной, треугольной, четырехугольной, шестиугольной, состоять из отдельных ребер. Диафрагмы жесткости делят конструкцию на камеры, вследствие чего можно разделить конструкции на однокамерные и многокамерные.

Таким образом, можно сделать вывод, что энергоэффективность аддитивных ограждающих стен зависит в большой степени от конфигурации стены и используемых материалов, как теплоизолирующих, так и несущих.

## 2.2 Роль конфигурации и теплоизоляционных материалов в энергоэффективности аддитивных ограждающих стен

Конфигурации вертикальных ограждающих конструкций, которые чаще всего используются в строительстве при 3D-печати такими компаниями как Apis Cor, WinSun, Contour Crafting Corporation, представлены на рисунке 4.

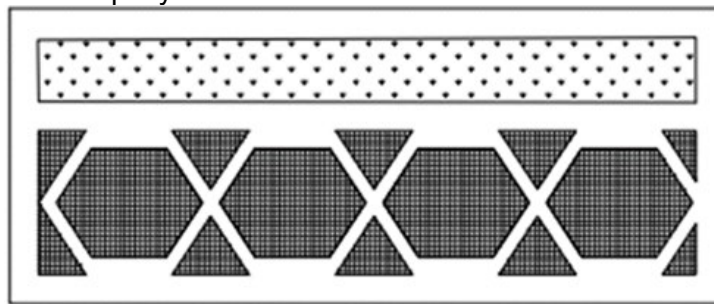


Рис. 4 - Варианты ограждающих конструкций, созданных с применением аддитивных технологий

Fig. 4 - Different types of 3D-printed enclosing structures

Сравнение коэффициента теплопроводности  $K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  для различных конфигураций стеновых конструкций приведено в таблице 1, где  $K_o$  – коэффициент теплопередачи, вычисленный эмпирически, а  $K_{CFD}$  – коэффициент теплопередачи, вычисленный при моделировании тепловых потоков через ограждающую конструкцию методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD) с использованием программного обеспечения Ansys Fluent [29]. В таблице 1 приведены коэффициенты теплопередачи для конструкций без теплоизолирующего материала и с заполнением части пустот теплоизолирующим материалом. В качестве теплоизоляции использован минераловатный утеплитель.

Исходя из конфигураций стен, представленных в таблице 1, и соответствующих им коэффициентов теплопередачи можно сделать следующий вывод: наличие конвекции в конструкции стенового ограждения может как улучшить коэффициент теплопередачи конструкции (конфигурации 1–3 и 8), так и негативно повлиять на теплозащитные свойства стены (конфигурации 4–7). Это дополнительно подтверждает необходимость оценки и выбора корректной конфигурации стенового ограждения при проектировании 3D-печатных зданий. В целом, чем равномернее расположены воздушные полости в стене, тем негативнее влияние конвекции на теплозащитные свойства конструкции.

Таблица 1. Теплопередача 3D-печатных конструкций различных конфигураций [29]  
Table 1. U-values of different types of 3D-printed enclosing structures [29]

№	Конфигурация стены	Коэффициент теплопередачи K			
		без теплоизоляции		с теплоизоляцией	
		$K_{э1}, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$	$K_{CFD1}, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$	$K_{э2}, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$	$K_{CFD2}, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$
1		1.03	0.89	0.33	0.48
2		1.37	1.05	0.33	0.66
3		1.52	1.15	0.28	0.78
4		2.13	2.00	0.36	1.12
5		2.38	3.03	1.10	1.10
6		1.52	1.59	0.40	0.73
7		2.08	2.04	0.37	1.03
8		1.49	1.25	0.31	1.19

Значения коэффициентов теплопередачи стен довольно близки при определении эмпирическими методами и с помощью моделирования для конструкций без теплоизоляции. В среднем, коэффициенты теплопередачи, полученные эмпирически, на 7% ниже коэффициентов теплопередачи, измеренных при моделировании. При наличии теплоизоляции эмпирические коэффициенты теплопередачи значительно ниже значений, полученных при численном моделировании – в среднем, различие между коэффициентами составляет 135%, что сигнализирует о невозможности применения эмпирических методов при расчете стеновых профилей сложной конфигурации.

Конфигурация стены также влияет на величину снижения коэффициента теплопередачи конструкции при заполнении полостей стены теплоизолирующим материалом. За исключением конфигурации 8, добавление теплоизолирующего слоя снизило коэффициент теплопередачи конструкции от 32% до 64% для коэффициентов теплопередачи, измеренных при моделировании.



## 2.3 Энергоэффективные строительные материалы и смеси для аддитивного строительного производства

Рабочим материалом для 3D-принтеров служат следующие материалы: цемент (портландцемент), песок (диоксид кремния, оливин, хромит, циркон, глинозем, муллит, кварцевое стекло, шамот), гипс, модифицирующие добавки, пластификаторы, антизамерзающие добавки, армирующие волокна, ускорители (замедлители) отверждения и вода. Основным строительным материалом несущих конструкций – бетон. Он имеет высокие прочностные характеристики, при этом имеет низкую стоимость и широко распространен [13],[30]–[33].

В качестве расходных материалов для строительных 3D-принтеров можно использовать готовые сертифицированные смеси промышленного производства. Смеси можно изготовить самостоятельно на основе доступных компонентов, или использовать местные строительные материалы типа песка или вулканических пористых пород. Преимущество самостоятельного изготовления бетонной смеси в рамках исследовательской деятельности заключается в возможности свободно проектировать состав бетона под нужды исследования. Запроектировав бетонную смесь с требуемыми добавками, можно получить недорогой строительный материал для 3D-печати с учетом ресурсов региона, где планируется использовать строительный 3D-принтер.

Выбор компонентов бетонной смеси определяется условиями эксплуатации строительных конструкций и необходимостью получения требуемых физико-механических свойств изделий: плотности, прочности, термостойкости, теплопроводности, устойчивости механическим воздействиям в условиях значительного градиента температур. Размер фракции заполнителя определяет толщину и ширину слоя смеси, наносимого экструдером. Предпочтительной является толщина слоя от 5 до 50 мм. Количество связующих материалов определяется необходимостью обеспечения достаточной прочности получаемого изделия.

Пластифицирующие добавки вводятся в бетон для повышения подвижности смеси, снижения пористости и усадки без изменения водоцементного отношения. Введение армирующих волокон из полимерных материалов улучшает сопротивление бетона нагрузкам на растяжение и изгиб. Ряд добавок, вводимых в бетонные смеси, повышает теплозащитные свойства конечного материала. Возможность повышения энергоэффективности смеси для возведения стен здания методом 3D-печати была проанализирована экспериментально. Для повышения сопротивления мелкозернистого бетона теплопередаче в бетонную смесь была введена аэрогелевая пудра в размере 15% по объему.

Смесь для бетонирования образцов была изготовлена на основе сухой цементно-песчаной смеси марки М150. В соответствии с рекомендациями производителя, смесь затворялась водой в соотношении 0.14 л воды на 1 кг смеси. Объемный расход смеси был также рассчитан исходя из рекомендаций производителя. Составы бетонной смеси для бетонирования образцов приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Состав бетонной смеси на 1 л объема**  
**Table 2. Concrete mixture parameters per 1 liter**

	Тип смеси	Сухая цементно-песчаная смесь, кг	Аэрогель, л	Вода, л
1	Контрольная	1.95	-	0.273
2	С введением аэрогеля	1.66	0.15	0.232

В изготовлении образцов габаритами 0.25x0.25x0.03 м использовались опалубочные формы из оргстекла (полиметилакрилата). Бетонирование образцов для измерений производилось через боковую грань призмы. Гладкость поверхностей полиметилакрилата обеспечивает слабую адгезию с бетонной матрицей, и, как следствие, гладкие поверхности образцов. Светопрозрачность опалубочных форм позволяет контролировать наличие пузырьков воздуха и неоднородностей в бетонируемом образце. Бетонирование образца в опалубке из полиметилакрилата изображено на рис. 5.



**Рис. 5 - Бетонирование образца в опалубке из оргстекла**

**Fig. 5 - Concrete casting of a specimen with the framework made of polymethacrylate**

Образцы бетонных пластин после бетонирования выдерживались во влажной среде в течение 7 дней: до теоретического набора прочности 80% от проектной. После этого образцы были просушены в течение 48 ч в сушильном шкафу при температуре 105°C. После остывания коэффициент теплопроводности образцов  $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , был измерен на приборе измерения теплопроводности ПИТ 2.1 производителя ООО "ИзТех". Для повышения точности измерений коэффициенты теплопроводности измерялись дважды для каждого образца. Между измерениями образцы были перевернуты верхними гранями вниз. Таким образом, был измерен тепловой поток, передающийся через конструкцию в обоих направлениях.

Для достижения высокой точности измерений к образцам предъявляются требования по качеству поверхностей и толщине. Поверхность образца должна быть плоской и гладкой, не должна иметь неровностей, раковин, каверн, изломов. В ходе измерений в прибор заносилась информация о толщине образца. Толщина образца измерялась с помощью штангенциркуля по восьми точкам по контуру образца. За окончательное значение толщины образца принималось среднееарифметическое восьми значений. Измеренные значения толщины бетонных образцов приведены в таблице 3, где  $t_i$  – толщина образца, мм, в точке  $i$  при  $1 \leq i \leq 8$ .

**Таблица 3. Толщина бетонных образцов**  
**Table 3. Width of concrete specimens**

№ образца	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_{cp}$
1	30.30	29.75	29.90	29.70	30.30	30.30	30.20	30.20	30.1
2	29.05	28.80	30.00	30.00	30.10	30.10	30.25	30.10	29.8
3	30.00	30.50	29.65	30.05	30.00	30.85	30.60	30.20	30.2
4	29.65	30.65	30.20	30.20	30.05	30.10	30.00	30.10	30.1

### 3 Results and Discussion

Коэффициенты теплопроводности, полученные при исследовании образцов бетонных призм с добавкой аэрогеля в бетонную смесь приведены в таблице 4.

**Таблица 4. Коэффициенты теплопроводности образцов бетона**  
**Table 4. U-values of concrete specimens**

№ образца	Тип образца	Толщина образца, мм	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
1	с аэрогелем	30.1	0.92
2	с аэрогелем	29.8	1.11
3	контрольный	30.2	1.50
4	контрольный	30.1	1.22

Усредненные значения коэффициентов теплопроводности составили  $\lambda_k = 1,36 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  для контрольных образцов и  $\lambda_{AT} = 1,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  для образцов с добавкой аэрогелевой пудры.





В среднем, коэффициент теплопроводности образцов был снижен на 25%. Ввиду малого количества образцов коэффициенты вариации при обработке данных были высокими. Для численного уточнения влияния добавки аэрогелевой пудры в бетонную смесь на теплозащитные свойства готового бетона необходимо проведение более масштабных лабораторных исследований.

## 4 Conclusions

На энергоэффективность зданий, созданных методом 3D-печати, оказывают влияние два основных фактора: это энергоэффективность инженерных систем здания и эффективность сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания. Корректное функционирование инженерных систем обеспечивает равномерное распределение и использование энергии, поступающей в здание. Высокое термическое сопротивление ограждающих конструкций снижает потери энергии здания. В данной работе было рассмотрено влияние конфигурации стен и их материала на эффективность тепловой защиты здания, возведенного с применением аддитивных технологий. На основании численных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Конфигурацией стены с наивысшим сопротивлением теплопередаче является прямоугольный профиль с зигзагообразными диафрагмами жесткости. Увеличение количества параллельных слоев понижает коэффициент теплопередачи конструкции.
2. Результаты, получаемые в ходе эмпирического расчета коэффициента теплопередачи стен сложной конфигурации со слоем теплоизоляции, значительно ниже результатов, полученных при моделировании этих стеновых конструкций. Различие в результатах достигает 284% и, в среднем, составляет 135%. Соответственно, классические формулы для эмпирического расчета не могут быть использованы при расчете термического сопротивления сложных конфигураций.
3. Эффективность работы теплоизолирующих слоев в стенах также зависит от их конфигурации. В соответствии с результатами моделирования, уменьшение коэффициентов теплопередачи для различных конфигураций стен составило от 32% до 64%.

На основании лабораторных исследований можно сделать следующий вывод:

5. Для улучшения теплотехнических свойств бетона при возведении конструкций 3D-печатью в состав смеси можно вводить аэрогелевую пудру. При введении 15% аэрогелевой пудры по объему в смесь было отмечено понижение коэффициента теплопроводности образцов на 25% в среднем. Для численного уточнения влияния добавки аэрогеля на теплопроводность бетона необходимо дальнейшее проведение лабораторных исследований на большем числе образцов.

## 5 Fundings

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2022-010 dated 14 January 2022 and No. 075--01568-23-04 dated 28 March 2023 (Additional agreement 075-03-2022-010/10 dated 09 November 2022, Additional agreement 075-03-2023-004/4 dated 22 May 2023), FSEG-2022-0010.

## 6 Conflict of Interests

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

## References

- 1 Buswell, R.A., Thorpe, A., Soar, R.C. and Gibb, A.G.F. (2008) Design, Data and Process Issues for Mega-Scale Rapid Manufacturing Machines Used for Construction. *Automation in Construction*, **17**, 923–929. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>.
- 2 Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G.F. and Thorpe, A. (2007) Freeform Construction: Mega-Scale Rapid Manufacturing for Construction. *Automation in Construction*, **16**, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.
- 3 Dobrzyńska, E., Kondej, D., Kowalska, J. and Szewczyńska, M. (2021) State of the Art in Additive



- Manufacturing and Its Possible Chemical and Particle Hazards—Review. *Indoor Air*, John Wiley and Sons Inc, **31**, 1733–1758. <https://doi.org/10.1111/ina.12853>.
- 4 Khan, S.A., Koç, M. and Al-Ghamdi, S.G. (2021) Sustainability Assessment, Potentials and Challenges of 3D Printed Concrete Structures: A Systematic Review for Built Environmental Applications. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **303**, 127027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.
- 5 Sakin, M. and Kiroglu, Y.C. (2017) 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, **134**, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>.
- 6 Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J. and Morel, P. (2016) Large-Scale 3D Printing of Ultra-High Performance Concrete – a New Processing Route for Architects and Builders. *Materials & Design*, Elsevier Ltd, **100**, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- 7 Nazarian, S., Duarte, J.P., Bilén, S.G., Memari, A., Radlinska, A., Meisel, N. and Hojati, M. (2021) Additive Manufacturing of Architectural Structures: An Interplay Between Materials, Systems, and Design. *Advances in Science, Technology and Innovation*, Springer Nature, 111–119. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3_15).
- 8 Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C. and Dillenburger, B. (2018) Particle-Bed 3D Printing in Concrete Construction – Possibilities and Challenges. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, **112**, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>.
- 9 Suntharalingam, T., Gatheeshgar, P., Upasiri, I., Poologanathan, K., Nagaratnam, B., Rajanayagam, H. and Navaratnam, S. (2021) Numerical Study of Fire and Energy Performance of Innovative Light-Weight 3D Printed Concrete Wall Configurations in Modular Building System. *Sustainability*, MDPI AG, **13**, 2314. <https://doi.org/10.3390/su13042314>.
- 10 Alkhalidi, A. and Hatuqay, D. (2020) Energy Efficient 3D Printed Buildings: Material and Techniques Selection Worldwide Study. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **30**, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101286>.
- 11 Marais, H., Christen, H., Cho, S., De Villiers, W. and Van Zijl, G. (2021) Computational Assessment of Thermal Performance of 3D Printed Concrete Wall Structures with Cavities. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **41**, 102431. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102431>.
- 12 Zhang, T., Tan, Y., Yang, H. and Zhang, X. (2016) The Application of Air Layers in Building Envelopes: A Review. *Applied Energy*, Elsevier, **165**, 707–734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.108>.
- 13 Lee, Y.H., Chua, N., Amran, M., Yong Lee, Y., Hong Kueh, A.B., Fediuk, R., Vatin, N. and Vasilev, Y. (2021) Thermal Performance of Structural Lightweight Concrete Composites for Potential Energy Saving. *Crystals*, MDPI AG, **11**, 461. <https://doi.org/10.3390/cryst11050461>.
- 14 Robati, M., McCarthy, T.J. and Kokogiannakis, G. (2016) Incorporating Environmental Evaluation and Thermal Properties of Concrete Mix Designs. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **128**, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.092>.
- 15 Prasittisopin, L., Pongpaisanseree, K., Jiramarootapong, P. and Snguanyat, C. (2020) Thermal and Sound Insulation of Large-Scale 3D Extrusion Printing Wall Panel. RILEM Bookseries, Springer, 1174–1182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_111](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_111).
- 16 Craveiro, F., Bartolo, H.M., Gale, A., Duarte, J.P. and Bartolo, P.J. (2017) A Design Tool for Resource-Efficient Fabrication of 3d-Graded Structural Building Components Using Additive Manufacturing. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., **82**, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.05.006>.
- 17 He, Y., Zhang, Y., Zhang, C. and Zhou, H. (2020) Energy-Saving Potential of 3D Printed Concrete Building with Integrated Living Wall. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **222**, 110110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110110>.
- 18 Harmati, N., Jakšić, Ž. and Vatin, N. (2015) Energy Consumption Modelling via Heat Balance Method For Energy Performance of a Building. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **117**, 786–794. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.238>.
- 19 Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. (2008) A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*, **40**, 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- 20 González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J.F., Maestre, I.R. and Yan, D. (2022) A Review on Buildings Energy Information: Trends, End-Uses, Fuels and Drivers. *Energy Reports*, **8**, 626–



637. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>.
- 21 Masoso, O.T. and Grobler, L.J. (2010) The Dark Side of Occupants' Behaviour on Building Energy Use. *Energy and Buildings*, **42**, 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.009>.
- 22 Zhao, H. and Magoulès, F. (2012) A Review on the Prediction of Building Energy Consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 3586–3592. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.
- 23 Thakur, N., Prasath Kumar, V.R. and Balasubramanian, M. (2018) Comparative Energy Audit of Building Models Using BIM for the Sustainable Development. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, Institute of Advanced Scientific Research, Inc., **10**, 986–992. <http://jardcs.org/backissues/abstract.php?archiveid=4213>.
- 24 Ajayi, S.O., Oyedele, L.O. and Ilori, O.M. (2019) Changing Significance of Embodied Energy: A Comparative Study of Material Specifications and Building Energy Sources. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **23**, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.02.008>.
- 25 Singh, P. and Sadhu, A. (2019) Multicomponent Energy Assessment of Buildings Using Building Information Modeling. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier Ltd, **49**, 101603. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101603>.
- 26 Cheung, C.K., Fuller, R.J. and Luther, M.B. (2005) Energy-Efficient Envelope Design for High-Rise Apartments. *Energy and Buildings*, **37**, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.002>.
- 27 Yang, S., Wi, S., Park, J.H., Cho, H.M. and Kim, S. (2019) Novel Proposal to Overcome Insulation Limitations Due to Nonlinear Structures Using 3D Printing: Hybrid Heat-Storage System. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **197**, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.048>.
- 28 Bhamare, D.K., Rathod, M.K. and Banerjee, J. (2020) Numerical Model for Evaluating Thermal Performance of Residential Building Roof Integrated with Inclined Phase Change Material (PCM) Layer. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **28**, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101018>.
- 29 Nemova, D., Kotov, E., Andreeva, D., Khorobrov, S., Olshevskiy, V., Vasileva, I., Zaborova, D. and Musorina, T. (2022) Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures. *Energies*, **15**, 4230. <https://doi.org/10.3390/en15124230>.
- 30 Klyuev, S. V., Klyuev, A. V., Vatin, N.I. and Shorstova, E.S. (2021) Technology of 3-D Printing of Fiber Reinforced Mixtures. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 224–230. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_25).
- 31 Nair, A., Aditya, S.D., Adarsh, R.N., Nandan, M., Dharek, M.S., Sreedhara, B.M., Prashant, S.C. and Sreekechava, K.S. (2020) Additive Manufacturing of Concrete: Challenges and Opportunities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, **814**, 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012022>.
- 32 Amran, M., Abdelgader, H.S., Onaizi, A.M., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Rashid, R.S.M. and Murali, G. (2022) 3D-Printable Alkali-Activated Concretes for Building Applications: A Critical Review. *Construction and Building Materials*, **319**, 126126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126126>.
- 33 Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z. and Dirrenberger, J. (2018) 3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, **112**, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.