



Review Article

Received: October 01, 2022

Accepted: October 05, 2022

Published: October 17, 2022

ISSN 2658-5553

Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation. A review

Kotlyarskaya, Irina Leonidovna^{1*} Iakovlev, Nikita Artemovich¹ Vatin, Nikolai Ivanovich¹ Nemova, Darya Viktorovna¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; iravassilek@mail.ru (K.I.L.); nik_yakovlev@list.ru (I.N.A.); vatin@mail.ru (V.N.I.); darya0690@mail.ru (N.D.V.)

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

Keywords:

Module; Modular building; Modular facade; Aerogel insulation; Energy efficiency; Enclosing structures

Abstract:

The course to modular construction is becoming more and more popular. New developments in this field are constantly appearing. The object of the study are modular energy-efficient building enclosure structures with the aerogel-based thermal insulation materials. The analysis of available developments and technological solutions in the field of modular facade systems. The features of aerogel and composite materials on its basis were considered. Due to numerous studies and developments, these materials are becoming more accessible and applicable in different areas, including the construction industry. As a result of the analysis, it was found that the construction of modular structures is perspective. Modular building envelopes in combination with aerogel-based thermal insulation materials help to reduce the energy consumption of buildings and structures, as well as help to reduce carbon dioxide emissions.

1 Introduction

Развитие строительства массового доступного жилья становится приоритетным направлением в политике государств по всему миру [1]–[6]. В статье [7] говорится, что города растут непропорционально темпу экономического развития и что для крупных городов с населением больше 10 миллионов человек комфортабельные жилищные условия доступны не для всех категорий граждан. Имеется спрос на дешевое, комфортное и быстровозводимое жилье [8], [9]. Ускорить строительный, монтажный процесс можно с применением современных методов промышленного строительства, которые основаны на стандартизации, объединении и типификации [10]–[12].

Усилия специалистов также направлены на то, чтобы жилье требовало как можно меньше расходов не только во время строительства, но и во время самого длительного этапа в жизненном цикле объекта – эксплуатации здания, требующего постоянного поступления энергии, расходующегося на отопление, вентиляцию, горячую воду, освещение помещений и работу различного оборудования. Дефицит основных энергоресурсов, растущая цена на их добычу, а также мировые экологические проблемы окружающей среды выдвигают на передний план задачу энергосбережения [13]–[16].

Для обеспечения доступности жилья для граждан, безопасных и комфортных условий проживания в нем нужно комплексное решение проблемы. Применение современных технологий, в том числе и энергосберегающих, эффективных строительных конструкций полной заводской

Kotlyarskaya, I.; Iakovlev, N.; Vatin, N.; Nemova, D.

Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation. A review; 2022; *AlfaBuild*; 24 Article No 2402. doi: 10.57728/ALF.24.2



готовности позволят уменьшить количество издержек на этапе строительства, ускорить монтаж и снизить стоимость квадратного метра.

2 Modular enclosing structures

Под модульными конструкциями или объемно-блочными конструкциями понимают готовые заводские единицы, спроектированные, выполненные «под ключ» и одобренные к транспортировке на строительный объект в виде единого независимого элемента. Применение модульного строительства способно обеспечить население более доступным по цене жильем за счет более быстрого возведения, экономии на транспортной логистике и рабочих единицах [17]–[21]. Курс на модульное строительство становится все более востребованным, ежедневно появляются новые разработки в этой области (см. Таблицу 1).

Table 1. Patent search for modular construction
Таблица 1. Патентный поиск по модульному строительству

Номер патента	Название изобретения	Краткий анализ
RU 194610 U1 [22]	Угол модульной конструкции, применяемой при строительстве зданий и сооружений	Полезная модель относится к области строительства, а именно к соединению элементов каркасов зданий, изготовленных преимущественно из панельно-стоечных конструкций.
RU 2764552 C1 [23]	Устройство ограждающей модульной конструкции гидротехнического сооружения	Используется для строительства морских гидротехнических сооружений, а именно искусственных островов в различных климатических условиях
RU 2766969 C2 [24]	Модульная система для создания конструкции, соединитель модулей и конструкция, содержащая модульную систему	Узел соединения стальных объемных модулей, гарантирующий надежность и прочность конструкции.
RU 2760654 C2 [25]	Способ монтажа модульных ограждающих конструкций высотных зданий	Изобретение относится к области строительства. Техническим результатом является быстрота монтажа ограждающей конструкции высотного здания без использования крана, установки лесов и люлек, изнутри здания.
RU 210408 U1 [26]	Строительный блок для модульных конструкций	Полезная модель относится к области строительства на суше и на воде, применяется для строительства несущих и самонесущих конструкций.
RU 2735793 C1 [27]	Крупноблочный монтажный модуль и способ возведения сооружений из крупноблочных монтажных модулей	Используется в строительстве производственных зданий с повышенными требованиями к несущей способности конструкций.
RU 207608 U1 [28]	Универсальный модульный фундамент арктической ветроэлектрической установки	Полезная модель относится к конструкции фундамента мелкого заложения для ветроэлектрических установок (ВЭУ), сооружаемых для эксплуатации в суровых климатических условиях.



В статье [29] приводится классификация модульного строительства в зависимости от вида элементов: элементное (1D), панельное (2D), объемное (3D). К 2D модульной технологии относится такая разновидность модульных конструкций, как модульный фасад. Среди них можно выделить следующие виды:

1. Железобетонные панели

ЖБ панель – это крупноразмерный плоский элемент строительной конструкции заводского изготовления, состоящий из бетонного каркаса, утеплителя и облицовки [30], [31].

2. Сэндвич-панели

Сэндвич-панели – трехслойная конструкция, состоящая из металлических наружной и внутренней облицовок и средней части (сердечника), соединенных между собой клеевым составом. Сэндвич-панели также изготавливаются на производственных линиях и в основном применяются в быстросборных/быстровозводимых зданиях [32], [33].

3. Каркасно-обшивные стены

Наиболее приближенная система к привычному пониманию стены здания, а именно многослойная несущая конструкция, состоящая из каркаса (как правило из ЛСТК), заполнения полости каркаса материалами для теплоизоляции/звукоизоляции, обшивок стены (наружной и внутренней), наружной облицовки [34]. Пример таких фасадов - модули фасадные навесные самонесущие TOPWALL от Modulbau (г. Домодедово, Российская Федерация) [35], а также фасадные модульные панели от КРС (Knauf prefab construction, дочерняя компания КНАУФ, г. Красногорск, Российская Федерация) [36].

4. Аддитивные панели

Одним из вариантов создания готовых строительных модулей является метод 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 [37]–[40]. С помощью аддитивной технологии можно изготавливать, как отдельные элементы здания, так и здание целиком.

5. Светопрозрачные модульные конструкции

Представляют собой наружную несущую стену, состоящую из каркаса, крепежных элементов, уплотнителей и светопрозрачного и/или непрозрачного заполнения [41]. Они устанавливаются на основе от каркаса здания, в проемах стен и между плитами перекрытия. Производством такого остекления занимается строительная компания Alpica (г. Москва, Российская Федерация) [42].

6. Вентилируемые модульные навесные фасады

Отличаются от типовых вентилируемых фасадов тем, что фасады собираются в заводских условиях и поступают на объект уже полностью готовые к монтажу в виде крупноформатных фасадных модулей с облицовкой, которые монтируются на заранее установленные специальные кронштейны. Созданием вентилируемых модульных блоков занимается ООО «Инжиниринговая компания Генезис» (г. Москва, Российская Федерация). Каркас модуля является несущим элементом фасадной конструкции и воспринимает: собственный вес модуля с фасадной облицовкой, эксплуатационные, ветровые и динамические нагрузки [43]. Согласно отчету [44] модульный навесной вентилируемый фасад (МНВФ) успешно применен на объектах: жилой дом по адресу Москва, ул. Широкая, дом 30; Жилой комплекс ЖК ПРАЙМ ПАРК R4.

3 Aerogel insulation

Аэрогель представляет собой совокупность глобул, размером в несколько нанометров, соединенных между собой разветвленной сетью мезопор, которые заполнены воздухом. Он обычно производится с использованием метода сверхкритической экстракции для замены жидкого компонента геля газом. Размер пор превышает размер самих кластеров в десять и более раз. Таким образом, материал, являясь твердым веществом, на 99% состоит из воздуха (Рис.1) [45]–[47]. Этим обусловлены уникальные свойства этого материала: легкий вес от 1 до 150 кг/м³ (у графенового аэрогеля плотность 0,16 кг/м³), высокая удельная площадь поверхности, коэффициент теплопроводности составляет 0,016 Вт/(м*К) при 10°С .

Также данный материал обладает звукоизоляционными свойствами. Аэрогель с добавлением желатина и пшеничной соломы имеет перспективные характеристики звукопоглощения [48].



Fig. 1 – Aerogel
Рис. 1 – Аэрогель

В течение последних десятилетий XX века аэрогель использовался в основном в космической отрасли. Причиной этого является высокая стоимость сырья, необходимого для его изготовления, а также низкая прочность и жесткость материала [49], [50]. Однако в дальнейшем аэрогель, а также различные его композиты [51]–[55], стали применяться и в других отраслях благодаря его уникальным свойствам (см. Таблицу 2).

Table 2. Patent search for the use of aerogel
Таблица 2. Патентный поиск по применению аэрогеля

Номер патента	Название изобретения	Краткий анализ
RU 2721110 C2 [56]	Способ получения аэрогелей и композиционный материал на основе аэрогеля	Изобретение относится к способу получения аэрогеля и к композиционному материалу из аэрогеля и минеральных волокон, полученному этим способом.
RU 2696638 C1 [57]	Способ получения теплоизоляционного материала на основе аэрогеля	Изобретение может быть использовано для получения теплоизоляционных материалов широкого применения с улучшенными физико-механическими свойствами.
RU 2569112 C2 [58]	Материал на основе аэрогеля, который является суперизолирующим при атмосферном давлении	Изобретение относится к твердым материалам на основе гидрофобного аэрогеля и органического связующего и может быть применено для тепловой изоляции зданий.
RU 2668657 C1 [59]	Улучшенные материалы гидрофобных аэрогелей	Группа изобретений по созданию армированной композиции аэрогеля с повышенной гидрофобностью, поглощением жидкой воды, теплотой горения или температурой начала термического разложения.
RU 2533493 C2 [60]	Теплоизоляционное, антикоррозионное и звукопоглощающее покрытие и способ его получения	Изобретение может быть использовано для получения теплоизоляционных покрытий с антикоррозионными и звукопоглощающими свойствами на различных поверхностях.
RU 187338 U1 [61]	Панель строительная теплоизоляционная	Полезная модель является сэндвич-панелью ограждающих конструкций с повышенными теплоизоляционными свойствами и уменьшенным весом и габаритами.

RU 2731479 C1 [62]	Теплоизоляционный материал на основе аэрогеля	Изобретение может быть использовано для получения теплоизоляционных материалов широкого применения с улучшенными физико-механическими свойствами.
--------------------	---	---

Для удобства монтажа аэрогель применяется на подоснове (карбоновая, керамическая, стекловолокно) в виде матов или рулонного материала. В таком виде он становится более удобным для монтажа, но также это влияет на свойства. Например, коэффициент теплопроводности материала на основе аэрогеля Alison Aerogel Blanket серии DRT06 составляет $\lambda_{25}=0,0220$ Вт/(м*К) [45], [63].

Так как материалы на основе аэрогеля кроме отличных теплоизоляционных характеристик соответствуют пожарным требованиям, а также единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям, их безопасно и рационально можно применять в строительстве.

Аэрогель также применяется как добавка для бетона. Легкий бетон с добавлением аэрогеля и стеклянных фибр имеет сниженную плотность, но при этом повышенную прочность на сжатие [64].

4 Concept modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation

Описанные выше технологии зарекомендовали себя как многообещающие, комбинация этих направлений также может быть перспективной. Интеграция инновационной теплоизоляции в модульную конструкцию позволит выполнить конструкцию, которая будет энергоэффективной и одновременно быстрой в монтаже.

Ряд концепций модульных фасадов с аэрогелевой теплоизоляцией:

1. Аддитивная модульная фасадная панель

Идея данного вида панели основывается на изобретении ученых из швейцарского исследовательского института Empa такой конструкции, как аэрокирпич. Он представляет собой кирпич, у которого полости заполнены пастой на основе аэрогеля. Результаты сравнения толщин аэрокирпича, кирпича с перлитным заполнением и обычной кирпичной кладки с эквивалентным коэффициентом теплопроводности представлено на Рисунке 2 [65], [66].

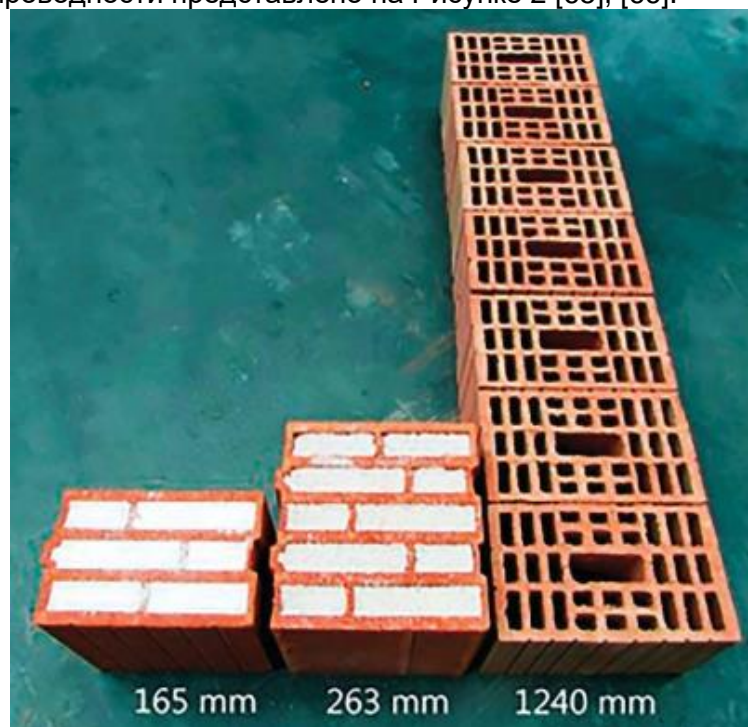


Fig. 2 – Aerogelbrick, brick with perlite filler, ordinary brickwork

Рис. 2 – Аэрокирпич, кирпич с наполнителем из перлита, обычная кирпичная кладка

Аддитивная модульная фасадная панель, как и аэрокирпич, представляет собой конструкцию, у которой есть грани и внутренние ребра, а полости заполнены аэрогелевой теплоизоляцией. Каркас конструкции выполняется 3D принтером из бетона, в том числе с искусственным зольным микрогравием. Пример такой конструкции представлен на Рисунке 3.

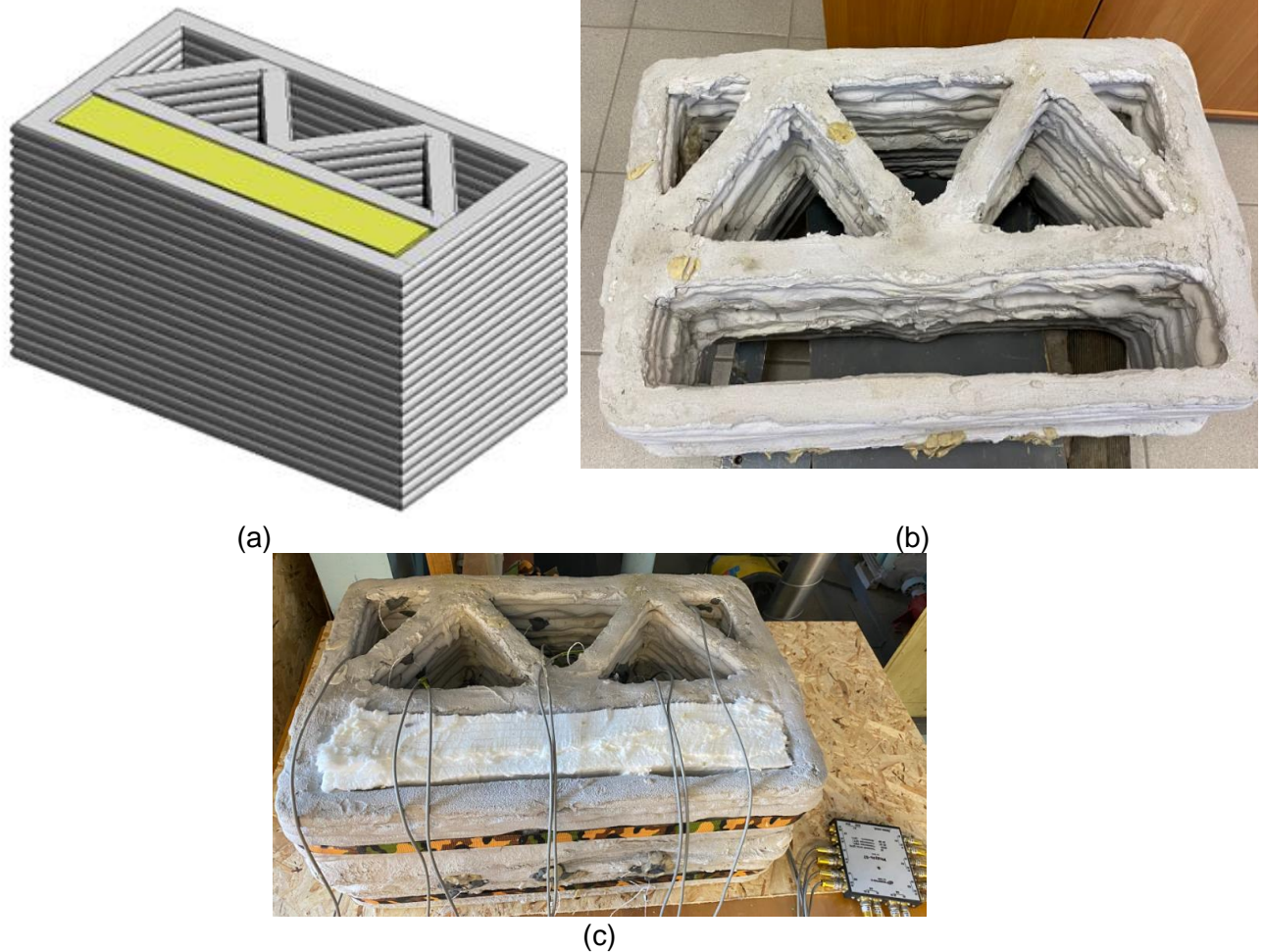


Fig. 3 – (a) Additive panel model (b) Additive panel sample without aerogel (c) Additive panel sample with aerogel filling

Рис. 3 – (a) Модель аддитивной панели (b) Образец аддитивной панели без аэрогеля (c) Образец аддитивной панели с заполнением аэрогелем

Представленный на Рисунке 3с образец аддитивной фасадной панели выполнен из смеси «Гидроизол Финиш».

Используемый в эксперименте рулонный теплоизоляционный материал на основе аэрогеля Alison Aerogel Blanket серии DRT06-Z, имеет следующие заявленные технические характеристики [45], [63]:

- Широкий температурный диапазон применения от -170°C до 1000°C ;
- Теплопроводность материала варьируется от температуры, средний показатель - $0,020 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, этот показатель мы подтвердили путем физического эксперимента в ранее представленном пункте;
- Гидрофобный материал;
- Класс пожарной опасности материала КМО (группа горючести НГ);
- Экологически безопасный материал (наличие санитарно-эпидемиологического заключения);
- Толщина 10 мм.

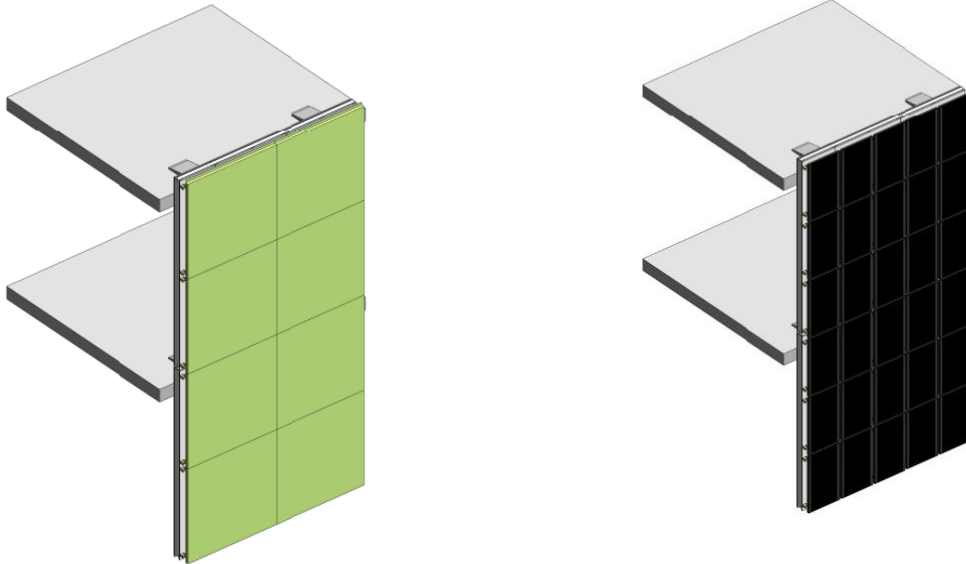
Материал на основе аэрогеля заполнил пространство между двумя параллельными плоскостями в конструкции стеновой панели. Данная часть примыкает к внутреннему пространству помещения. Фасад здания может состоять из таких стеновых панелей, соединенных между собой, либо это может быть единая панель во всю площадь стены.

2. Модульный вентилируемый фасад с аэрогелем.

На основе модульного вентилируемого фасада создана концепция фасада с применением аэрогеля в качестве утеплителя. Пирог такой конструкции состоит из следующих компонентов: внутренняя облицовка - гипсокартон KNAUF 12,5 мм; каркас из легких стальных тонкостенных конструкций ЛСТК (Термопрофиль: Направляющий П-образный 104, Стойки С-образные 100) + Аэрогель 85 мм; KNAUF Аквапанель 12,5 мм; крепежная система U-кон (салазки); облицовочный материал.

Концепция фасадов выглядит следующим образом (Рисунок 4):

Общий вид



Вид сверху



Fig. 4 – The concept of a modular facade with aerogel insulation and cladding of (a) composite panels (b) solar panels

Рис. 4 – Концепция модульного фасада с аэрогелевой теплоизоляцией и облицовкой из (a) композитных панелей (b) солнечных панелей

На сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции влияют теплопроводные включения, которые образуют мостики холода. Учет данного фактора происходит через коэффициент неоднородности γ . Данный параметр возникает в расчетах из-за разности коэффициентов теплопроводности утеплителя и крепежных элементов. Монтаж теплоизоляционного слоя и ветро-влажностной пленки к стенке происходит при помощи тарельчатых дюбелей. Облицовочный материал крепится к стене через подконструкцию (Рисунок 5). Все эти элементы обладают разными коэффициентами теплопроводности, что в итоге сказывается на итоговом значении теплотехнического сопротивления

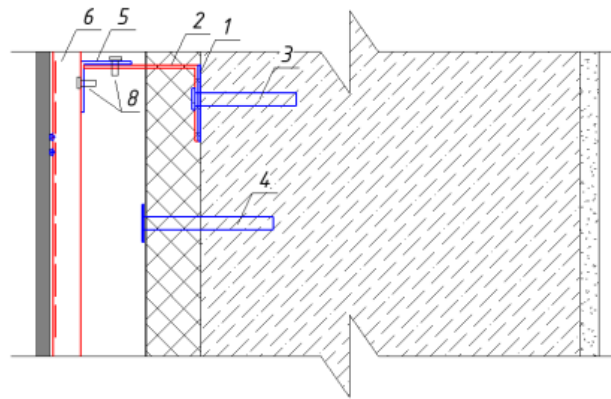


Fig. 5 – Section of the ventilated facade with inclusions: 1 - thermoregulation gasket, 2 – bracket, 3 – anchor dowel, 4 - dowel for thermal insulation with a plastic nail, 5 – horizontal profile, 6 – vertical profile, 7 - exhaust rivet; 8 - self-tapping galvanized screw

Рис. 5 – Разрез вентилируемого фасада с включениями: 1 - терморегуляционная прокладка, 2 – кронштейн, 3 – анкерный дюбель, 4 - дюбель для теплоизоляции с пластиковым гвоздём, 5 – горизонтальный профиль, 6 – вертикальный профиль, 7 - заклепка вытяжная; 8 - самонарезающий оцинкованный винт

Коэффициент однородности γ для ограждающих конструкций разный, он зависит от материалов, из которых изготовлены включения. В [67] приведены диапазоны значений γ для разных конструкций ограждающих стен, для навесных вентилируемых фасадов он составляет 0,65-0,75. Чем этот коэффициент выше, тем конструкция более однородная. В статье [68] рассмотрен вентилируемый фасад с применением аэрогеля и в климатических условиях Ханты-Мансийска. Коэффициент неоднородности $\gamma=0,81$. Таким образом, конструкция с применением аэрогеля является более теплотехнически однородной, что увеличивает сопротивление теплопередаче.

3. Каркасно-обшивные модульные стены

Конструкция фасадно-стенового модуля: легкий бетон 100 мм; пароизоляция; каркас из ЛСТК с утеплением; гидро-ветрозащита диффузионная; Аквапанель 12,5 мм; двойная обрешетка из Омега-профилей 44 мм; облицовка. В качестве утеплителя можно использовать аэрогелевую теплоизоляцию, обладающую более низким коэффициентом теплопроводности.

Используемые в конструкции профили – это металлические элементы, соответственно, для стеновой конструкции они являются мостиками холода, которые следует устранять по возможности. Производитель материалов на основе аэрогеля предлагает использование данного материала для этой цели (Рисунок 6) [69], так как они выпускаются толщиной от 2 мм.

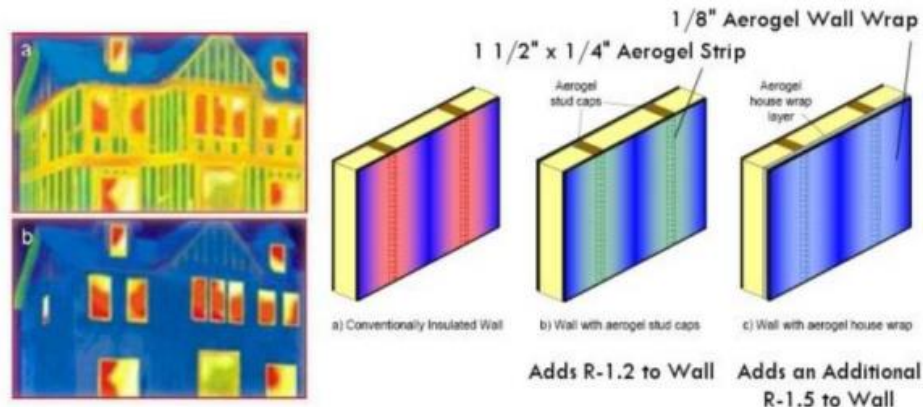


Fig. 6 – The use of aerogel-based materials to eliminate cold bridges

Рис. 6 – Применение материалов на основе аэрогеля для устранения мостиков холода

В статье [68] указывается, что при покрытии стоек тонким слоем аэрогелевой теплоизоляции, тепловой поток, который выходит наружу, гораздо меньше, чем если бы он отсутствовал. Таким образом, сопротивление теплопередаче становится больше в 2,5 раз, чем требуется по нормам.



5 Conclusions

В результате проведенного анализа было выявлено, что строительство из модульных (объемно-блочных) конструкций является перспективным и многообещающим. Один из вариантов модульных конструкций, модульный фасад, может иметь различные вариации по конструктивному содержанию.

В комбинации с теплоизоляционными материалами на основе наноматериала аэрогеля модульные ограждающие конструкции будут способствовать снижению потребления энергии зданиями и сооружениями, а значит, помогут сократить выбросы углекислого газа. Здания с такими конструкциями будут наносить меньший ущерб экологии.

6 Funding

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-19-00324, <https://rscf.ru/project/21-19-00324/>.

References

1. Anacker, K.B. Introduction: housing affordability and affordable housing. *International Journal of Housing Policy*. 2019. 19(1). Pp. 1–16. DOI:10.1080/19491247.2018.1560544.
2. Pennell, G., Newman, S., Tarekegne, B., Boff, D., Fowler, R., Gonzalez, J. A comparison of building system parameters between affordable and market-rate housing in New York City. *Applied Energy*. 2022. 323. Pp. 119557. DOI:10.1016/J.APENERGY.2022.119557.
3. Cao, J.A., Keivani, R. The Limits and Potentials of the Housing Market Enabling Paradigm: An Evaluation of China's Housing Policies from 1998 to 2011. *Housing Studies*. 2014. 29(1). Pp. 44–68. DOI:10.1080/02673037.2013.818619.
4. Hulchanski, J.D. The Concept of Housing Affordability: Six Contemporary Uses of the Housing Expenditure-to-Income Ratio. *Housing Studies*. 1995. 10(4). Pp. 471–491. DOI:10.1080/02673039508720833.
5. Alhajri, M.F. Housing challenges and programs to enhance access to affordable housing in the Kingdom of Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. 13(6). Pp. 101798. DOI:10.1016/J.ASEJ.2022.101798.
6. Chai, T.J., Tan, C.S., Chow, T.K., Ling, P.C.H., Koh, H.B. A Review on prefab industrialised building system modular construction in malaysia: The perspective of non-structural studies. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. 19. Pp. 11–21. DOI:10.1007/978-981-13-2511-3_2.
7. Lukyanenko, L.A., Artemeva, Y.V., SHajbakova, N.I. Modular construction as a modern direction of affordable housing construction. *Fotinskie chteniya*. 2018. 1(9). Pp. 218–225.
8. Vatin, N.I., Sinelnikov, A.S., Cisse, M., Vasileva, I.L. Base's structure of Prefabricated Sanitary Module: erection and life stages. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. 98(5). Pp. 9803–9803. DOI:10.4123/CUBS.98.3. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/en/article/2021.99.3/>.
9. Khubaev, A.O., Saakyan, S.S., Makaev, N. V. World practice in the field of modular construction. *Construction and Geotechnics*. 2020. 11(2). Pp. 99–108. DOI:10.15593/2224-9826/2020.2.09. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/903> (date of application: 15.03.2022).
10. Ye, Z., Giriunas, K., Sezen, H., Wu, G., Feng, D.C. State-of-the-art review and investigation of structural stability in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering*. 2021. 33. Pp. 101844. DOI:10.1016/J.JOBE.2020.101844.
11. Thai, H.T., Ngo, T., Uy, B. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020. 28. Pp. 1265–1290. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070.
12. Srisangeerthan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E., Fernando, S. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering*. 2020. 28. Pp. 101087. DOI:10.1016/j.job.2019.101087. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710218315651>.
13. Cheng, Z., Yu, X., Zhang, Y. Is the construction of new energy demonstration cities conducive to improvements in energy efficiency? *Energy*. 2023. 263. Pp. 125517.



DOI:10.1016/J.ENERGY.2022.125517.

14. Gan, X., Pei, J., Pavesi, G., Yuan, S., Wang, W. Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. *Energy Reports*. 2022. 8. Pp. 11592–11606. DOI:10.1016/J.EGYR.2022.09.016.
15. Koutsandreas, D., Kleanthis, N., Flamos, A., Karakosta, C., Doukas, H. Risks and mitigation strategies in energy efficiency financing: A systematic literature review. *Energy Reports*. 2022. 8. Pp. 1789–1802. DOI:10.1016/J.EGYR.2022.01.006.
16. Matos, A.M., Delgado, J.M.P.Q., Guimarães, A.S. Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate: An Overview. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2572. 2022. 15(7). Pp. 2572. DOI:10.3390/EN15072572.
17. Kotlyarskaya (Vasileva), I.L., Sinelnikov, A.S., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I., Gravit, M.V. Structural and technological features of modular multi-storey buildings. A review. *AlfaBuild*. 2022. 23(3). Pp. 2304–2304. DOI:10.57728/ALF.23.4. URL: <https://alfabuild.spbstu.ru/article/2022.23.4> (date of application: 25.08.2022).
18. Tavares, V., Gregory, J., Kirchain, R., Freire, F. What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets? *Building and Environment*. 2021. 206. Pp. 108382. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2021.108382.
19. Hussein, M., Zayed, T. Critical factors for successful implementation of just-in-time concept in modular integrated construction: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2021. 284. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2020.124716. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85095790469&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&st1=10.1016%2Fj.jclepro.2020.124716&sid=744fa423a144815e9837be8af7431831&so t=b&sdt=b&sl=34&s=DOI%2810.1016%2Fj.jclepro.2020.124716%29&relpos=0&citeCnt=8&se> (date of application: 8.02.2022).
20. Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D., Xing, Y. Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase: A comparative study. *Sustainability (Switzerland)*. 2019. 11(20). DOI:10.3390/SU11205658.
21. Abdelmageed, S., Zayed, T. A study of literature in modular integrated construction - Critical review and future directions. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 277. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124044. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090596535&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.124044&partnerID=40&md5=91893c1ac16bb66045ba9f29081aa4f1> (date of application: 13.02.2022).
22. Kazarinov, A. Corner of The Modular Structure Used in The Construction of Buildings and Structures. Patent Russia RU 194610 U1. 2019.
23. Mordvintsev, K., Diashev, A., Gogin, A. Device of The Enclosing Modular Structure of The Hydraulic Structure. Patent Russia RU 2764552 C1. 2022.
24. Binder, J. Modular System for Creating Structure, Module Connector And Structure Comprising Modular System. Patent Russia RU 2766969 C2. 2022.
25. Kotkov, R., Moroz, A., Molodin, V. Method For Installation of Modular, Enclosing Structures of High-Rise Buildings. Patent Russia RU 2760654 C2. 2021.
26. Belousov, G., Lukina, G. Building Block for Modular Structures. Patent Russia RU 210408 U1. 2022.
27. Anpilov, S. Large-Block Mounting Module and Method of Erection of Structures from Large-Block Mounting Modules. Patent Russia RU 2735793 C1. 2020.
28. Elistratov, V., Panfilov, A., Petrov, S. Universal Modular Foundation for Arctic Wind Power Plant. Patent Russia RU 207608 U1. 2021.
29. Dan-Adrian, C., Tsavdaridis, K.D. A comprehensive review and classification of inter-module connections for hot-rolled steel modular building systems. *Journal of Building Engineering*. 2022. 50. DOI:10.1016/J.JOBE.2022.104006.
30. Kraft, R., Kahnt, A., Grauer, O., Thieme, M., Wolz, D.S., Schlüter, D., Tietze, M., Curbach, M., Holschemacher, K., Jäger, H., Böhm, R. Advanced Carbon Reinforced Concrete Technologies for Façade Elements of Nearly Zero-Energy Buildings. *Materials*. 2022. 15(4). DOI:10.3390/MA15041619.
31. Huang, J.Q., Jiang, Q., Chong, X., Zhao, C.L., Wang, Z.Y. Structural performance and section optimization of precast concrete sandwich panels with pin-type GFRP connectors. *Advances in Structural Engineering*. 2021. 24(11). Pp. 2351–2363. DOI:10.1177/1369433221999769.
32. Zhang, C., Liang, L., Yan, | Leilei, Sun, | Xiaobo, Zheng, X., Yan, L. Environmentally friendly bio-

Kotlyarskaya, I.; Iakovlev, N.; Vatin, N.; Nemova, D.

Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation. A review; 2022; *AlfaBuild*; 24 Article No 2402. doi: 10.57728/ALF.24.2



- inspired folded sandwich panels—Fabrication and mechanical behavior. *Polymer Composites*. 2022. DOI:10.1002/PC.26770.
33. Barbirato, G.H.A., Junior, W.E.L., Martins, R.H., Miyamoto, B., Ho, T.X., Sinha, A., Fiorelli, J. Sandwich OSB Trapezoidal Core Panel with Balsa Wood Waste. *Waste and Biomass Valorization* 2021 13:4. 2022. 13(4). Pp. 2183–2194. DOI:10.1007/S12649-021-01660-2.
 34. Wang, W., Ma, J., Al-Azzani, H., Xing, Y. Experimental Study on Seismic Performance of Steel Frame Sheathing with Concrete and Plasterboard Composite Wall. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2022. 22(3). DOI:10.1142/S0219455422400077.
 35. Facade wall module TOPWALL (prefab technology), buy modular facade systems. .
 36. KNAUF - Prefab – constructions catalog. .
 37. Tavernier, I., Cambier, C., Galle, W., De Temmerman, N. A Conceptual Framework for Interpretations of Modularity in Architectural Projects. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2032021. Pp. 127–137.
 38. Production of ready-made plumbing modules (plumbing cabins) for developers.
 39. Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A., Mendis, P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. *Engineering Structures*. 2019. 183. Pp. 883–893. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.061. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029618334175>.
 40. Na, S., Kim, S., Moon, S. Additive manufacturing (3D Printing)-applied construction: Smart node system for an irregular building façade. *Journal of Building Engineering*. 2022. 56. Pp. 104743. DOI:10.1016/J.JOBE.2022.104743.
 41. Abramyan, S.G., Polyakov, V.G., Grunin, A. V. Development of new tool joint for modular systems made of cellular polycarbonate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 687(4). DOI:10.1088/1757-899X/687/4/044014.
 42. Modular glazing (element facade) from the Alpica construction company. .
 43. Андреева, Т.А., Козикова, И.Н. Система G-TECH в строительстве высотных зданий. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ. 2019. Pp. 248–250.
 44. Индустриализация фасадных решений Модульная навесная фасадная система GENESIS. .
 45. Kotlyarskaya (Vasileva), I.L., Vatin, N.I., Nemova, D.V. Thermal conductivity of aerogel thermal insulation under stationary thermal conditions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. 104(5). Pp. 10303–10303. DOI:10.4123/CUBS.103.3.
 46. Vasileva, I.L., Nemova, D.V. Prospects of using aerogels in construction. *AlfaBuild*. 2018. 6(4). Pp. 135–145. DOI:10.34910/ALF.6.12.
 47. Fedotov, V.V., Semenov, K.V., Dobrogorskaya, L.V., Videnkov, N.V., Makeeva, A.V. Aerogel-based innovative materials in civil engineering. *AlfaBuild*. 2017. 1(1). Pp. 89–98. DOI:10.34910/ALF.1.7.
 48. Wang, Y., Zhu, H., Tu, W., Su, Y., Jiang, F., Riffat, S. Sound absorption, structure and mechanical behavior of konjac glucomannan-based aerogels with addition of gelatin and wheat straw. *Construction and Building Materials*. 2022. 352. Pp. 129052. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129052.
 49. Ahmad, H., Anguilano, L., Fan, M. Microstructural architecture and mechanical properties of empowered cellulose-based aerogel composites via TEMPO-free oxidation. *Carbohydrate Polymers*. 2022. 298. Pp. 120117. DOI:10.1016/J.CARBPOL.2022.120117.
 50. Xie, J., Niu, L., Qiao, Y., Chen, P., Rittel, D. Impact energy absorption behavior of graphene aerogels prepared by different drying methods. *Materials and Design*. 2022. 221. DOI:10.1016/J.MATDES.2022.110912.
 51. Bashir, A.W., Leite, B.C.C. Performance of aerogel as a thermal insulation material towards a sustainable design of residential buildings for tropical climates in Nigeria. *Energy and Built Environment*. 2022. 3(3). Pp. 291–315. DOI:10.1016/J.ENBENV.2021.02.003.
 52. Zhang, R., Ye, C., Wang, B. Novel Al₂O₃–SiO₂ aerogel/porous zirconia composite with ultra-low thermal conductivity. *Journal of Porous Materials*. 2018. 25(1). Pp. 171–178. DOI:10.1007/S10934-017-0430-1.
 53. Wei, J., Zhu, P., Sun, H. Ambient-Dried Silica Aerogel Powders Derived from Coal Gangue by Using One-Pot Method. *Materials*. 2022. 15(4). DOI:10.3390/MA15041454.
 54. Huang, L.J., Lee, W.J., Chen, Y.C. Bio-Based Hydrogel and Aerogel Composites Prepared by Combining Cellulose Solutions and Waterborne Polyurethane. *Polymers*. 2022. 14(1). DOI:10.3390/POLYM14010204.

Kotlyarskaya, I.; Iakovlev, N.; Vatin, N.; Nemova, D.

Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation. A review; 2022; *AlfaBuild*; 24 Article No 2402. doi: 10.57728/ALF.24.2



55. Koh, C.H., Schollbach, K., Gauvin, F., Brouwers, H.J.H. Aerogel composite for cavity wall rehabilitation in the Netherlands: Material characterization and thermal comfort assessment. *Building and Environment*. 2022. 224. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2022.109535.
56. Huber, L., Kim-Miushkovich, I. Method for making airgels and composite material based on airgel. Patent Russia RU 2721110 C2. 2015.
57. Lebedev, A., Menshutina, N., Beloglazov, A., Nesterov, D. Method for Making Heat-Insulating Material Based on Airgel. Patent Russia RU 2696638 C1. 2019.
58. Bon'er, A., Ir'e, B., Morel', B., For Eh, Z. Aerogel-Based Material Which is Super-Insulating at Atmospheric Pressure. Patent Russia RU 2569112 C2. 2015.
59. Evans, O., Dekraft, K., Zafiroopoulos, N., Dong, W., Mihalcik, D., Gould, G., Melnikova, I. Improved Materials of Hydrophobic Airgels. Patent Russia RU 2668657 C1. 2018.
60. Beljaev, V. Heat-Insulating, Anticorrosion and Sound-Absorbing Coating and Method of Obtaining Thereof. Patent Russia RU 2533493 C2. 2014.
61. Ogrenich, E. Heat-Insulating Construction Panel. Patent Russia RU 187338 U1. 2019.
62. Menshutina, N., Lebedev, A., Beloglazov, A., Nesterov, D. Heat-Insulating Material Based on Airgel. Patent Russia RU 2731479 C1. 2020.
63. Thermal insulation Alison Blanket DRT06-Z — TIM . .
64. Jiang, T., Wang, Y., Shi, S., Yuan, N., Ma, R., Wu, X., Shi, D., Sun, K., Zhao, Y., Li, W., Yu, J. Compressive behavior of lightweight concrete using aerogel-reinforced expanded polystyrene foams. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. 17. Pp. e01557. DOI:10.1016/J.CSCM.2022.E01557.
65. Okladnikova, E. V, Levchuk, A. V. Using innovative building materials to improve energy efficiency of buildings and structures. *Construction and environmental management: science, education and practice*. 2021. Pp. 61–67.
66. Insulating Bricks With Microscopic Bubbles - Insulated Brick - 2880x2799 Wallpaper - teahub.io. .
67. Dissimilar building envelopes. Calculation of reduced total thermal resistance. .
68. Vasileva, I., Nemova, D., Kotov, E., Andreeva, D., Ali, M. Al. The Use of Aerogel in Building Envelopes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. 70. Pp. 793–802. DOI:10.1007/978-3-030-42351-3_69.
69. Aerogels: all you need to know | Ninithi.com. .