

УДК 536.2.022

**Н. И. ВАТИН, Ш. Т. СУЛТАНОВ, А. А. КРУПИНА**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТА (PIR), МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ, КАРБОНА  
И АЭРОГЕЛЯ**

**Аннотация.** Характеристики теплоизоляционного материала в основном определяются его теплопроводностью, которая зависит от плотности материала, пористости, содержания влаги и средней разности температур. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности минеральной ваты, пенополиизоциануратной пены, карбона и аэрогеля в стационарном тепловом режиме. Показатели теплоизоляции определяют на плоском образце с помощью прибора ПИТ 2.1. Результаты должны иметь большое значение для производителей материалов, владельцев зданий и дизайнеров при выборе подходящих теплоизоляционных материалов и правильном прогнозировании тепловых и энергетических характеристик зданий и их энергоэффективности.

**Ключевые слова:** теплоизоляционный материал, пенополиизоцианурат, минеральная вата, теплопроводность, аэрогель, карбон, теплопроводность, строительство.

**ВВЕДЕНИЕ**

Строительная отрасль развивается по пути снижения расхода материалов и трудоемкости, сокращения временных и финансовых затрат на строительство зданий [1–4]. Наиболее эффективным способом решения описанных выше проблем является использование высокоэффективных теплоизоляционных материалов в строительстве. Сегодня к энергоэффективным теплоизоляционным материалам относятся утеплители, которые имеют теплопроводность не более 0,06 Вт/(м·°С).

В настоящее время [5–7] в различных отраслях промышленного производства, и в том числе строительной индустрии, ведется поиск высокотехнологичных теплоизолирующих материалов, превышающих по теплоизоляционным свойствам наиболее распространенные утеплители – минеральная вата и экструзионный пенополистирол. В то же время эти материалы должны характеризоваться низкими производственными затратами, обладать водо- и морозостойкостью, механической прочностью, экологичностью и пожаробезопасностью.

Минеральная вата – теплоизоляционный материал, существующий на рынке с 1937 года. Благодаря высоким теплоизоляционным свойствам долгое время не имел конкурентов. Исключительные термические и акустические свойства минеральной ваты обусловлены матом из волокон, который предотвращает движение воздуха, и инертным химическим составом минеральной ваты. Дело в том, что минеральная вата хорошо впитывает влагу, поэтому для уменьшения количества поглощенной влаги и связывания компонентов волокна пропитываются специальными органическими добавками. Эти добавки, как и все органические вещества, являются легковоспламеняющимися. Чем плотнее используется минеральная вата, – тем больше в ней органического вещества. Наиболее горючая минеральная вата используется для теплоизоляции плоских крыш и в качестве основы сэндвич-панелей [8–9] (рис. 1).

PIR плита на основе полиизоцианурата как теплоизолирующий материал с одним из самых низких показателей теплопроводности используется во всем мире. Пенополиуретан (PUR) и пенополиизоцианурат (PIR) (рис. 2) представляют собой два класса родственных полимеров, получаемых по реакции нескольких компонентов. PIR имеет более высокие огнезащитные свойства, чем у традиционной полиуретановой изоляции. Рабочая температура PIR достигает 140 °С, тогда как PUR может

© Н. И. Ватин, Ш. Т. Султанов, А. А. Крупина, 2019



Рисунок 1 – Типы минеральной ваты.

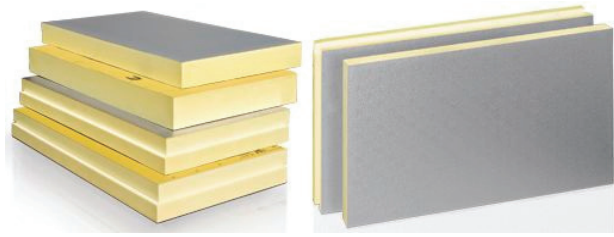


Рисунок 2 – Типы пенополиизоцианурата (PIR).

использоваться только при температуре ниже 100 °С. Как PUR, так и PIR обладают высокими влагонепроницаемыми качествами и практически паронепроницаемы. Опыт строительства за последние десять лет показывает, что используемые сэндвич-панели и теплоизоляционные плиты из ППУ (PUR и PIR) на сегодняшний день являются наиболее эффективными и перспективными с учетом простоты их монтажа и минимизации затрат, также с учетом энергосбережения [10–11].

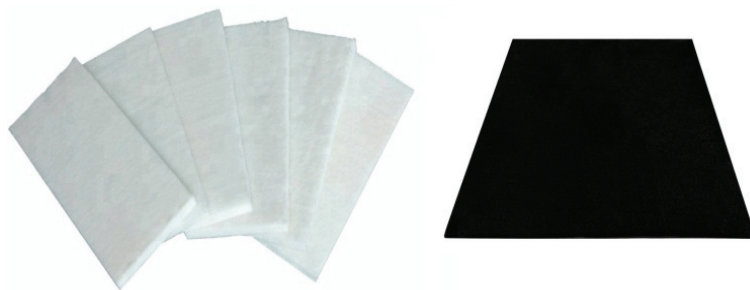


Рисунок 3 – Карбон и аэрогель.

Аэрогель и карбон – материалы, недостаточно хорошо изученные и, предположительно, смогут вытеснить PIR и минеральную вату с лидирующих мест (рис. 3). В работах [13–16] проводился сравнительный анализ физических параметров и выявлены некоторые преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых видов утеплителей.

Имеется ряд факторов, которые необходимо учитывать при рассмотрении возможности использования тех или иных видов теплоизоляции. Одним из них является пожарная опасность строительного материала. Пожарная опасность оценивается по различным пожарно-техническим характеристикам, таким как: горючесть, распространение пламени по поверхности, дымообразующая способность, токсичность и воспламеняемость. Совокупность этих показателей позволяет присвоить любому строительному материалу определенный класс пожарной опасности. В статьях [17–18] проводится оценка поведения PIR при пожаре.

**Цель статьи** – определить по результатам испытаний материал с наилучшими теплоизоляционными показателями.

## МЕТОДЫ

Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности этого теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.

### Исследуемые материалы:

- плиты минеральной ваты размерами 250×250 мм и толщиной 50 мм;
- плиты PIR размерами 250×250 мм и толщиной 50 мм с двусторонней облицовкой алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм;
- плиты PIR размерами 250×250 мм и толщиной 50 мм без облицовки;
- плиты PIR размерами 250×250 мм и толщиной 30 мм с двусторонней облицовкой алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм;
- плиты PIR размерами 250×250 мм и толщиной 30 мм без облицовки;
- плиты аэрогеля;
- плиты карбона.

Теплоизоляционные материалы представлены на рис. 4.

**Нормативные документы:** ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.



Рисунок 4 – Карбон и аэрогель.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплопроводность теплоизоляционных материалов определяли с помощью прибора ПИТ-2.1 (ООО «ИзТех») (рис. 5) по ГОСТ 7076-00 при средней температуре образца ( $25 \pm 1$ )°С.

Полученные результаты приведены в таблице.

## ВЫВОДЫ

В результате испытаний были определены материалы с наиболее низкой теплопроводностью.

Таблица – Определение теплопроводности образцов материалов минеральной ваты, PIR, карбона и аэрогеля

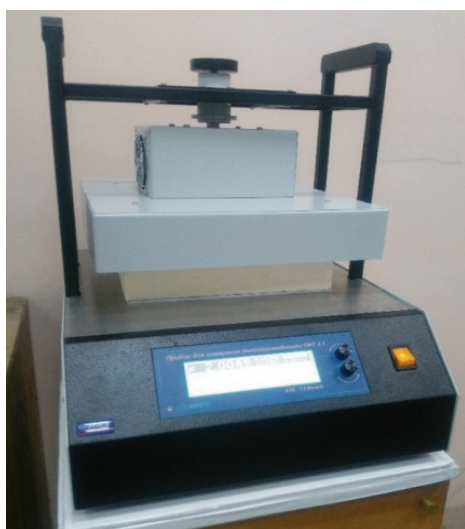


Рисунок 5 – Прибор для определения теплопроводности ПИТ-2.1.

Образец	W (высушенные)
	$t_{cp} = 25$ °С
	ПИТ 2.1
Минеральная вата $\rho = 130$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 50$ мм	0,0351
Минеральная вата $\rho = 130$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 50$ мм	0,0331
PIR с облицовкой из фольги, $\delta = 50$ мм	0,0220
PIR с облицовкой из фольги, $\delta = 50$ мм	0,0210
PIR без облицовки, $\delta = 50$ мм	0,0242
PIR без облицовки, $\delta = 50$ мм	0,0239
PIR с облицовкой из фольги, $\delta = 30$ мм	0,0200
PIR с облицовкой из фольги, $\delta = 30$ мм	0,0227
PIR без облицовки, $\delta = 30$ мм	0,0244
PIR без облицовки, $\delta = 30$ мм	0,0242
Карбон, $\delta = 2$ мм	0,0140
Карбон, $\delta = 2$ мм	0,0100
Карбон, $\delta = 2$ мм	0,0110
Аэрогель, $\delta =$ мм	0,0163
Аэрогель, $\delta =$ мм	0,0152
Аэрогель, $\delta =$ мм	0,0167

стью – плиты карбона и аэрогеля. Тщательный анализ литературы показывает, что вместе с потерей теплоизоляционной способности минеральной ваты при намокании и горючести PIR-панелей эти два материала вполне способны заменить на рынке минеральную вату и панели из пенополиизоцианурата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analysis of On-site Construction Processes for Effective External Thermal Insulation Composite System Installation [Text] / V. Sulakatko, I. Lill, E. Liisma // Procedia Econ. Financ. – 2015. – Vol. 21. – PP. 297–305.
2. Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries [Text] / T. Csoknyai, S. Hrabovszky-horváth, Z. Georgiev // Energy and Buildings. – 2016. – Vol. 132. – PP. 39–52.
3. Vereecken, E. Capillary Active Interior Insulation Systems for Wall Retrofitting [Text] / E. Vereecken, S. Roels // A More Nuanced Story. Int. J. Archit. Herit. – 2016. – Vol. 10. – PP. 558–569.
4. Payback period of investments in energy saving [Text] / A. S. Gorshkov, N. I. Vatin, P. P. Rymkevich, O. O. Kydrevich // Mag. Civ. Eng. – 2018. – Vol. 78. – PP. 65–75.
5. Vilches, A. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. [Text] / A. Vilches, A. Garcia-Martinez, B. Sanchez-Montañes // Energy Build. – 2017. – Vol. 135. – PP. 286–307.
6. Long-term hygrothermal performance of white and black roofs in North American climates [Text] / H. H. Saber, M. C. Swinton, P. Kalinger, R.M. Paroli // Build. Environ. – 2012. – Vol. 50. – PP. 141–154.
7. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications [Text] / F. Asdrubali, B. Ferracuti, L. Lombardi, C. Guattari, L. Evangelisti [et ad.] // Building Environ. – 2017. – Vol. 114. – PP. 307–332.

8. Berge, A. Literature Review of High Performance Thermal Insulation [Текст] / A. Berge, P. Johansson // Civ. Environ. Eng. – 2012. – 28 p.
9. Yang, S. J. Research on Properties of Rock-Mineral Wool as Thermal Insulation Material for Construction [Text] / S. J. Yang, L. W. Zhang // Adv. Mater. Res. – 2012. – Vol. 450–451. – PP. 618–622.
10. Flammability of Bio-Based Rigid Polyurethane Foam as Sustainable Thermal Insulation Material [Electronic resource] / M. Kirpluks, U. Cabulis, A. Avots // Insulation Materials in Context of Sustainability. – 2016. – Ch. 1. – Doi: 10.5772/62539.
11. Technical characteristics of rigid sprayed PUR and PIR foams used in construction industry [Text] / M. Gravit, A. Kuleshin, E. Khametgalieva, I. Karakozova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. – PP. 21–34.
12. Concerning the Thermal Insulation Panels with Double-side Anti-condensation Foil on the Exterior and Polyurethane Foam or Polyisocyanurate on the Interior [Text] / S. Pescari, D. Tudor, S. Tölgyi, M. C. Study // Key Eng. Mater. – 2015. Vol. 660. – PP. 244–248.
13. Aerogel Insulation for Building Applications [Text] / B. P. Jelle, R. Baetens, A. Gustavsen // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – PP. 761–769.
14. Thermal insulation material based on SiO<sub>2</sub> aerogel [Text] / Zhao-hui Liu, F. Wang, Zhi-ping Deng // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 122. – PP. 548–555.
15. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis [Текст] / S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 62. – PP. 988–1011.
16. A review of unconventional sustainable building insulation materials [Text] / F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni // Sustain. Mater. Technol. – 2015. – Vol. 4. – PP. 1–17.
17. Zhang, Z. Amide-Modified Polyisocyanurate Foams Having High Thermal Stability [Text] / Z. Zhang, K. Ashida // J. Cell. Plast. 1997. – Vol. 33. – PP. 487–501.
18. Wang, Y. C. Experimental and numerical study of temperature developments in PIR core sandwich panels with joint [Text] / Y. C. Wang, A. Foster // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 90. – PP. 1–14.

Получено 30.04.2019

Н. И. ВАТИН, Ш. Т. СУЛТАНОВ, А. О. КРУПИНА  
ПОРІВНЯННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПІНОПОЛІІЗОЦІАНУРАТУ (PIR), МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ, КАРБОНУ І  
АЕРОГЕЛЮ  
ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого»

**Анотація.** Характеристики теплоізоляційного матеріалу в основному визначаються його теплопровідністю, яка залежить від щільності матеріалу, пористості, вмісту вологи і середньої різниці температур. У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень коефіцієнта теплопровідності мінеральної вати, пінополіізоціануратної піни, карбону і аерогелю у стаціонарному тепловому режимі. Показники теплоізоляції визначають на плоскому зразку за допомогою приладу ПІТ 2.1. Результати повинні мати велике значення для виробників матеріалів, власників будівель і дизайнерів при виборі відповідних теплоізоляційних матеріалів і правильному прогнозуванні теплових і енергетичних характеристик будівель і їх енергоефективності.

**Ключові слова:** теплоізоляційний матеріал, пінополіізоціанурат, мінеральна вата, теплопровідність, аерогель, карбон, теплопровідність, будівництво.

NIKOLAY VATIN, SHUKHRAT SULTANOV, ANASTASIA KRUPINA  
COMPARISON OF THE THERMAL INSULATION CHARACTERISTICS OF  
POLYISOCYANURATE FOAM (PIR), MINERAL WOOL, CARBON FIBER AND  
AIRGEL

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

**Abstract.** The characteristics of the heat-insulating material are mainly determined by its thermal conductivity, which depends on the density of the material, porosity, moisture content and average temperature difference. This paper presents the results of experimental studies of the thermal conductivity of mineral wool, polyisocyanurate foam, carbon and airgel in a stationary thermal regime. Thermal insulation indicators are determined on a flat sample using the PIT 2.1 device. The results should be of great importance for manufacturers of materials, building owners and designers when choosing suitable heat-insulating

materials and correctly forecasting the thermal and energy characteristics of buildings and their energy efficiency.

**Key words:** heat-insulating material, polyisocyanurate foam, mineral wool, thermal conductivity, airgel, carbon, thermal conductivity, construction.

**Ватин Николай Иванович** – доктор технических наук, профессор высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: проектирование, строительство, реконструкция и обследование зданий и сооружений.

**Султанов Шухрат Тахирович** – аспирант высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: теплофизические характеристики строительных материалов.

**Крупина Анастасия Алексеевна** – магистр высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: строительные материалы, строительная теплофизика, теплоизоляционные материалы.

**Ватін Микола Іванович** – доктор технічних наук, професор вищої школи промислово-цивільного та дорожнього будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: проектування, будівництво, реконструкція і обстеження будівель і споруд

**Султанов Шухрат Тахірович** – аспірант вищої школи промислово-цивільного та дорожнього будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: теплофізичні характеристики будівельних матеріалів.

**Крупина Анастасія Олексіївна** – магістр вищої школи гідротехнічного і енергетичного будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: будівельні матеріали, будівельна теплофізика, теплоізоляційні матеріали.

**Vatin Nikolay** – D. Sc. (Eng.), Professor, Higher School of Industrial-Civil and Road Construction, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Research interests: design, construction, reconstruction and inspection of buildings and structures

**Sultanov Shukhrat** – graduate student, Higher School of Industrial-Civil and Road Construction, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Scientific interests: thermophysical characteristics of building materials.

**Krupina Anastasia** – master Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Scientific interests: building materials, building thermal physics, thermal insulation materials.