



Review Article

Received: September 2, 2023

Accepted: September 9, 2023

Published: October 8, 2023

ISSN 2658-5553

Fire resistance of enclosing structures in modular construction. A review

Kotlyarskaya, Irina Leonidovna^{1*} Vatin, Nikolai Ivanovich¹ Gravit, Marina Victorovna¹ Abdikarimov, Rustamkhan Alimkhanovich² Shinkareva, Maria Konstantinovna¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; iravassilek@mail.ru (K.I.L.); vatin@mail.ru (V.N.I.); marina.gravit@mail.ru (G.M.V.); shinkareva_mk@spbstu.ru (S.M.K.)

² Tashkent Financial Institute, Tashkent, Uzbekistan; rabdikarimov@mail.ru (R.A.A.)

Correspondence: * email iravassilek@mail.ru; contact phone [+79095863919](tel:+79095863919)

Keywords:

Fire Resistance; Scientometric Analysis; Modular Buildings; Module; Modular Facade; Aerogel; Additive Manufacturing; Fire Curtain

Abstract:

Modular building systems are becoming increasingly popular due to their advantages over the traditional construction method. The advantages of modular construction include shortening the construction period and improving the quality of building structures. **The object of the research** is fire-resistant enclosing structures made from ready-made factory blocks (modules). **Method.** The review article uses a general scientific method of synthesis and analysis of information. **Results.** The scientometric analysis was conducted using two scientific databases, Scopus and The Lens. Quantitative analysis revealed that the topic under consideration is developing and promising, and the number of scientific papers grows yearly. The most actively involved in this topic are Perera D., Rajanayagam H., Gatheeshgar P., and Poologanathan K. Most of the scientific work and developments in this area have been done in Australia and the UK. The article discusses the most modern scientific work on the fire resistance of modular facades (ventilated, additive, translucent, wooden, sandwich panels) modular partitions (sandwich panels, frame-modular building systems are becoming increasingly popular due to their advantages over the traditional construction method.

1 Introduction / Введение

Модульные строительные системы, модульные здания и сооружения становятся все более популярными благодаря присущим им преимуществам по сравнению с традиционным методом строительства [1]. Основной особенностью технологического уклада модульного строительства является применение готовых сборных конструкций и элементов зданий и сооружений заводского изготовления [2]. За счет максимальной механизации всех работ в заводских условиях улучшается качество возводимых зданий, так как его части и элементы не подвергаются суровым погодным изменениям и температурным колебаниям [3]. Продолжительность модульного возведения зданий на строительной площадке сокращается, а это ведет к минимизации травм и несчастных случаев на строительном объекте. По данным статьи [4] модульное строительство позволяет сократить сроки на 20–50 процентов и затраты на строительство на 20 процентов. Продолжительность модульного строительства зависит от размера здания и архитектуры.

Временные модульные сооружения обычно готовятся за 30–40 дней, независимо от того, насколько масштабен проект [5].

В статьях [6], [7] приводится классификация модульного строительства в зависимости от вида готовых заводских элементов: элементное (1D), панельное (2D), объемное (3D). Наглядно классификацию представляет Рис. 1.

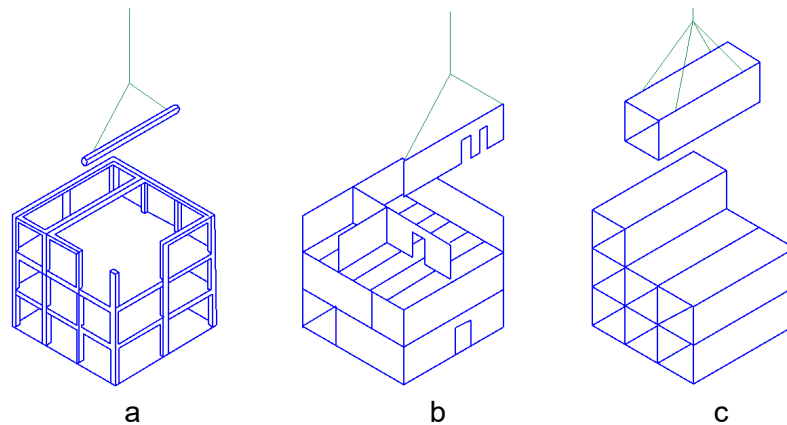


Рис. 1 - Модульные строительные системы (а) элементные (б) панельные (в) объемные
Fig. 1 - Modular building systems (a) elemental (b) panel (c) volumetric

2D модульная технология является видом строительства из готовых плоских элементов, например перегородок, плит, модульных фасадов.

К 3D модульной технологии относятся такие объемные конструкции как помещение, квартира, этаж или здание. Пример модульного отдельно стоящего здания представлен на Рис. 2.

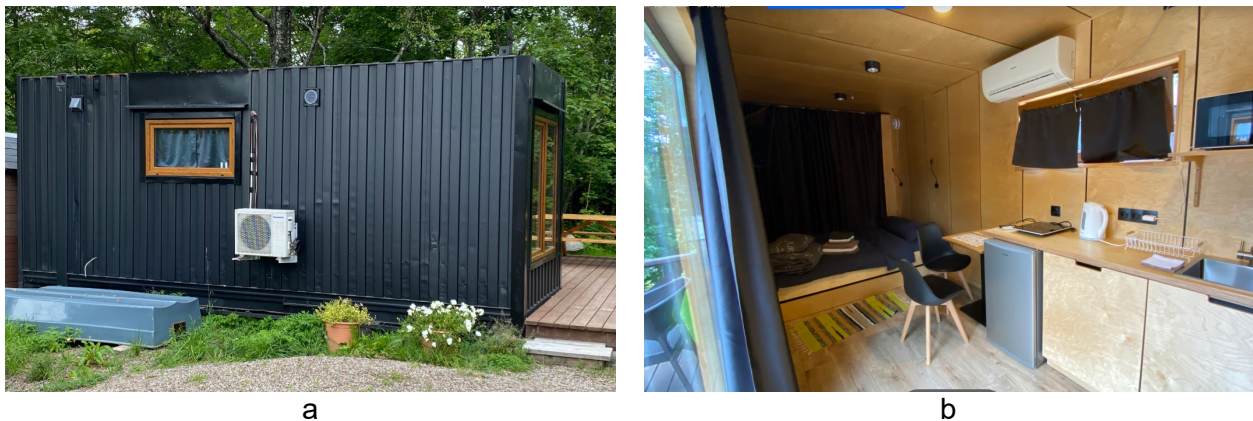


Рис. 2 - Модульное здание (а) снаружи (б) внутри (фото автора)
Fig. 2 - Modular building (a) outside (b) inside (photo by the author)

Представленное на Рис. 2 здание находится в Ленинградской области, посёлок Мельниково. В модуле есть все для комфортного проживания: санузел, зонированная комната, теплые полы, кондиционер, панорамные окна и т.д.

Любое возведенное здание, как по классическому методу, так и с применением модулей, в первую очередь должно быть комфортным и безопасным. Согласно Федеральному закону от 30.12.2009 N 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" [8] комфортным и безопасным зданием или сооружением считается здание или сооружение, при проживании и пребывании, в котором не возникает вредного воздействия на человека в результате физических, биологических, химических, радиационных и иных воздействий.

Особое внимание при проектировании и возведении комфортных и безопасных зданий и сооружений следует уделять пожарной безопасности, так как практически любое здание наполнено множеством легковоспламеняющихся предметов: системы связи, провода, бытовая техника, мебель и т.д. Кроме того, возникший пожар может перекинуться на соседние здания, что приведет к серьезным экономическим потерям и человеческим жертвам. В работе [9] анализируется пожарная ситуация в Китае с 1991 по 2010 год, рассматриваются временные, Kotlyarskaya, I.; Vatin, N.; Gravit, M.; Abdikarimov, R.; Shinkareva M. Fire resistance of enclosing structures in modular construction. A review; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2906. doi: 10.57728/ALF.29.6



пространственные и причинно-следственные данные о пожарах за эти годы. Данная статистика предоставляет ценную информацию для оценки будущих рисков возникновения пожаров.

В статье [10] исследовано огнеупорное качество кирпичных стен исторических зданий при помощи моделирования динамики пожара и экспериментов с тремя типами кирпичных стен в соответствии с кривой зависимости температуры от времени по стандарту ISO 834 "Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements" [11], и представлены способы предотвращения упадка старинных исторических зданий из-за пожара.

В исследовании [12] рассмотрено прогрессирующее обрушение высотного здания вследствие пожара. Ученые [13] предложили расчетный метод определения свойств жаростойкого бетона, а также рассмотрели возможность применения жаростойких тяжелых бетонов с учетом их свойств. Применение огнеупорного стекла в навесных стенах высотных зданий стало объектом исследования в работе [14]. В статье [15] рассматриваются пожарные характеристики фасада одного из самых высоких офисных зданий в Италии "Torre Regione Piemonte", расположенного в Турине (45 этажей общей высотой 183.61 м).

В отношении модульных зданий также проводятся исследования по противопожарным характеристикам, но таких исследований гораздо меньше. Данный анализ направлен на систематизацию данных по исследованию модульных ограждающих конструкций на огнестойкость. Целью исследования является рассмотрение различных огнестойких ограждающих конструкций в зданиях и сооружениях, выполненных из готовых заводских единиц (модулей). Обзор включает в себя количественный анализ (наукометрический) и качественный анализ.

2 Quantitative (scientometric) analysis / Количественный (наукометрический) анализ

Ежегодно количество публикаций в любой научной области увеличивается. Количественным изучением науки занимается наукометрия, которая изучает тенденции и потенциальные направления развития сферы на основе статистической обработки массива статей по выбранной теме и базируется на метаданных и цитировании.

Наукометрические исследования используются во множестве различных научных областей: нанотехнологии [16], [17], океанология [18], экология [19], [20], маркетинг [21], строительство [22], [23] и т.д. Для наукометрического анализа по теме огнестойких модульных конструкций применяются публикации из баз данных Scopus и The Lens.

2.1 Scientometric analysis based on the Scopus / Наукометрический анализ по научной базе Scopus

Scopus – это крупнейшая единая база данных, содержащая аннотации и информацию о цитируемости рецензируемой научной литературы со встроенными инструментами отслеживания, анализа и визуализации данных. Scopus популярен тем, что представляет собой крупнейшую в мире по количеству и качеству рецензируемой литературы наукометрическую базу данных [24], [25]. Наукометрический анализ проводится по следующим параметрам:

- Поиск в пределах: название статьи, аннотация, ключевые слова;
- Поиск по ключевым словам: fire AND resistance AND of AND modular AND buildings.

По данным параметрам обнаружен 41 документ. Для визуализации, кластеризации и анализа разнообразных сетей по метаданным публикаций используется программа VOSviewer [26], [27]. Программа подсказывает, что в статьях используется 444 ключевых слова, из которых 7 слов используется более чем в пяти статьях: structural design, walls, fire performance, modular construction, fire resistance, finite element method, floors. Взаимопересечение этих слов указано на Рис. 3.

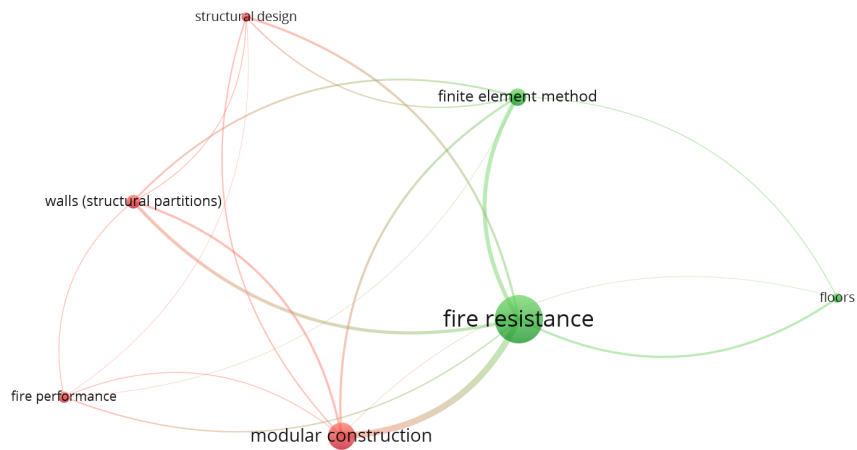


Рис. 3 – Наиболее часто встречающиеся ключевые слова по выбранной теме и их пересечение
Fig. 3 – The most common keywords on the selected topic and their intersection

Аналогичное исследование по авторам публикаций показало, что в выбранных документах участвует 103 автора, из них 4 автора написали более, чем 5 статей по выбранной теме (Рис. 4).

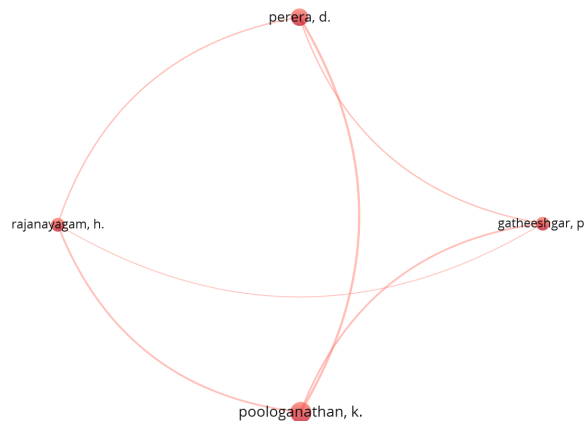


Рис. 4 – Наиболее часто встречающиеся авторы по выбранной теме и их пересечение
Fig. 4 – The most common authors on the chosen topic and their intersection

2.2 Scientometric analysis based on The Lens / Научометрический анализ по научной базе The Lens

The Lens представляет собой онлайн-ресурс для поиска патентов и научной литературы. Он берет библиометрические данные из других баз данных и объединяет их в одну. Поиск осуществляется по следующему запросу:

Scholarly Works = Title: (fire AND (resistance AND (of AND (modular AND buildings)))) OR (Abstract: (fire AND (resistance AND (of AND (modular AND buildings)))) OR (Keyword: (fire AND (resistance AND (of AND (modular AND buildings)))) OR Field of Study: (fire AND (resistance AND (of AND (modular AND buildings))))))))))

Также добавлен фильтр:

Publication Type = (journal article, book chapter, conference proceedings, dissertation, book, conference proceedings article)

По данному запросу составлена подборка из 37 публикаций. График на Рис. 5 показывает количество публикаций за каждый год исследуемого периода.

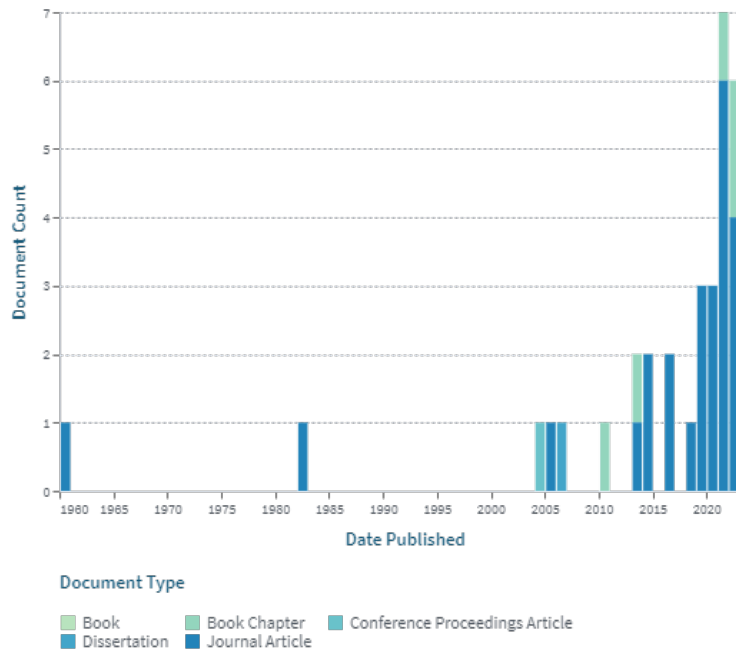


Рис. 5 – Научные труды на протяжении времени
Fig. 5 – Scientific works over time

Среди этих работ исследование двухчасовой огневой нагрузки стен в модульных зданиях [28]; численное исследование огневых и энергетических характеристик инновационных легких аддитивных бетонных стен в модульной строительной системе [29]; работа по проектированию и автоматизации сборных сборных объемных конструкций [30]; экспериментальные и численные исследования огнестойкости стен и колонн в модульных конструкциях [31]; исследование пожарных характеристик модульных полов [32] и исследование огнестойкости модульных стеновых панелей [33].

На Рис. 6 представлена круговая статистическая диаграмма, которая разделена на сектора для иллюстрации числовой пропорции научных трудов по типу.

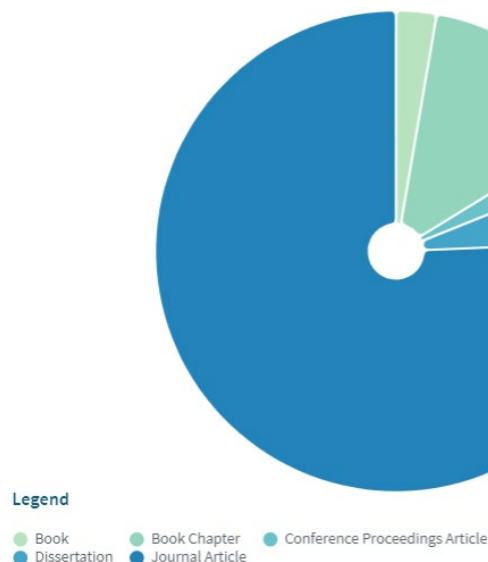


Рис. 6 – Соотношение типов научных трудов
Fig. 6 – Correlation of types of scientific papers

Научных статей по выбранной теме написано 26 штук – это 76% от всего объема научных трудов по выбранной теме. Менее всего написано статей по материалам конференции (1 штука – это 2.7%).

Тема огнестойких модульных конструкций активно изучается мировым научным сообществом. Более всего этой темой занимаются исследователи из Австралии и

Великобритании, а также из Шри-Ланки. Наглядно карта с наиболее активными регионами представлена на Рис. 7.

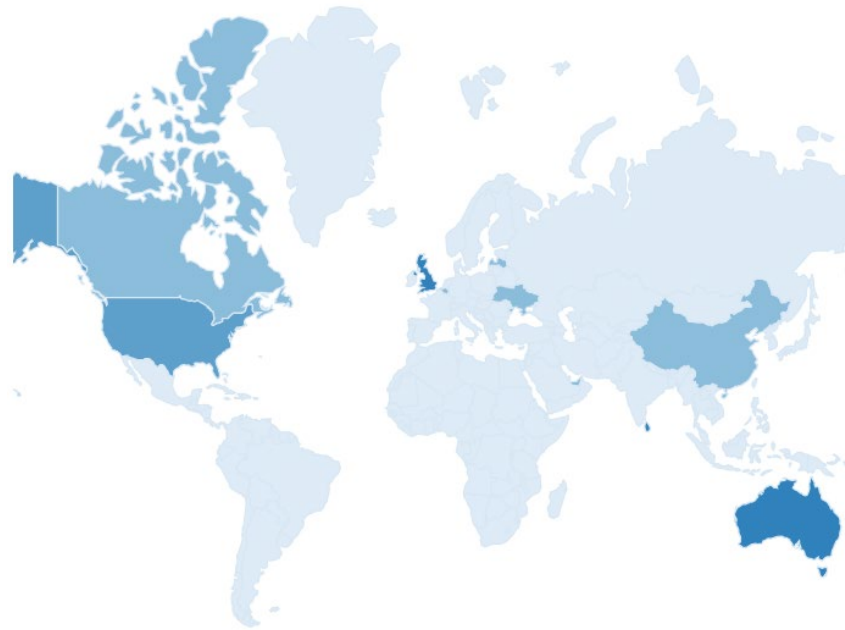


Рис. 7 – Карта с наиболее активными регионами
Fig. 7 – Map with the most active regions

На Рис. 8 представлены авторы, которые наиболее активно занимаются выбранной темой.

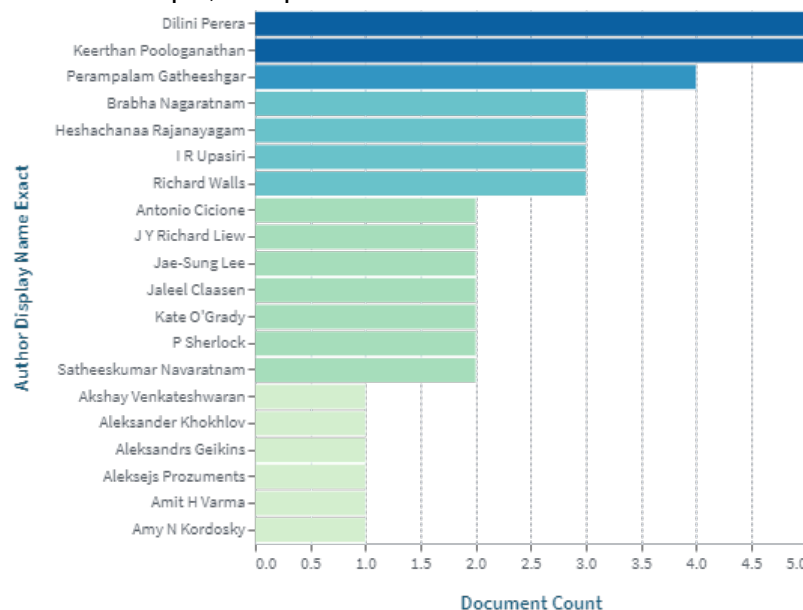


Рис.8 – Авторы по выбранной теме
Fig.8 – Authors on the selected topic

В п. 2.1. также были проанализированы авторы, работающие по теме огнестойких модульных конструкций (Рис. 4). Две научные базы выделяют Perera D., Rajanayagam H., Gatheeshgar P. и Poologanathan K. как наиболее активных ученых по теме исследования.

Рис. 9 отображает издания, в которых публиковались работы по теме огнестойких модульных конструкций. Лидирующих изданий выделить сложно, так как работы публиковались по одной-две штуки в разных журналах.

Poologanathan. В их общей работе [34] с помощью численного анализа исследуются огнестойкие характеристики модульных стеновых панелей с легким стальным каркасом различной конфигурации. Объемный модульный блок может состоять из несущих или ненесущих стеновых панелей с легким стальным каркасом, панелей пола и потолочной панели. Объемные блоки собираются вместе для создания более высокого и широкого здания, таким образом стыкуются рядом две стеновые панели с легким стальным каркасом (ЛСТК), получается двойная панель, которая ранее не была исследована на огнестойкость (Рис.11). В статье рассмотрены 16 модульных конфигураций стен с одинарной и двойной панелью, с обшивкой из одного или двух огнестойких гипсокартонных листов, а также варьировались различные утеплители, а именно каменная вата, стекловолокно и минеральная вата. Время разрушения модульной конструкции определенного типа не зависит от типа изоляции, при тестировании их на огневую нагрузку не было выявлено заметной разницы. Сдвоенные модульные стеновые панели обладают на 170% более высокой огнестойкостью, чем обычная модульная панель из ЛСТК с одинарной обшивкой гипсокартонным листом и на 80% более высокой огнестойкостью, чем обычная модульная панель из ЛСТК с двойным слоем гипсокартонного листа.

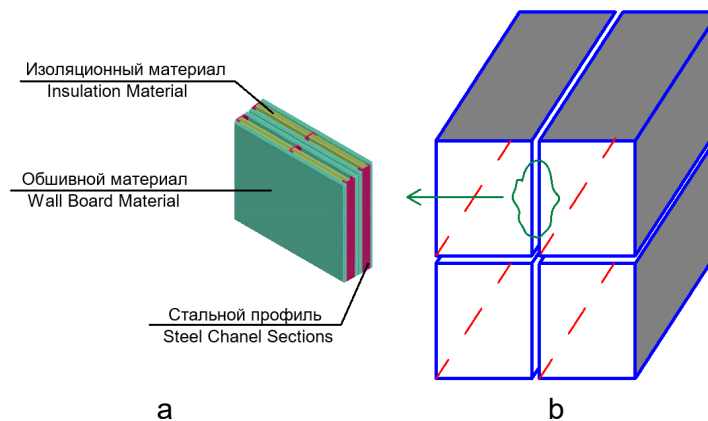


Рис.11 – Стыковка двух модульных панелей (a) конструкция (b) узел
Fig.11 – Docking of two modular panels (a) construction (b) assembly

Логическим продолжением работы [34] стало совместное изучение другого типа модульной стены [35], включающий в себя стальные колонны квадратного полого сечения (Square Hollow Section SHS) для улучшения конструктивных характеристик и удобства в эксплуатации. Огнестойкость стальных модульных конструкций также изучалась в исследовании [36]. При соединении двух модулей вместе кроме сдвоенных стеновых панелей могут оказаться и сгруппированные колонны. В ходе проведенного исследования было выполнено в общей сложности 5 полномасштабных огневых испытаний, которые включали в себя испытание несущей перегородки, ненесущей перегородки и 3 сгруппированные колонны с различными мерами противопожарной защиты. Все образцы стен испытали на себе разрушение гипсокартонных плит с противопожарной стороны и сильное разрушение изоляции из минеральной ваты. Сгруппированные колонны с одним слоем гипсокартонной плиты и утеплителем из минеральной ваты также рано вышли из строя из-за недостаточной огнестойкости. Противопожарные меры с использованием трех слоев гипсокартонных плит позволяют эффективно защитить колонны SHS и обеспечить огнестойкость в течение 180 минут.

Корейские ученые [37], [38] ставили себе задачу создать модульные конструкции, которые смогли бы показать двухчасовые показатели огнестойкости. Результаты экспериментов показали, что образец FR-001 с нанесенной на нижнюю плиту минеральной ватой толщиной 140 мм и образец FR-002, содержащий стекловату толщиной 100 мм для нижней плиты и минеральную вату толщиной 150 мм для верхней плиты, не удовлетворяли двухчасовым показателям огнестойкости из-за быстрой деформации нижней плиты. Образцы разрушились через 75 и 110 мин соответственно. Образец FR-003, содержащий 100 мм стекловаты, 150 мм минеральной ваты в верхней плите и бетон в плите перекрытия, удовлетворял требованиям по огнестойкости в течение двух часов.

В работе [39] описывается тестирование ограждающих конструкций модульного медицинского блока. В исследовании используется крупномасштабный измеритель калорий (10 МВт) для проведения полномасштабных огневых испытаний медицинских модульных блоков. В



первом испытании была использована средняя огневая нагрузка 13.99 кг/м^2 . Во втором испытании для моделирования наихудшего сценария пожара использовался весовой коэффициент 3.5 (пожарная нагрузка 50 кг/м^2). Вспышка в медицинском модульном блоке произошла через 62 минуты в первом тесте и через 12 минут во втором тесте. Термостойкость внешней стены, температуры и деформации элементов конструкции соответствовали требованиям по огнестойкости при 90-минутном горении.

Композитные модули обладают многими преимуществами по сравнению со стальными [40], [41], а именно — это обладают уменьшением размеров размерами и повышенной огнестойкостью, что способствует применению модульных конструкций в высотных зданиях. В статье представлено новое межмодульное соединение для высотных зданий из композитных модулей.

Модульные быстровозводимые здания также проектируют из сэндвич панелей (административно-бытовые здания, офисы, общежития и т.д.) [42]. Эти модули легко и быстро монтируются. В статье [43] представлены результаты испытаний на огнестойкость, проведенных в соответствии с EN 1364–1:2015 “Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 1: Walls” [44] для несущих стен, изготовленных из сэндвич-панелей с использованием различных утеплителей. Самым перспективным, с точки зрения огнестойкости, является конструкция, в которой в качестве утеплителя используется минеральная вата толщиной 150 мм (плотность 105 кг/м^3) с дополнительными герметиками. Эта конструкция позволяет получить класс огнестойкости EI 240. В работе [45] описано усовершенствование моделирования тепловых процессов, происходящих при огневом воздействии на многослойные перегородки с минераловатными плитами. Авторы предлагают использовать коэффициенты теплоотдачи от неотапливаемой поверхности перегородки в граничных условиях. Сравнение результатов огневых испытаний сэндвич панелей, покрытых гипсокартоном или керамической плиткой и, состоящих из пенополиизоциануратной сердцевины (PIR), армированной стекловолокном, показали, что гипсовая плита в качестве покрытия обладает лучшими противопожарными свойствами по сравнению с системами с покрытием керамической плитой [46]. В статье [47] предлагается новая модульная система сэндвич-панелей для внутренних стеновых перегородок, которая может демонтироваться и собираться повторно.

Gateeshgar, P.; Poologanathan, K.; Rajanayagam, H и др. [48], [49] исследуют также бетонные композитные стеновые панели, выполненные методом 3d-печати. Трехмерная печать бетоном (3D concrete printing, 3DCP), также известная как аддитивное производство (Additive Manufacturing AM), способствует цифровой трансформации строительной области. 3DCP подразумевает под собой автоматизированный процесс, в ходе которого создаются бетонные конструкции путем экструзии бетона слой за слоем через сопло с цифровым управлением [50], [51]. Ученые [49] провели детальное параметрическое исследование 140 численных моделей с различными конфигурациями стенок аддитивных панелей (сплошные, с полостями, с полостями, заполненными каменной ватой), и рассмотрели четыре кривых горения (стандартное горение, углеводородное горение, быстрое и длительное горение).

В статье [52] исследуются огнеупорные характеристики 20 различных конфигураций стен из 3DPC с использованием метода конечных элементов в стандартных условиях пожара. В качестве основного материала используется пенобетон, так как у него маленький собственный вес, хорошие характеристики по теплоизоляции, звукопоглощению, сейсмостойкости, у него длительный срок эксплуатации благодаря огнестойкости и атмосферостойкости [53], [54]. Анализ показал, что несущие стенки модуля из 3DPC обладают существенной устойчивостью при стандартной огневой нагрузке. Использование каменной ваты в качестве заполнителя полостей показало превосходные противопожарные характеристики по сравнению с модулем 3DPC без заполнителя. Значительное улучшение противопожарных характеристик было замечено при увеличении толщины параллельных стенок 3DPC-панели.

Подобная модульная стеновая панель была создана научной группой в СПбПУ Петра Великого [55], одна из полостей в котором была заполнена аэрогелевой огнестойкой изоляцией (Рис. 12)

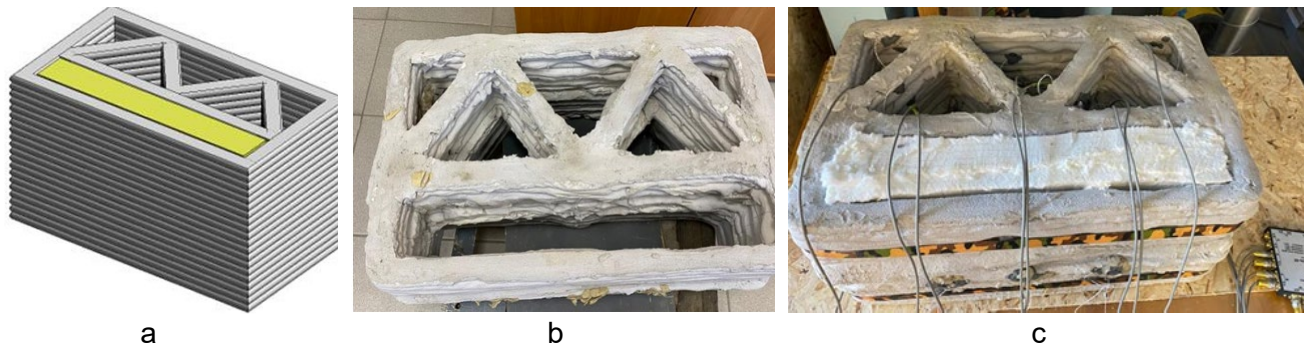


Рис. 12 – (a) Модель аддитивной панели (b) Образец аддитивной панели без аэрогеля (c) Образец аддитивной панели с заполнением аэрогелем
Fig. 12 – (a) Additive panel model (b) Additive panel sample without aerogel (c) Additive panel sample with aerogel filling

Аэрогели и материалы на его основе обладают выдающимися характеристиками, такими как легкий вес, высокая пористость, большая удельная поверхность и низкая плотность [36], [56]. В работе [55] кроме аддитивной модульной панели с аэрогелем представлены другие варианты модульного фасада с использованием аэрогелевой изоляции: навесной вентилируемый фасад и стена каркасно-обшивная. Используемый Alison Aerogel Blanket серии DRT06-Z является негорючим и экологически безопасным материалом.

В публикации [57] отмечается, что каркасы объемных блок-модулей бывают: стальные, деревянные и железобетонные. Подобную классификацию предлагают авторы из Австралии [58] с описанием основных достоинств и недостатков каркасов. Деревянный каркас обладает такими преимуществами как прочность и простота в изготовлении. Авторы считают, что модульные здания с деревянным каркасом должны быть 1-2-этажные, это могут быть учебные заведения или частные дома. Однако есть существующие здания с деревянным каркасом, которые являются многоэтажными, например, небоскреб “Mjøstårnet” в Норвегии, построенный в марте 2019 года. Он имеет высоту 85.4 метра (18 этажей). Это здание является самым высоким строением из дерева в мире [59]. В Норвегии также есть 14-этажное жилое здание “Treet”, что переводится с норвежского языка как «дерево». Здание полностью выполнено из дерева, из древесины состоят все ограждающие и несущие конструкции [60].

О деревянном домостроении есть распространенное мнение, что оно является опасным и подвержено быстрому сгоранию при пожаре, но этому есть опровержения. По результатам многочисленных исследований и экспериментов выявлено, что даже необработанная специальными средствами древесина при достаточных размерах сечения показывает высокое время сопротивления воздействию открытого огня, что обусловлено обугливанием поверхностного слоя. Внутренняя же часть в течение довольно продолжительного времени сохраняет свои прочностные характеристики [61]. Для строительства высотных модульных зданий из дерева используются современные конструкции из клееной древесины: LVL (Laminated Veneer Lumber) брусья и CLT (Cross-Laminated Timber) панели.

CLT-панели представляют собой перекрестно клееные панели, состоящие из пиленых досок (расположенных под углом 90° относительно друг друга), прессованных горизонтально и вертикально [62]–[64]. Сырьем для производства CLT-панелей служит сухая доска 12%-й влажности, преимущественно хвойных пород. Они зарекомендовали себя как пожаробезопасные. В работе [65] проведены экспериментальные огневые испытания панелей CLT (120 мм толщина). Результаты показывают, что средняя скорость обугливания незащищенной стеновой панели CLT составляет от 0.63 до 0.66 мм/мин, что соответствует одномерной скорости обугливания 0.65 мм/мин по Eurocode 5: Design of timber structures [66]. Защитные покрытия, изготовленные из гипсокартона Fireline и комбинации фанеры и гипсокартона Fireline, замедлили обугливание панелей CLT на целых 30 и 44 минуты соответственно [65].

Для предотвращения появления пожара и распространения продуктов горения из одного помещения в другие помещения в объемном модуле должны применяться противопожарные преграды. Один из вариантов – это применение трансформируемых противопожарных преград, например, противопожарных штор. При возникновении пожара по сигналу пожарной сигнализации трансформируемая завеса автоматически опускается и ограничивает местонахождение пожара [67], [68]. Противопожарные шторы используются для защиты горизонтальных проемов: оконные



и конвейерные проемы, вертикальных проемов: дверные, воротные и лифтовые проемы [69], [70], проемы тамбур-шлюзов.

3.2 Modular floors / Модульные полы

Панели пола из ЛСТК обычно состоят из холодногнутых стальных балок, облицовки из огнестойких плит и изоляционных материалов. Такие конструкции все чаще используются в малоэтажных и среднеэтажных модульных зданиях благодаря их многообещающим преимуществам: легкости, простоте транспортировки, высококачественной отделке, пожарной безопасности и простоте монтажа [71], [72]. Прогресс, достигнутый в производственных технологиях в сочетании с использованием методов оптимизации, привел к созданию инновационных профилей из холодногнутой стали. В 2016 году ученые из Великобритании [73] представили новую балку со складчатым фланцем, заявив, что способность к изгибу увеличена на 50% по сравнению с обычной геометрией балки с ребристым швеллером, использующей то же количество материала. Балка “super-sigma” [74], [75] обладает примерно на 65% большей изгибающей способностью по сравнению с обычной балкой с ребристым швеллером, использующей то же количество материала. Таким образом, существовала необходимость в исследовании огнестойких характеристик обычных и модульных панелей пола из ЛСТК, изготовленных из инновационных профилей из холодногнутой стали. В статье [71] описывается такое исследование с помощью метода конечных элементов. Результаты показали, что модульные напольные панели из ЛСТК обладают значительно улучшенной прочностью конструкции и изоляции (>4 часов) по сравнению с обычными напольными панелями из ЛСТК. Было замечено, что новые оптимизированные балки демонстрируют не только улучшенные конструктивные характеристики, но и отражают высокий потенциал огнестойкости - до 75% по сравнению с эталонным швеллером при том же количестве материала и приложенной нагрузке. Сделан вывод, что напольные панели из ЛСТК с оптимизированными балками из холодногнутой стали можно использовать в обычных системах напольных покрытий и особенно в модульных зданиях для повышения противопожарных характеристик.

Все большее распространение получают стальные волокна в качестве единственного армирующего элемента в системах плоских плит перекрытия. Доказано, что стальные волокна эффективны в уменьшении расширения трещин и повышении сопротивления бетона изгибу [76]–[79]. В статье [80] исследуются структурные характеристики напольной системы из сталефибробетона для модульной конструкции при нормальной температуре и в условиях пожара. Результаты огневых испытаний показывают, что плиты со стальными волокнами можно безопасно использовать в модульной конструкции, не беспокоясь об их огнестойкости. Важно отметить, что плиты, протестированные в исследовании, были двусторонними, но также в модульных системах плиты могут быть и односторонними. Исследуемая плита с минимальной шириной 130 мм и минимальным содержанием стального волокна (1.5%) обеспечивает огнестойкость не менее 2 часов и может безопасно использоваться в системе перекрытий многоэтажных модульных зданий. Режим разрушения таких плит в условиях пожара характеризуется сочетанием крупных и второстепенных трещин, окружающих периферию верхней поверхности, и локализованного откалывания на нижней поверхности плиты. По сравнению с обычными железобетонными плитами, армированными стальной арматурой, сколы в плитах из сталефибробетона менее серьезны из-за присутствия стальных волокон.

3.3 Modular translucent structures / Модульные светопрозрачные конструкции

Модульный фасад в свою очередь может быть полностью стеклянным [81]. В его составе могут использоваться стеклопакеты с аэрогелевой изоляцией [82]. Для придания большей огнестойкости и энергоэффективности в его конструкции может также содержаться аэрогель, так как в естественном виде он является прозрачным [83], [84].

В начале этого столетия ученые начали наносить кремнеземные аэрогели на окна с помощью погружного или отжимного покрытия, т.е. в виде пленки, чтобы повысить энергоэффективность, а также придать большую огнестойкость конструкции [85], [86].

В 2004 году группа ученых [87] исследовала новую конструкцию, которая представляла собой прозрачный строительный элемент, содержащий два параллельно расположенных листа

остекления, выполненных с промежуточным пространством между ними. В промежуточном пространстве между листами размещался упрочненный волокном мат из аэрогеля.

Причина замедленного темпа производства аэрогелевых окон заключается в том, что они, во-первых, дорогие, во-вторых, при помощи них невозможно обеспечить одновременно отличную теплоизоляцию и высокую прозрачность. В 2013 году был проведен эксперимент [88] в полевых условиях для анализа тепловых, оптических и акустических свойств аэрогелевого остекления. Учеными было обнаружено, что по сравнению с обычными стеклопакетами с двойным остеклением, заполненным воздухом, аэрогелевые окна могут снизить энергопотребление при нагреве до 50% и повысить уровень звукоизоляции на 3 дБ. Однако они снизили уровень освещенности в пасмурный и солнечный дни до 47% и 10% соответственно. Однако, подобные конструкции успешно используются на практике в Норвегии [89]. Дом, представленный на Рис. 13, был спроектирован так, чтобы стены на третьем этаже, обращенные на восток, юг и запад, были с панелями остекления из аэрогеля (65 % площади стен). Стены не являются полностью прозрачными, они матовые, но пропускают солнечный свет, что является важным для северного региона. Толщина панели составляет 7.5 см.



Рис. 13 – Жилой дом в Холменколлене, Осло, Норвегия
Fig. 13 – Residential building in Holmenkollen, Oslo, Norway

Обладатели такого дома подтверждают [90], что стены в их доме пропускают много света, при этом хорошо изолируют и не дают никакого представления о происходящем, так как являются матовыми. Также они утверждают, что поскольку материал такой тонкий, они получили много дополнительных квадратных метров, отказавшись от традиционных утеплителей. Менеджер проекта подсчитал, что на третьем этаже стало на 13.2 квадратных метра больше для проживания при выборе аэрогелевых панелей вместо стекловаты и других более толстых изоляционных материалов.

В коммерческом секторе аэрогелевое огнестойкое остекление также используют. В качестве примера можно привести супермаркет Rama 1000 в Кроппанмарке, Тронхейм, Норвегия. В этом проекте стена (а также частично крыша) была спроектирована со встроенным аэрогелевым остеклением, которое эффективно рассеивает дневной свет в магазине и в то же время делает ненужной установку дорогостоящих систем затенения [91].

В швейцарской федеральной лаборатории материаловедения и технологий Empa, которые ранее представляли аэрокирпич, разработали экспериментальные полупрозрачные кирпичи, наполненные кремнеземным аэрогелем [92]. Ученые использовали конструкцию из стеклянного корпуса с перемычками и прокладками из эпоксидной смолы, внутри которой размещен аэрогель из кремния. Получается непрозрачная, но доступная для проникновения солнечных лучей конструкция (Рис. 14). Экспериментальные кирпичи можно использовать при возведении несущих стен.

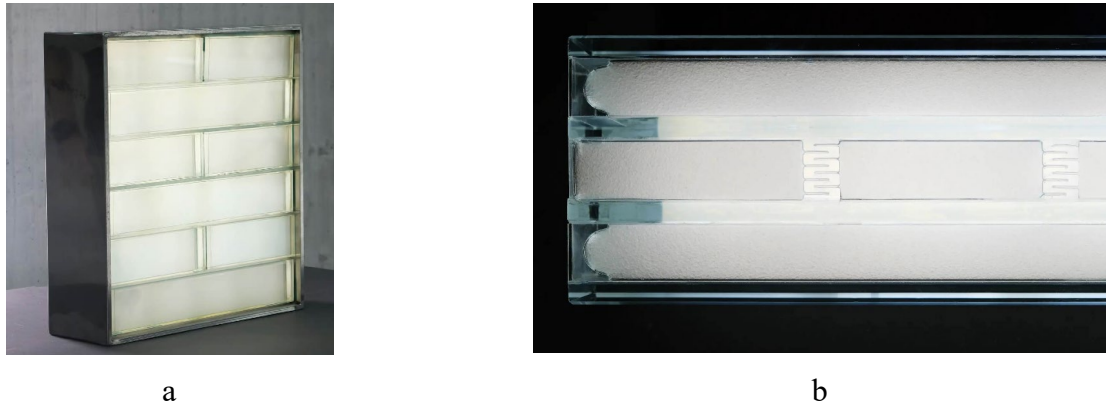


Рис. 14 – Полупрозрачный кирпич из аэрогеля (а) вид сбоку, (б) в разрезе
 Fig. 14 – Translucent aerogel brick (a) side view, (b) in section

4 Conclusions / Выводы

1. Первая половина статьи посвящена количественному изучению огнестойких ограждающих конструкций в модульном строительстве. Был проведен наукометрический анализ с использованием двух научных баз Scopus и The Lens, где при помощи фильтров были отсортированы работы на тему "fire resistance of modular buildings" (огнестойкость модульных зданий). В первой базе найден 41 документ, во второй найдено 37 документов. Количественный анализ выявил, что рассматриваемая тема является развивающейся и перспективной, количество научных трудов с каждым годом растет. Ученые, которые наиболее активно занимаются данной темой: Perera D., Rajanayagam H., Gatheeshgar P. и Poologanathan K. Больше всего научных трудов и разработок в этой области сделано в Австралии и Великобритании.

2. Во второй части статьи рассмотрены современные научные труды (2004–2023) по огнестойкости модульных фасадов (вентилируемый, аддитивный, светопрозрачный, деревянный, сэндвич панели), модульных перегородок (сэндвич панели, каркасно-обшивные стены), модульных полов, а также трансформируемых противопожарных штор.

References

- 1 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **16**, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008>.
- 2 Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A. and Mendis, P. (2019) New Advancements, Challenges and Opportunities of Multi-Storey Modular Buildings – A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, Elsevier, **183**, 883–893. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.061>.
- 3 Kozlovská, M., Kaleja, P. and Struková, Z. (2014) Sustainable Construction Technology Based on Building Modules. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd, **1041**, 231–234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1041.231>.
- 4 Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G. and Woetzel, J. (2019) Modular Construction: From Projects to Products. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>.
- 5 (2017) Difference Between Permanent And Temporary Modular Structures. <https://www.northgateindustries.com/post/difference-permanent-temporary-modular-structures>.
- 6 Thai, H.T., Ngo, T. and Uy, B. (2020) A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier, **28**, 1265–1290. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070>.
- 7 Dan-Adrian, C. and Tsavdaridis, K.D. (2022) A Comprehensive Review and Classification of Inter-Module Connections for Hot-Rolled Steel Modular Building Systems. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **50**, 104006. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104006>.
- 8 Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures. <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102135277&intelsearch=30.12.2009+%B9+384>.



- 9 Xin, J. and Huang, C.F. (2014) Fire Risk Assessment of Residential Buildings Based on Fire Statistics from China. *Fire Technology*, Kluwer Academic Publishers, **50**, 1147–1161. <https://doi.org/10.1007/S10694-013-0327-8/METRICS>.
- 10 Shao, P.-C., Shao, C.-H., Shao, P.-C. and Shao, C.-H. (2018) Fire-Resistant Characteristics of Traditional Buildings in Urban Historic Districts. *E3SWC*, EDP Sciences, **53**, 03053. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20185303053>.
- 11 ISO 834-1:1999 - Fire-Resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 1: General Requirements. <https://www.iso.org/standard/2576.html>.
- 12 Fu, F. (2022) Progressive Collapse Resistant Design of Tall Buildings under Fire Load. *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems*, CRC Press, 193–194. <https://doi.org/10.1201/9781003348450-90>.
- 13 Akramov, K.M. and Mamadboev, S.B. (2020) Fire Resistant Properties of Construction Structure. *Asian Journal of Multidimensional Research (AJMR)*, Diva Enterprises Private Limited, **9**, 415. <https://doi.org/10.5958/2278-4853.2020.00190.1>.
- 14 Bai, B., Liu, Z., Lu, L. and Zhang, B. (2020) Research on Influencing Factors of Fire Resistance of Curtain Wall in High-Rise Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, **1549**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/3/032031>.
- 15 Sassi, S., Setti, P., Amaro, G., Mazziotti, L., Paduano, G., Cancelliere, P. and Madeddu, M. (2016) Fire Safety Engineering Applied to High-Rise Building Facades. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **46**. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20164604002>.
- 16 Biglu, M.-H., Eskandari, F. and Asgharzadeh, A. (2011) Scientometric Analysis of Nanotechnology in MEDLINE. *BiolImpacts: BI*, **1**. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23678427/>.
- 17 Zeb, A., Liu, W., Wu, J., Lian, J. and Lian, Y. (2021) Knowledge Domain and Emerging Trends in Nanoparticles and Plants Interaction Research: A Scientometric Analysis. *NanoImpact*, Elsevier, **21**, 100278. <https://doi.org/10.1016/J.IMPACT.2020.100278>.
- 18 Arasakumar, G.M., Kattari, K., Velu, A., Shanmugam, V., Pichandi, U. and Esakkimuthu, P. (2023) Research on Scientometric Analysis of Physical Oceanography. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0133549>.
- 19 Oh, M.-S., Kil, S.-C. and Cho, J.-D. (2016) Scientometric Analysis for Low Carbon Energy. *Economic and Environmental Geology*, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, **49**, 53–61. <https://doi.org/10.9719/eeg.2016.49.1.53>.
- 20 Zahoor, A., Xu, T., Wang, M., Dawood, M., Afrane, S., Li, Y., Chen, J.L. and Mao, G. (2023) Natural and Artificial Green Infrastructure (GI) for Sustainable Resilient Cities: A Scientometric Analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, Elsevier, **101**, 107139. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2023.107139>.
- 21 Zuberi, M.F. and Pelton, L.E. (2016) Scientometric Analysis of Marketing Theoreticians. *Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*, Springer Nature, 723–724. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11815-4_219.
- 22 Antwi-Afari, P., Ng, S.T. and Hossain, M.U. (2021) A Review of the Circularity Gap in the Construction Industry through Scientometric Analysis. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **298**, 126870. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126870>.
- 23 Yilmaz, Y. and Seyis, S. (2021) Mapping the Scientific Research of the Life Cycle Assessment in the Construction Industry: A Scientometric Analysis. *Building and Environment*, Pergamon, **204**, 108086. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108086>.
- 24 Guerrero-Bote, V.P., Chinchilla-Rodríguez, Z., Mendoza, A. and de Moya-Anegón, F. (2021) Comparative Analysis of the Bibliographic Data Sources Dimensions and Scopus: An Approach at the Country and Institutional Levels. *Frontiers in research metrics and analytics*, Frontiers Media SA, **5**. <https://doi.org/10.3389/frma.2020.593494>.
- 25 Anker, M.S., Hadzibegovic, S., Lena, A. and Haverkamp, W. (2019) The Difference in Referencing in Web of Science, Scopus, and Google Scholar. *ESC heart failure*, Wiley-Blackwell, **6**, 1291–1312. <https://doi.org/10.1002/ehf2.12583>.
- 26 van Eck, N.J. and Waltman, L. (2017) Citation-Based Clustering of Publications Using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, Springer Netherlands, **111**, 1053–1070. <https://doi.org/10.1007/S11192-017-2300-7/TABLES/4>.
- 27 Bukar, U.A., Sayeed, M.S., Razak, S.F.A., Yogarayan, S., Amodu, O.A. and Mahmood, R.A.R. (2023) A Method for Analyzing Text Using VOSviewer. *MethodsX*, Elsevier, **11**, 102339. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2023.102339>.



- 28 Kim, G.-D., Lee, J.-S., Son, S.-M. and Lee, B.-S. (2014) An Experimental Study on 2 Hours Fire Resistance Performance of Load Bearing Walls Used in Modular Buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, Architectural Institute of Korea, **30**, 3–10. https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2014.30.4.003.
- 29 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 2021, Vol. 13, Page 2314*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 2314. <https://doi.org/10.3390/SU13042314>.
- 30 Liew, J.Y.R. and Chua, Y.S. (2021) Design and Automation for Prefabricated Prefinished Volumetric Construction in Tall Buildings. *Advances in 21st Century Human Settlements*, Springer, 195–224. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5_8/COVER.
- 31 Yu, Y., Tian, P., Man, M., Chen, Z., Jiang, L. and Wei, B. (2021) Experimental and Numerical Studies on the Fire-Resistance Behaviors of Critical Walls and Columns in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **44**, 102964. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102964>.
- 32 Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Thamboo, J., Roy, K., Rossi, B., Molken, T., Perera, D. and Navaratnam, S. (2021) On the Fire Behaviour of Modular Floors Designed with Optimised Cold-Formed Steel Joists. *Structures*, Elsevier, **30**, 1071–1085. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.01.055>.
- 33 Perera, D., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Upasiri, I.R., Sherlock, P., Rajanayagam, H. and Nagaratnam, B. (2021) Fire Performance of Modular Wall Panels: Numerical Analysis. *Structures*, Elsevier, **34**, 1048–1067. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.06.111>.
- 34 Perera, D., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Upasiri, I.R., Sherlock, P., Rajanayagam, H. and Nagaratnam, B. (2021) Fire Performance of Modular Wall Panels: Numerical Analysis. *Structures*, Elsevier, **34**, 1048–1067. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.06.111>.
- 35 Perera, D., Upasiri, I.R., Poologanathan, K., Perampalam, G., O’Grady, K., Rezazadeh, M., Rajanayagam, H. and Hewavitharana, T. (2022) Fire Performance Analyses of Modular Wall Panel Designs with Loadbearing SHS Columns. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, **17**, e01179. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01179>.
- 36 Porous Aerogel, A., Hoon Lee, K., Arshad, Z., Dahshan, A., Alshareef, M., Alsulami, Q.A., Bibi, A., Lee, E.-J., Nawaz, M., Zubair, U. and Javid, A. (2023) Porous Aerogel Structures as Promising Materials for Photocatalysis, Thermal Insulation Textiles, and Technical Applications: A Review. *Catalysts 2023, Vol. 13, Page 1286*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 1286. <https://doi.org/10.3390/CATAL13091286>.
- 37 Kim, G.-D., Lee, J.-S., Son, S.-M. and Lee, B.-S. (2014) An Experimental Study on 2 Hours Fire Resistance Performance of Load Bearing Walls Used in Modular Buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, Architectural Institute of Korea, **30**, 3–10. https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2014.30.4.003.
- 38 Son, S.-M., Lee, J.-S. and Na, O.-P. (2021) Experimental Study on Two-Hour Fire Resistance Performance of Slabs in Modular Buildings under Loads. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, **21**, 15–21. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.2.15>.
- 39 Kim, H.J., Lee, J.S., Kim, H.Y., Cho, B.H., Xi, Y. and Kwon, K.H. (2013) An Experimental Study on Fire Resistance of Medical Modular Block. *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, **15**, 103–130. <https://doi.org/10.12989/SCS.2013.15.1.103>.
- 40 Kandel, A., Thai, H. and Ngo, T. (2023) Development of Novel Inter-module Connection for Composite Modular Tall Buildings. *ce/papers*, Wiley, **6**, 107–112. <https://doi.org/10.1002/cepa.2398>.
- 41 Liew, J.Y.R., Chua, Y.S. and Dai, Z. (2019) Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier, **21**, 135–149. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010>.
- 42 Bozhenko, A.M., Shevtsova, M.A. and Albutova, T.K. (2020) The Comparative Analysis of Different Types of Insulations in Sandwich Panels for Building Construction with Metal Frame. *COMPONENTS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROGRESS*, **10**, 5–7. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44342283>.



- 43 Roszkowski, P. and Sulik, P. (2016) SANDWICH PANELS – BEHAVIOR IN FIRE BASED ON FIRE RESISTANCE TESTS. *Applications of Structural Fire Engineering*, Czech Technical University in Prague. <https://doi.org/10.14311/asfe.2015.065>.
- 44 EN 1364-1:2015 - Fire Resistance Tests for Non-Loadbearing Elements - Part 1: Walls. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/bea6cc6b-69a7-4281-b2a4-d43b2c4f84dc/en-1364-1-2015>.
- 45 Danchenko, Y., Kachkar, Y. and Rashkevich, N. (2023) INVESTIGATION OF INFLUENCE OF FACTORS ON FIRE RESISTANCE OF PARTITIONS MADE OF SANDWICH PANELS. *Municipal economy of cities*, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, **1**, 145–150. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-145-150>.
- 46 Murillo, M.A., Acosta, A.P., Quesada, C.Q., Abisambra, V.G., Tutikian, B.F. and Christ, R. (2022) Comparative Experimental Analysis of the Fire Resistance of Sandwich Panels with Polyisocyanurate Core Reinforced with Fiberglass Fabric. *Case Studies in Thermal Engineering*, Elsevier, **40**, 102550. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2022.102550>.
- 47 Ferreira, S., Morais, M., Costa, V., Velosa, A., Vela, G., Teles, J. and Pereira, T. (2023) Modular Sandwich Panel System for Non-Loadbearing Walls – Experimental Mechanical, Fire and Acoustic Testing. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **78**, 107642. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107642>.
- 48 Suntharalingam, T., Gatheeshgar, P., Upasiri, I., Poologanathan, K., Nagaratnam, B., Corradi, M. and Nuwanthika, D. (2021) Fire Performance of Innovative 3D Printed Concrete Composite Wall Panels—A Numerical Study. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00586>.
- 49 Suntharalingam, T., Upasiri, I., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Nagaratnam, B., Rajanayagam, H. and Navaratnam, S. (2021) Fire Resistance of 3D Printed Concrete Composite Wall Panels Exposed to Various Fire Scenarios. *Journal of Structural Fire Engineering*, Emerald Group Holdings Ltd., **12**, 377–409. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2020-0029/FULL/HTML>.
- 50 Beyhan, F. and Arslan Selçuk, S. (2018) 3d Printing in Architecture: One Step Closer to a Sustainable Built Environment. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, **6**, 253–268. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_20.
- 51 Balletti, C., Ballarin, M. and Guerra, F. (2017) 3D Printing: State of the Art and Future Perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, Elsevier Masson SAS, **26**, 172–182. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.02.010>.
- 52 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 2021, Vol. 13, Page 2314*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 2314. <https://doi.org/10.3390/SU13042314>.
- 53 Wei, S., Yiqiang, C., Yunsheng, Z. and Jones, M.R. (2013) Characterization and Simulation of Microstructure and Thermal Properties of Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **47**, 1278–1291. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.06.027>.
- 54 Kim, H.K., Jeon, J.H. and Lee, H.K. (2012) Workability, and Mechanical, Acoustic and Thermal Properties of Lightweight Aggregate Concrete with a High Volume of Entrained Air. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **29**, 193–200. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.08.067>.
- 55 Kotlyarskaya, I.L., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I. and Nemova, D.V. (2022) Modular Energy-Efficient Enclosing Structures with the Aerogel Thermal Insulation. A Review. *AlfaBuild*, **24**, 2402–2402. <https://doi.org/10.57728/ALF.24.2>.
- 56 Sorrell, S. (2015) Reducing Energy Demand: A Review of Issues, Challenges and Approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **47**, 74–82. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.002>.
- 57 Abramyan, S.G., Burlachenko, O. V. and Galda, Z.Yu. (2021) Three-Dimensional Block Modules as a Variety of Modular Structures of Prefabricated Building Systems. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo rHITEKTURA*, **1**, 5–13. https://www.researchgate.net/publication/352908745_Obemnye_blok-moduli_kak_raznovidnost_modulnyh_konstrukcij_bystrovovodimyh_zdanij.
- 58 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **16**, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008>.



- 59 Kotov, V.M. and Ekba, S.I. (2019) Prospects for the Use of Timber Structures in the Construction of Multistorey Buildings. *Construction production*, National Educational Center LLC, 31–34. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_4_31.
- 60 Slivets, E.P. (2021) Prospects for the Use of Wooden Structures in High-Rise Housing Construction. *Issues of development of modern science and technology*, 191–201. <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-derevyannyh-konstruktsiy-v-vysotnom-domostroenii/viewer>.
- 61 Dmitrievna, P.D. and Dmitrievna, P.N. (2017) Problems and Prospects of Multistory Wooden Construction. *AlfaBuild*, **1**, 121–129. <https://doi.org/10.34910/ALF.1.10>.
- 62 Liu, J. and Fischer, E.C. (2022) Review of Large-Scale CLT Compartment Fire Tests. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **318**, 126099. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126099>.
- 63 Henek, V., Venkrbec, V. and Novotný, M. (2017) Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber Panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, **95**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/6/062004>.
- 64 van der Westhuyzen, S., Walls, R. and de Koker, N. (2020) Fire Tests of South African Cross-Laminated Timber Wall Panels: Fire Ratings, Charring Rates, and Delamination. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, South African Institute of Civil Engineers, **62**, 33–41. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2020/v62n1a4>.
- 65 Yasir, M., Macilwraith, A., O'Ceallaigh, C. and Ruane, K. (2023) Effect of Protective Cladding on the Fire Performance of Vertically Loaded Cross-Laminated Timber (CLT) Wall Panels. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/24705314.2023.2189683>.
- 66 Eurocode 5: Design of Timber Structures | Eurocodes: Building the Future. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>.
- 67 Gravit, M. V., Nedryshkin, O. V. and Ogidan, O.T. (2018) Transformable Fire Barriers in Buildings and Structures. *Magazine of Civil Engineering*, St-Petersburg State Polytechnical University, **77**, 38–46. <https://doi.org/10.18720/MCE.77.4>.
- 68 Gravit, M., Shabunina, D. and Nedryshkin, O. (2023) The Fire Resistance of Transformable Barriers: Influence of the Large-Scale Factor. *Fire 2023, Vol. 6, Page 294*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 294. <https://doi.org/10.3390/FIRE6080294>.
- 69 Araujo, P., Teixeira, J.C., Silveira, D., Silva, E., Soares, D., Fangueiro, R. and Vilarinho, M.C. (2020) Development of Fiber Structures for High Performance Heat Resistant Curtains. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, **3**. <https://doi.org/10.1115/IMECE2020-24016>.
- 70 Li, A., Gao, R., Yang, Z., Cong, B., Shi, C. and Che, L. (2016) Chinese Patent Technology: A Novel Opposite Double-Jet Air Curtain Fire Smoke-Free System (DJACS). *Recent Patents on Engineering*, **10**. <https://doi.org/10.2174/1872212110666160815115618>.
- 71 Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Thamboo, J., Roy, K., Rossi, B., Molken, T., Perera, D. and Navaratnam, S. (2021) On the Fire Behaviour of Modular Floors Designed with Optimised Cold-Formed Steel Joists. *Structures*, Elsevier, **30**, 1071–1085. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.01.055>.
- 72 Lawson, R.M. and Way, A.G.J. (2012) Fire Safety of Light Steel Construction, Technical Information Sheet ED016, The Steel Construction Institute. <https://steel-sci.com/assets/downloads/LSF/ED016%20Download.pdf>.
- 73 Ye, J., Hajirasouliha, I., Becque, J. and Pilakoutas, K. (2016) Development of More Efficient Cold-Formed Steel Channel Sections in Bending. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **101**, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2015.12.021>.
- 74 Perampalam, G., Poologanathan, K., Gunalan, S., Ye, J. and Nagaratnam, B. (2019) Optimum Design of Cold-Formed Steel Beams: Particle Swarm Optimisation and Numerical Analysis. *ce/papers*, John Wiley & Sons, Ltd, **3**, 205–210. <https://doi.org/10.1002/CEPA.1159>.
- 75 Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Nagaratnam, B., Tsavdaridis, K.D. and Ye, J. (2020) Structural Behaviour of Optimized Cold-Formed Steel Beams. *Steel Construction*, John Wiley & Sons, Ltd, **13**, 294–304. <https://doi.org/10.1002/STCO.201900024>.
- 76 Li, S. and Richard Liew, J.Y. (2022) Experimental and Data-Driven Analysis on Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete and Mortar at Elevated Temperature.



- Construction and Building Materials*, Elsevier, **341**, 127845.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127845>.
- 77 Venkateshwaran, A. and Tan, K.H. (2020) Moment Redistribution in Continuous Steel-Fibre-Reinforced Concrete Slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, ICE Publishing, **173**, 161–174.
<https://doi.org/10.1680/JSTBU.17.00152/ASSET/IMAGES/SMALL/JSTBU.17.00152-F10.GIF>.
- 78 Venkateshwaran, A. and Tan, K.H. (2018) Load-Carrying Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams at Large Deflections. *Structural Concrete*, John Wiley & Sons, Ltd, **19**, 670–683.
<https://doi.org/10.1002/SUCO.201700129>.
- 79 Gondokusumo, G.S., Venkateshwaran, A., Tan, K.H. and Liew, J.Y.R. (2021) Unified Equations to Predict Residual Flexural Tensile Strength of Lightweight Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Structural Concrete*, John Wiley & Sons, Ltd, **22**, 2202–2222.
<https://doi.org/10.1002/SUCO.202100172>.
- 80 Li, S., Gondokusumo, G.S., Venkateshwaran, A. and Liew, J.Y.R. (2023) Structural Behaviour of Steel Fibre-Reinforced Concrete Floor System for Modular Construction. *Engineering Structures*, Elsevier, **291**, 116437. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116437>.
- 81 Modular Glazing (Element Facade) from the Alpica Construction Company.
https://www.alpicagroup.ru/osteklenie_fasadov/modulnoe_osteklenie.html.
- 82 Fiorini, C.V., Merli, F., Belloni, E., Anderson, A.M., Carroll, M.K. and Buratti, C. (2023) Glazing Systems with Thin Monolithic Aerogel: Optical, Thermal, and Color Rendering Performance. *Energy and Buildings*, Elsevier, **288**, 113009. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113009>.
- 83 Takeshita, S., Akasaka, S. and Yoda, S. (2019) Structural and Acoustic Properties of Transparent Chitosan Aerogel. *Materials Letters*, Elsevier B.V., **254**, 258–261.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.064>.
- 84 Zhao, L., Strobach, E., Bhatia, B., Yang, S., Leroy, A., Zhang, L. and Wang, E.N. (2019) Theoretical and Experimental Investigation of Haze in Transparent Aerogels. *Optics express*, The Optical Society, **27**, A39. <https://doi.org/10.1364/oe.27.000a39>.
- 85 Wang, J., Petit, D. and Ren, S. (2020) Transparent Thermal Insulation Silica Aerogels. *Nanoscale Advances*, RSC, **2**, 5504–5515. <https://doi.org/10.1039/D0NA00655F>.
- 86 Kim, S., Cha, J., Kim, S., Park, K.W., Lee, D.R. and Jo, J.H. (2014) Improvement of Window Thermal Performance Using Aerogel Insulation Film for Building Energy Saving. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Kluwer Academic Publishers, **116**, 219–224.
<https://doi.org/10.1007/S10973-013-3521-5/METRICAL>.
- 87 Schultz, J.M., Jensen, K.I. and Kristiansen, F.H. (2005) Super Insulating Aerogel Glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, North-Holland, **89**, 275–285.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2005.01.016>.
- 88 Cotana, F., Pisello, A.L., Moretti, E. and Buratti, C. (2014) Multipurpose Characterization of Glazing Systems with Silica Aerogel: In-Field Experimental Analysis of Thermal-Energy, Lighting and Acoustic Performance. *Building and Environment*, Pergamon, **81**, 92–102.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.06.014>.
- 89 Kopylov A.B., Liubin N.S. and Gerasimova V.O. (2019) The Use of Aerogel Glazing Facades of Buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, **2**. <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-aerogelya-pri-osteklenii-fasadov-zdaniy>.
- 90 Supertynn Isolasjon Slipper Lyset Inn | Huseierne. <https://www.huseierne.no/husboligt/tema/oppussing/supertynn-isolasjon-slipper--lyset-inn/>.
- 91 Gao, T., Jelle, B.P. and Gustavsen, A. (2016) Building Integration of Aerogel Glazings. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **145**, 723–728. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.04.090>.
- 92 Smirnova, E. (2023) Prozrachnye Kirpichi Iz Aerogelya Prevoskhodyat Obychnye Po Prochnosti i Teploprovodnosti. Hajtek+. <https://m.hightech.plus/2023/04/23/medicinskii-radar-att-monitorit-sostoyanie-zdorovya-cherez-steni>.