



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 4, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.06

УДК 691.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ ИЗ КРЕМНЕЗЕМА

А.И. Сиянов, Д.И. Абдулманов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 августа 2021

Принята: 11 октября 2021

Опубликована: 28 декабря 2021

Ключевые слова:

аэрогели из кремнезема, теплоизоляция зданий, защитная оболочка, численное моделирование, технология производства.

АННОТАЦИЯ

Аэрогели из кремнезема являются альтернативными теплоизоляционными материалами наружных стеновых конструкций. Они обладают минимальной плотностью и водонепроницаемостью, что в период глобального потепления и в условиях жаркого климата позволяет получить требуемую защитную оболочку здания. Научные технологии способствуют значительному улучшению качества изоляции за счет использования аэрогелевых конструкций. Перспективным направлением в области исследований является улучшение технических характеристик применяемой изоляции и снижение затрат на процесс ее изготовления. Цель работы состояла в проведении эксперимента на модели помещения и оценке возможностей использования аэрогелей из кремнезема в качестве легкого теплоизоляционного материала. В рамках исследований поставленные задачи решены путем численного компьютерного моделирования. Этапы получения аэрогелей с заданными параметрами сведены в четкую технологическую последовательность, позволяющую обосновать их физические и тепловые свойства. На основании опыта проведения исследований проанализированы показатели применения аэрогелей в строительстве, проведен эксперимент на модели помещения с аэрогелевой изоляцией и определено излучение от взаимно расположенных поверхностей. По итогам работы получено предсказуемое и закономерное снижение температуры во времени. Аэрогелевые листы оказались рациональными материалами для стен и других элементов зданий, поскольку, наряду с низкой плотностью, обладают высокой теплоизоляционной способностью. Практическая польза от исследований заключается в том, что полученные зависимости позволяют рекомендовать применение аэрогелевой изоляции не только для несущих и ограждающих конструкций, но и для отдельных элементов зданий и могут быть использованы для разработки методологии повышения тепловой защиты.

© ПНИПУ

© Сиянов Александр Ильич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.

Абдулманов Денис Ильясович – магистрант, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.

Alexander I. Siyanov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.

Denis I. Abdulmanov – student, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.

RESEARCH ON THE USE OF SILICA AEROGELS

A.I. Siyanov, D.I. Abdulmanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 August 2021
Accepted: 11 October 2021
Published: 28 December 2021

Keywords:

silica aerogels, thermal insulation of buildings, protective shell, numerical modeling, production technology.

ABSTRACT

Silica aerogels are alternative thermal insulation materials for external wall structures. They have a minimum density and water resistance, which in a period of global warming and in a hot climate allows you to get the necessary protective shell of the building. High technologies contribute to a significant improvement in the quality of insulation through the use of aerogel structures. A promising direction in the field of research is to improve the technical characteristics of the insulation used and reduce the costs of its manufacturing process. The aim of the work was to conduct an experiment on a room model and evaluate the possibilities of using silica aerogels as a light thermal insulation material. Within the framework of the study, the tasks were solved using numerical computer modeling. The stages of obtaining aerogels with the specified parameters are reduced into a clear technological sequence, which allows us to justify their physical and thermal properties. Based on the experience of conducting research, the indicators of the use of aerogels in construction are analyzed. An experiment was conducted on a model of a room with aerogel insulation and the radiation from mutually located surfaces was determined. According to the results of the work, a predictable and regular decrease in temperature was obtained over time. Aerogel sheets turned out to be rational materials for walls and other elements of buildings, because along with low density, they have a high thermal insulation ability. The practical benefit of the study lies in the fact that the obtained dependencies allow us to recommend the use of aerogel insulation not only for load-bearing and enclosing structures, but also for individual elements of buildings and can be used to develop methods to increase thermal protection.

© PNRPU

Введение

Потребление энергии в строительстве занимает большую часть от общего энергопотребления в мире. Проблема обеспечения энергоэффективности зданий на сегодня остается все еще не решенной. Постепенно разрабатываются принципы, обеспечивающие надежную теплоизоляцию зданий. Получить необходимое тепловое сопротивление позволяют новые технологии и изоляционные материалы. Увеличение толщины ограждающей конструкции нецелесообразно, так как требует дополнительных транспортных затрат и вызывает архитектурный дисбаланс. Модернизировать изоляцию зданий намного выгоднее в условиях увеличения выбросов парниковых газов в атмосферу. В настоящее время назрела острая необходимость в результативных исследованиях изоляционных материалов. Новые образцы можно получить на основании аэрогелей, которые были изобретены еще в первой половине прошлого столетия. Они могут успешно применяться с вакуумными изоляционными панелями и являются очень перспективными в строительстве. Однако пока еще на мировом рынке их производят только отдельные коммерческие организации. Представители фирм реализуют свою продукцию путем снижения всех видов затрат. В литературных источниках можно найти информацию о применении аэрогелей в строительстве. Большое внимание уделяется сравнительной характеристике типов изоляционных материалов с их преимуществами и недостатками.

Материалы и методы

Теплопроводность, как известно, является самым важным свойством любого теплоизоляционного материала. Стремление ее снизить приводит к получению ограждающих конструкций с минимальной толщиной и большим сопротивлением теплопередачи. Здесь решать

проблему необходимо комплексно. Каждая составляющая в виде теплового вклада должна быть минимизирована. Важно не допускать наличие отверстий, которые являются источниками потерь тепла. Обязательно следует учесть тот факт, что теплопроводность твердого элемента обусловлена химическими связями на уровне атомов, а теплопроводность газовой среды реализуется посредством контактов молекул газа. Вместе с тем влияние электромагнитного излучения имеет свой спектральный фон, а конвективная теплопроводность вызвана перемещением воздуха и влаги. На каждый фактор существенное воздействие оказывает температура и ее перепады. Современные теплоизоляционные материалы могут быть применены в виде высушенных гелей, имеющих большую пористость и высокие изоляционные качества. Такие материалы обладают малой плотностью и низким показателем преломления [1; 2]. В зависимости от среды их тепловые свойства могут эволюционировать.

Производство аэрогелей заключается в следующем [3; 4]:

1. Отмеряется необходимое количество тетраметоксисилана и метанола [3], которое помещается в лабораторный стакан с магнитным шариком. Под действием генератора происходит взаимодействие между компонентами с образованием однородной смеси.

2. Добавляется вода, метанол и гидрат аммиака, в результате чего происходит химическая реакция, смесь превращается в гель.

3. Полученная смесь заливается в формы с метанолом и оставляется на определенное время. Метанол испаряется, и происходит быстрый процесс твердения смеси.

4. Сформированный силикагель ежедневно на протяжении семи дней вымачивается в метаноловых ваннах.

5. Гель подвергается процессу сушки с извлечением жидкой составляющей.

В результате образуется сшитая внутренняя структура SiO_2 с большим количеством пор [5] очень малого размера.

Диаметр пор чистого аэрогеля в среднем от 5 до 100 нм, аэрогеля из кремнезема от 5 до 70 нм. На величину пор влияет чистота и способ изготовления [6; 7]. Такие показатели позволяют получить самые легкие твердые материалы с высокими физическими и тепловыми свойствами.

Исследования показали, что плотность аэрогелей составляет от 1 до 150 кг/м^3 . Поэтому они успешно могут применяться в строительстве, где наиболее востребованными являются материалы плотностью от 70 кг/м^3 .

При малой гидрофобизации воздействие воды негативно влияет на структуру аэрогеля [8]. Использование его в сочетании с вакуумом позволит создать оболочку, которая предотвратит попадание воды, а вакуум снизит теплопроводность. Обеспечить требуемую несущую способность совместно с изоляционными свойствами аэрогелей можно путем добавления их в волокнистую структуру [9].

Однако рассматривать возможность применения аэрогелей в качестве теплоизоляционного материала нужно с учетом многих факторов и режимов взаимодействия. Аэрогели из кремнезема обладают малой твердостью. Внутренняя структура является сложной и имеет ряд ограничений, что усложняет путь теплового потока.

Низкая теплопроводность аэрогелей достигается благодаря эффекту Кнудсена, который выражает зависимость проводимости газа в пористой среде от давления воздуха и размеров пор [10].

Поскольку аэрогели из кремнезема характеризуются малыми размерами пор и высокой пористостью, теплопроводность воздуха будет сильно снижаться при давлении окру-

жающей среды из-за эффекта Кнудсена. Усилить такой эффект можно путем заполнения аэрогелей газом с низкой проводимостью.

Сегодня благодаря высоким тепловым характеристикам такие материалы являются инновационной альтернативой традиционной изоляции [11]. Однако необходимо проведение исследований по улучшению характеристик изоляции и снижению затрат на производство аэрогелей.

В настоящее время достаточно эффективен изоляционный материал, разработанный на основе аэрогеля в виде гибкого аэрогелевого листа толщиной 10 мм (рис. 1) [2].

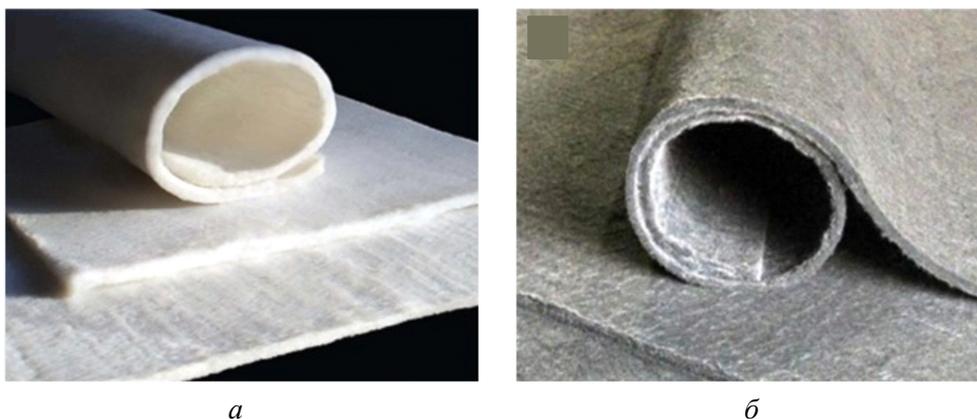


Рис. 1. Аэрогелевое полотно для высокотемпературной теплоизоляции:
a – Pyrogel[®]XT; *б* – Cryogel[®]Z производства компании Aspen Aerogels [12]
Fig. 1. Aerogel fabric for high-temperature thermal insulation: *a* – Pyrogel[®]XT;
б – Cryogel[®]Z manufactured by Aspen Aerogels [12]

Он имеет теплопроводность примерно в три раза ниже, чем у традиционных теплоизоляционных материалов. Особенно интересен процесс его производства. Аэрогелевый композит получают путем добавления волокон или волокнистой матрицы в заранее приготовленную смесь, после чего гель высушивается.

Материал можно использовать для уменьшения тепловых мостиков в ограждающих конструкциях зданий. Данные свидетельствуют [12], что текущие затраты на производство аэрогелей в 10 раз ниже, чем затраты на обычные изоляционные материалы для такого же теплового сопротивления. Материал из аэрогеля безопасен, так как он состоит из аморфного кремнезема [13], что при воздействии снижает возможные риски для здоровья.

Сравнение экспериментально полученных значений минимальной теплопроводности наиболее часто используемых органических аэрогелей приведено в табл. 1.

Величина показателя зависят от химической природы твердой фазы, а также от количества твердого вещества в матрице.

Таблица 1

Теплопроводность органических аэрогелей

Table 1

Thermal conductivity of organic aerogels

Аэрогели	Теплопроводность, Вт/м·К	Размер пор, нм
Резорцинол формальдегид	0,012	10...20
Полиуретан	0,022	8,3...66,5
Целлюлоза	0,030	1...100

Большое значение имеет исследование долговечности аэрогелевых материалов и компонентов для применения в строительстве, в том числе путем проведения ускоренного старения в лабораторных условиях.

Очень эффективно в качестве шаблонов создавать наносферы кремнезема путем применения полиакриловой кислоты или полистирола [14; 15]. Принцип заключается в том, что в дальнейшем шаблоны удаляются путем промывки и нагрева (материалы диффундируют и испаряются через кремнеземную оболочку). Результаты исследований по оценке жизненного цикла этих материалов [16] показаны на рис. 2, 3.

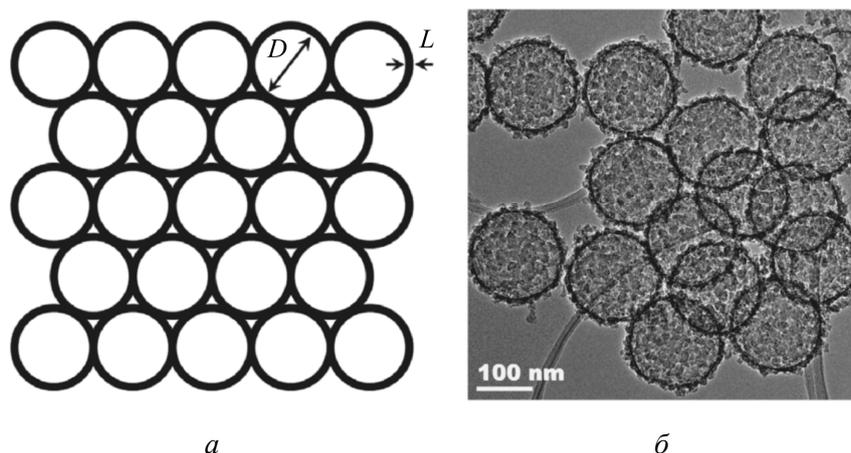


Рис. 2. Схема наноизоляционных материалов:
a – в теории и *б* – реальное изображение наносфер под микроскопом [14]

Fig. 2. The scheme of nano insulating materials:
a – in theory and *б* – the real image of nanospheres under a microscope [14]

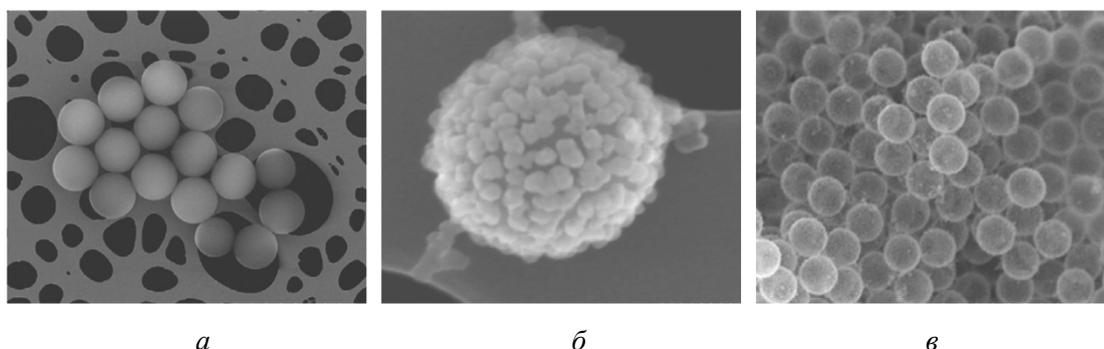


Рис. 3. Схемы: *a* – сферических шаблонов; *б* – частиц кремнезема на шаблоне;
в – наносферы кремнезема [14]

Fig. 3. Schemes: *a* – spherical templates; *б* – silica particles on the template; *в* – silica nanospheres [14]

Для исследования характеристик аэрогеля в качестве изоляционного материала в здании использован вычислительный комплекс ANSYS.

При моделировании рассмотрена модель излучения от поверхности к поверхности. Размер, ориентация и расстояние являются основными факторами для обмена энергией. В помещении здания большая часть поверхностей непрозрачна. Поэтому, в соответствии руководством пользователя [17], выбранная модель является достаточно обоснованной и может быть успешно применена на практике.

Энергия, направленная с одной поверхности на другую, связана с параметром перехода.

Тогда поток энергии со всех поверхностей записывается в виде

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^n A_j q_{out,j} F_{jk} \omega / A_k, \quad (1)$$

где A_j, A_k – площади поверхностей; $q_{out,j}$ – энергия, отраженная от поверхности; F_{jk} – параметр перехода; ω – коэффициент неровности.

Для n поверхностей соотношение факторов будет выглядеть так:

$$A_j A_{jk} = A_k A_{kj}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

Исследования проведены в ANSYS на модели помещения $1,5 \times 1,5 \times 1,5$ м, покрытой аэрогелевым листом (Pyrogel®ХТ или Cryogel®Z) толщиной 10 мм.

Схемы исследуемых элементов в плане показаны на рис. 4.

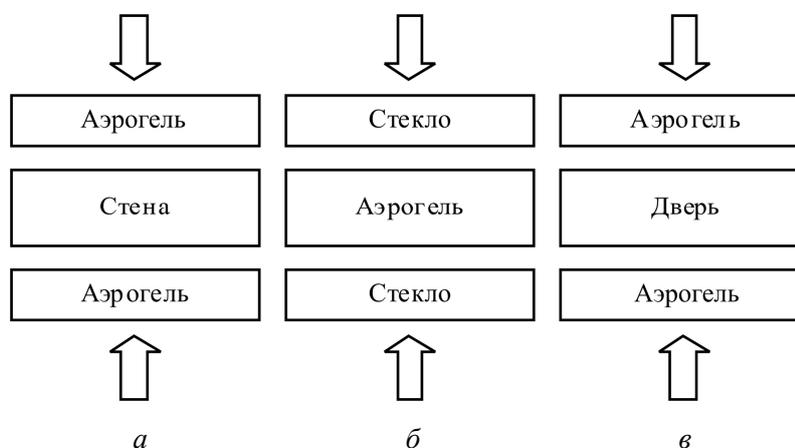


Рис. 4. Структура элементов конструкций: *a* – стены, *б* – окна, *в* – двери

Fig. 4. Structure components: *a* – walls, *б* – windows, *в* – doors

Результаты

Наружная температура конструкции, окруженной теплоизоляцией, составила 291 К (18,3 °С), внутренняя 299 К (26,1 °С), что представляет практический интерес для панельных зданий.

Влияние аэрогелевых листов на изменение температуры стеновых поверхностей толщиной 300 мм во времени показало одну и ту же плавно убывающую закономерность, что подтверждают полученные нисходящие кривые (рис. 5).

Оценка влияния толщины стекла (3 и 4 мм) на характер изменения температуры поверхностей оконного заполнения с аэрогелевым листом также представляет интерес. На рис. 6, 7 показан промежуток времени, в течение которого наблюдалось изменение температуры.

Результаты исследований, представленные на рис. 6, 7, показали разные сопротивления стеклянных поверхностей. Некоторые отличия зафиксированы также по видам аэрогелевых листов. Однако, несмотря на одинаковый характер изменения температуры, выявлен заметный подъем кривых в случае использования стекол с большей толщиной.

Совсем иная ситуация выявлена в области дверного заполнения с аэрогелевыми листами. На рис. 8 показан график изменения температуры во времени.

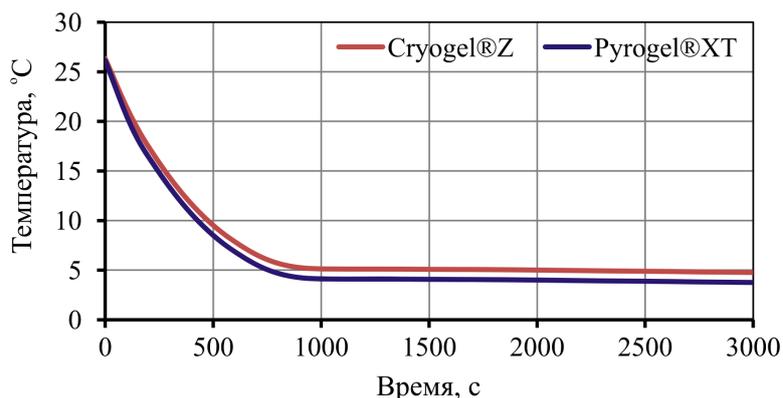


Рис. 5. Динамика изменения температуры стеновых поверхностей исследуемого помещения по результатам компьютерного моделирования
Fig. 5. Dynamics of changes in the temperature of the wall surfaces of the studied room according to the results of computer modeling

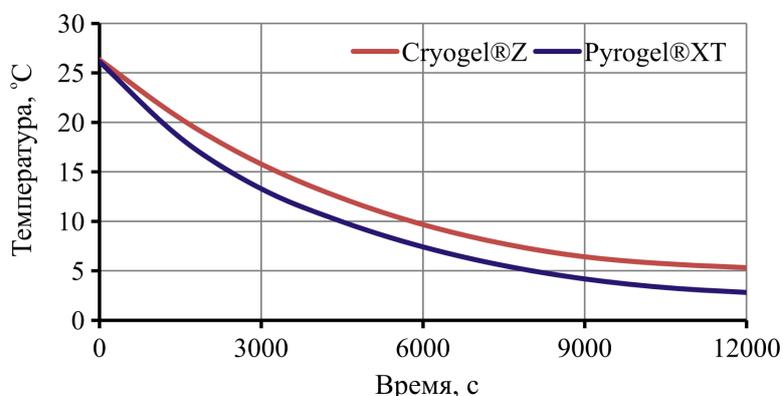


Рис. 6. Динамика изменения температуры поверхностей в окне исследуемого помещения по результатам компьютерного моделирования для случая расположения аэрогелевого листа толщиной 10 мм между стеклами толщиной 3 мм
Fig. 6. Dynamics of surfaces temperature changes in the window of the room under study based on the results of computer modeling for the case of the location of an aerogel sheet with a thickness of 10 mm between glasses with a thickness of 3 mm

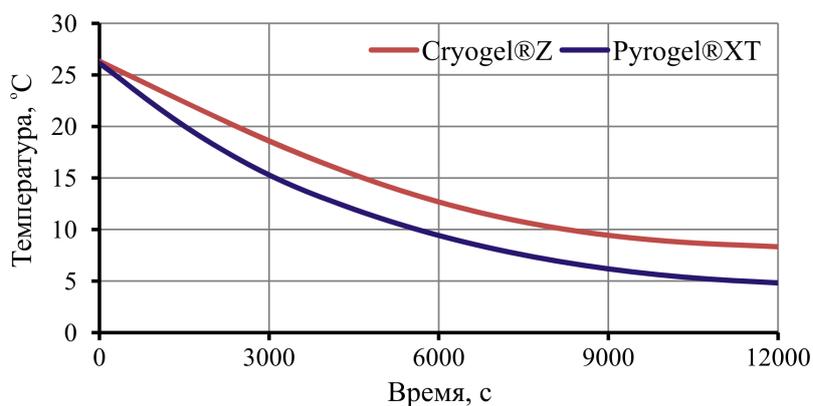


Рис. 7. Динамика изменения температуры поверхностей в окне исследуемого помещения по результатам компьютерного моделирования для случая расположения аэрогелевого листа толщиной 10 мм между стеклами толщиной 4 мм
Fig. 7. Dynamics of surfaces temperature changes in the window of the room under study based on the results of computer modeling for the case of the location of an aerogel sheet with a thickness of 10 mm between glasses with a thickness of 4 mm

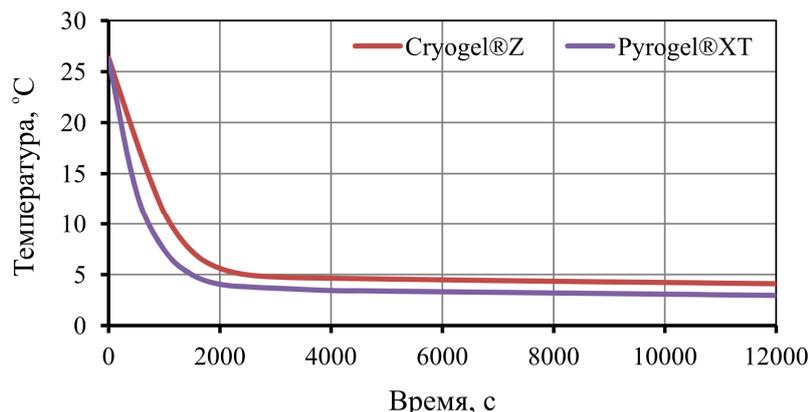


Рис. 8. Динамика изменения температуры поверхностей в двери исследуемого помещения по результатам компьютерного моделирования
Fig. 8. Dynamics of surfaces temperature changes in the door of the room under study based on the results of computer modeling

Полученный результат (рис. 8) имел ту же закономерность, что и в стеновых поверхностях. Отличие состояло лишь в величине и скорости снижения температуры. Несмотря на использование в качестве изоляции аэрогелевых листов, сопротивляемость двери оказалась незначительной. Однако сравнение со стеновыми поверхностями показало некоторое снижение кривых.

В исследованиях учтено, что крыша и пол помещения также изолированы аэрогелевым листом. За определенный интервал времени выявлено уменьшение уровня температуры в соответствии с рис. 5.

Обсуждение

Проведенные исследования показали возможности применения аэрогелевых листов в качестве альтернативного изоляционного материала на поверхностях несущих и ограждающих конструкций. Практическая польза от исследований очевидна, поскольку полученные результаты позволяют рекомендовать применение аэрогелевой изоляции для всех рассмотренных элементов зданий. Особенно следует отметить тот факт, что за короткий промежуток времени достигается значительное снижение температуры на поверхностях.

Из результатов исследований видно, что наиболее быстрый процесс охлаждения поверхностей зафиксирован для стеновых конструкций. Кривые на графиках достигли своих минимальных значений еще до отметки 1000 с. При сравнении с поверхностями оконного и дверного заполнения разница оказалась более чем существенной. На результаты изменения температуры поверхности стекла выявлено влияние толщины и вида аэрогеля.

Как показывают результаты длительных экспериментальных исследований, благодаря использованию аэрогелевой изоляции в офисных помещениях заметно снижается потребление энергии в год примерно на 260 кВт·ч.

Важно также отметить и возможность многократного использования аэрогеля. Он подходит как для холодного, так и для жаркого климата.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки методологии повышения тепловой защиты зданий на основе аэрогелей в рамках минимизации производственных затрат.

Выводы

Выполнено исследование модели помещения с аэрогелевой изоляцией и определены излучения от взаимно расположенных поверхностей. Обмен энергией с одной поверхности на другую произведен с учетом размера, ориентации в пространстве и расстояния между поверхностями. В результате исследования получено закономерное снижение температуры во времени.

Применение аэрогелей в качестве перспективных изоляционных материалов в стенах зданий позволяет получить требуемые параметры по теплоизоляции. Ожидается, что производство аэрогелей с минимальными затратами при решении задач повышения тепловой защиты зданий станет серьезной альтернативой традиционным изделиям, сочетая в себе преимущества прочного сыпучего материала с теплопроводностью, которая примерно в два-три раза ниже, чем у обычной минеральной ваты.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Аэрогель – происхождение, характеристики и области применения: сайт. – URL: <https://stroyday.ru/stroitelstvo-doma/yteplenie-doma/aerogel-proisxozhdenie-xarakteristiki-i-oblasti-primeneniya.html> (дата обращения: 1.10.2021).
2. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) [Электронный документ] // Труды ВИАМ. – 2019. – № 6. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1422 (дата обращения: 01.10.2021).
3. Васильева И.Л., Немова Д.В. Перспективы применения аэрогелей в строительстве // Alfabuild. – 2018. – № 4 (6). – С. 135–145.
4. Михайлов И.М. Аэрогель в гражданском строительстве. Применение и перспективы развития // Международные научно-практические конференции. – М., 2018. – С. 397–404.
5. Общая информация об аэрогеле: сайт. – URL: <http://www.aerogel-russia.ru/info/about> (дата обращения: 01.10.2021).
6. Цыганков П.Ю. Процессы получения аэрогелей с внедрёнными углеродными нанотрубками в аппаратах высокого давления и их интенсификация: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2018. – 191 с.
7. Лебедев А.Е. Моделирование и масштабирование процессов получения аэрогелей и функциональных материалов на их основе: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 156 с.
8. Исследование процесса получения теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей / А.В. Шиндряев [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 6. – С. 130–132.
9. Инновационные материалы на основе аэрогеля в строительстве / А.В. Макеева [и др.] // Alfabuild. – 2017. – № 1 (1). – С. 89–98.
10. Jelle В.Р. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions: properties, requirements and possibilities // Energy Build. – 2011. – Vol. 43, № 10. – P. 2549–2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015

11. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве строительных материалов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2017. – № 1 (12). – С. 68–79.
12. Теплоизоляция с аэрогелями // Компания Aspen Aerogels: сайт. – URL: <https://aerogel.com> (дата обращения: 01.10.2021).
13. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе [Электронный ресурс] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 9. – С. 64–75. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13128> (дата обращения: 01.10.2021).
14. Gao T., Sandberg L.I.C., Jelle B.P. Nano insulation materials: synthesis and life cycle assessment // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 15. – P. 490–495. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.041
15. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres / Y. Liao, X. Wu, H. Liu, Y. Chen // *Thermochimica Acta*. – 2011. – Vol. 526, № 1–2. – P. 178–184. DOI: 10.1016/j.tca.2011.09.011
16. Integration of life cycle assessment in the design of hollow silica nanospheres for thermal insulation applications / R.D. Schlanbusch, B.P. Jelle, L.I.C. Sandberg, S.M. Fufa, T. Gao // *Building and Environment*. – 2014. – Vol. 80. – P. 115–124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.05.010
17. Ansys 2021 R2 Release Highlights / Ansys Latest Release: сайт. – URL: <https://www.ansys.com/products/release-highlights> (дата обращения: 01.10.2021).

References

1. Ajerogel' – proishozhdenie, harakteristiki i oblasti primeneniya [Aerogel-origin, characteristics and applications], available at: <https://stroyday.ru/stroitelstvo-doma/yteplenie-doma/aerogel-proisxozhdenie-xarakteristiki-i-oblasti-primeneniya.html> (accessed 1 October 2021).
2. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Primenenie ajerogelej dlja sozdaniya teploizoljacionnyh materialov (obzor) [The use of aerogels for the creation of thermal insulation materials (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6, available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1422 (accessed 1 October 2021).
3. Vasil'eva I.L., Nemova D.V. Perspektivy primeneniya ajerogelej v stroitel'stve [Prospects for the use of aerogels in construction]. *Alfabuild*, 2018, no. 4 (6), pp. 135–145.
4. Mihajlov I.M. Ajerogel' v grazhdanskom stroitel'stve. Primenenie i perspektivy razvitija [Aerogel in civil engineering. Application and development prospects]. *Mezhdunarodnye nauchno-prakticheskie konferencii*. Moscow, 2018, pp. 397–404.
5. Obshhaja informacija ob Ajerogeje [General information about Aerogel], available at: <http://www.aerogel-russia.ru/info/about> (accessed 1 October 2021).
6. Cygankov P.Ju. Processy poluchenija ajerogelej s vnedrjonnymi uglerodnymi nanotrubkami v apparatah vysokogo davlenija i ih intensivizacija [Processes of obtaining aerogels with embedded carbon nanotubes in high-pressure apparatuses and their intensification]. Ph. D. thesis. Moscow, 2018, 191 p.
7. Lebedev A.E. Modelirovanie i masshtabirovanie processov poluchenija ajerogelej i funkcional'nyh materialov na ih osnove [Modeling and scaling of processes for obtaining aerogels and functional materials based on them]. Ph. D. thesis. Moscow, 2015, 156 p.
8. Shindrjaev A.V. et al. Issledovanie processa poluchenija teploizoljacionnyh materialov na osnove ajerogelej [Investigation of the process of obtaining thermal insulation materials based on aerogels]. *Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 130–132.
9. Makeeva A.V. et al. Innovacionnye materialy na osnove ajerogelja v stroitel'stve [Innovative materials based on aerogel in construction]. *Alfabuild*, 2017, no. 1 (1), pp. 89–98.

10. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions: properties, requirements and possibilities. *Energy Build*, 2011, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>.
11. Falikman V.R. Nanomaterialy i nanotehnologii v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Nanomaterials and nanotechnologies in the production of building materials]. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*, 2017, no. 1 (12), pp. 68–79.
12. Teploizoljacija s ajerogeljami [Thermal insulation with aerogels]. *Kompanija Aspen Aerogels*, available at: <https://aerogel.com> (accessed 1 October 2021).
13. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Sovremennye jeffektivnye teploizoljacionnye materialy na neorganicheskoj osnove [Modern effective thermal insulation materials on an inorganic basis]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2020, no. 9, pp. 64–75, available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13128> (accessed 1 October 2021).
14. Gao T., Sandberg L.I.C., Jelle B.P. Nano insulation materials: synthesis and life cycle assessment. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 15, pp. 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.041>.
15. Liao Y., Wu X., Liu H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 526, no. 1–2, pp. 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.09.011>.
16. Schlanbusch R.D., Jelle B.P., Sandberg L.I.C., Fufa S.M., Gao T. Integration of life cycle assessment in the design of hollow silica nanospheres for thermal insulation applications. *Building and Environment*, 2014, vol. 80, pp. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.010>.
17. Ansys 2021 R2 Release Highlights. *Ansys Latest Release*, available at: <https://www.ansys.com/products/release-highlights> (accessed 1 October 2021).