
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ IN HIGHER SCHOOL LABS

Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 112–120.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (1): 112–120.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 699.86:536.24.001.4

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-112-120

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

**Владимир Павлович Селяев, Людмила Ивановна Куприяшкина,
Михаил Александрович Муханов, Олег Викторович Лияскин**
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Аннотация. Проведен анализ составляющих вакуумных теплоизоляционных панелей. Разработаны панели с улучшенными теплотехническими характеристиками. Показана возможность использования в качестве наполнителя пирогенного микрокремнезема марки «Конасил-200» с добавлением диоксида титана и минерального волокна. Рассмотрено влияние климатических параметров: температуры, влажности, давления и солнечной радиации на изменение сопротивления теплопередаче вакуумных панелей. Математическими методами теории эксперимента разработан оптимальный состав вакуумных изоляционных панелей, позволяющий получить изделия с низкой теплопроводностью и высоким сопротивлением климатическим воздействиям. Предложен метод прогнозирования срока службы панелей с учетом результатов климатических испытаний.

Ключевые слова: теплоизоляция, вакуум, изоляционная панель, коэффициент теплопроводности, климатические испытания, теплотехнический расчет, конструктивное решение, долговечность

Для цитирования: Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Муханов М.А., Лияскин О.В. Влияние климатических условий на эксплуатационные характеристики вакуумной теплоизоляции // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 112–120. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-112-120.

Original article

INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON OPERATING CHARACTERISTICS OF VACUUM HEAT INSULATION

**Vladimir P. Selyaev, Lyudmila I. Kupriyashkina, Mikhail A. Mukhanov,
Oleg V. Liaskin**
Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

© Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Муханов М.А., Лияскин О.В., 2022

Abstract. The analysis of the components of vacuum thermal insulation panels was carried out. Panels with improved thermal performance was developed. The possibility of using pyrogenic microsilica grade “Konasil-200” with the addition of titanium dioxide and mineral fiber as a filler is shown. The influence of climatic parameters: temperature, humidity, pressure and solar radiation on changes in the heat transfer resistance of vacuum panels is considered. Mathematical methods of the experimental theory have been used to develop the optimal composition of vacuum insulating panels, which makes it possible to obtain products with low thermal conductivity and high resistance to climatic influences. A method for predicting the service life of panels is proposed, taking into account the results of climatic tests.

Keywords: thermal insulation, vacuum, insulating panel, thermal conductivity coefficient, climatic tests, heat engineering calculation, constructive solution, durability

For citation: Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Mukhanov M.A., Liaskin O.V. Influence of climatic conditions on operating characteristics of vacuum heat insulation. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (1): 112–120. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-112-120.

Введение. В последние годы особое внимание уделяется разработке и исследованиям вакуумных теплоизоляционных панелей (VIP), которые представляют собой плоские элементы, состоящие из оболочки и наполнителей (минеральный тонкодисперсный порошок и волокна), функциональное назначение которых обеспечение формоустойчивости изделий в условиях действия механической нагрузки и атмосферного давления. Для повышения теплового сопротивления VIP наполнитель помещается в газонепроницаемую оболочку, внутри которой создается вакуум. Сопротивление теплопередаче вакуумной теплоизоляции в 5–10 раз лучше, чем у традиционных утеплителей, таких как пенополистирол и минеральная вата [1–7].

Целью данной работы являются оптимизация составов наполнителей для вакуумных теплоизоляционных панелей и исследование влияния климатических факторов на долговечность VIP-панелей.

Экспериментальные исследования. Теплоизоляционные свойства материалов и изделий, которые определяют методом стационарного теплового потока (ГОСТ 7076–87), принято оценивать по показателю теплопроводности. Для экспериментального определения теплопроводности VIP-панелей методом стационарного теплового потока применялось следующее оборудование: морозильная камера марки POZIS, метеостанция REXANT 70-0515, измеритель плотности тепловых потоков ИПП-2.

Испытания проводились по схеме, представленной на рис. 1.

Вакуумная панель помещалась в специальную форму из пенополистирола, устанавливаемую в морозильную камеру. На панель с двух сторон крепились датчики температуры, снимающие температуру на разных поверхностях. В зоне положительной температуры устанавливался измеритель теплового потока ИПП-2. Наиболее часто вакуумные панели используются в составе многослойных конструкций [6, 7].

Для исследования влияния климатических факторов: температуры, давления, влажности и солнечной радиации на долговечность VIP-панелей были изготовлены образцы VIP размером 100×100×10 мм, которые экспонировались на стендах климатической станции МГУ им. Н.П. Огарева.

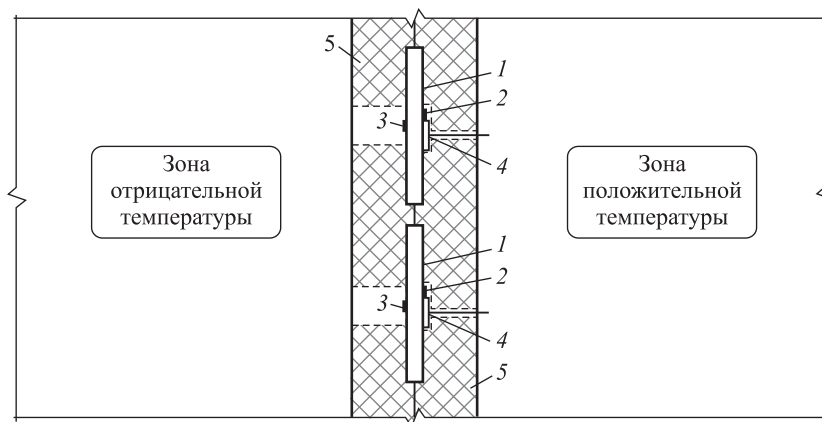


Рис. 1. Схема измерительного комплекса для определения теплопроводности материалов методом стационарного потока

1 – исследуемые изделия; 2 – датчик наружной температуры; 3 – датчик внутренней температуры; 4 – измеритель плотности теплового потока; 5 – рамки из пенополистирола

Fig. 1. The scheme of the measuring complex for determining the thermal conductivity of materials by the stationary flow method

1 – test products; 2 – outdoor temperature sensor; 3 – internal temperature sensor; 4 – heat flow density meter; 5 – styrofoam frames

Оболочка образцов представляет собой сваренный с трех сторон термической сваркой герметичный пакет из двухслойного пластика (PET/PE) [8–10]. Вакуумирование VIP-панелей производилось с применением вакуумного упаковщика Henkelman Polar 52.

В исследуемых образцах VIP в составе наполнителя варьировались две переменные:

X_1 – массовое соотношение диоксида титана к наполнителю Конасил-200;

X_2 – массовое соотношение минерального волокна к наполнителю Конасил-200.

Варьирование переменных факторов производилось на трех уровнях (–1; 0; +1) по плану Кифера–Коно (табл. 1).

Реализация плана Кифера–Коно (табл. 2) позволила описать зависимость теплопроводности VIP-панелей от отношения массы волокна к массе наполнителя Конасил-200 (X_1) и отношения массы диоксида титана к массе наполнителя Конасил-200 (X_2) регрессионным уравнением второго порядка вида

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2. \quad (1)$$

Таблица 1. Уровни варьирования переменных факторов X_1 и X_2 по плану Кифера–Коно

Table 1. Levels of variation of variable factors X_1 and X_2 according to the Kiefer–Kono plan

Варьируемый фактор	Уровень фактора в i -м опыте								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1	0	1	0	–1	0	1	1	–1	–1
X_2	0	0	1	0	–1	1	–1	–1	1

Таблица 2. Двухфакторный план эксперимента

Table 2. Two-factor experimental plan

Номер точек плана	Нормализованные факторы		Натуральные факторы		Выходные параметры	
	X_1 диоксид титана/Конасил (по массе)	X_2 минеральное волокно/Конасил (по массе)	X_1	X_2	Y_1 (прочность при сжатии при 10%-й деформации), МПа	Y_2 (коэффициент теплопроводности), Вт/м · °С
1	-1	-1	10	7,5	0,15	0,009
2	0	-1	20	7,5	0,252	0,01
3	1	-1	30	7,5	0,181	0,008
4	-1	0	10	10	0,199	0,007
5	0	0	20	10	0,220	0,01
6	1	0	30	10	0,244	0,008
7	-1	1	10	12,5	0,252	0,005
8	0	1	20	12,5	0,235	0,016
9	1	1	30	12,5	0,205	0,0178

Коэффициенты регрессии определяли по формуле

$$b_{ij} = (A^T A)^{-1} A^T y_i = CA^T y_i. \quad (2)$$

При реализации эксперимента в качестве выходных параметров контролировались прочность на сжатие, которая принималась равной напряжению при 10%-й деформации, и коэффициент теплопроводности. После

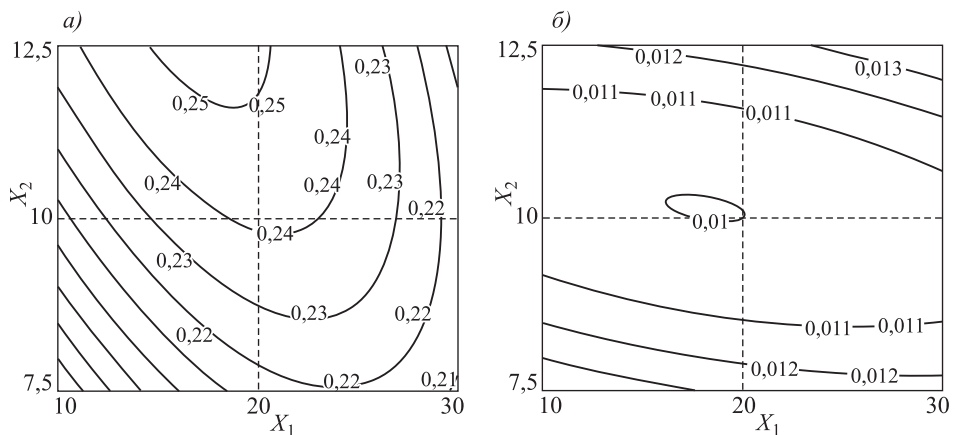


Рис. 2. Графическая зависимость прочности при сжатии при 10%-й деформации (а) и коэффициента теплопроводности (б) от состава наполнителя вакуумной теплоизоляции

X_1 – диоксид титана / Конасил-200, %; X_2 – минеральное волокно / Конасил-200, %

Fig. 2. Graphical dependence of the compressive strength at 10% deformation (a) and the coefficient of thermal conductivity (b) on the composition of the filler of vacuum insulation

X_1 – titanium Dioxide / Conasil-200, %; X_2 – mineral fiber / Conasil-200, %

обработки экспериментальных данных были получены регрессионные уравнения изменения прочности при сжатии (формула (3)) и теплопроводности (формула (4)) от количественного содержания порошкообразного наполнителя и волокон.

$$Y_1 = 0,241 + 0,005X_1 + 0,018X_2 - 0,03X_1^2 - 0,02X_1X_2 - 0,008X_2^2, \quad (3)$$

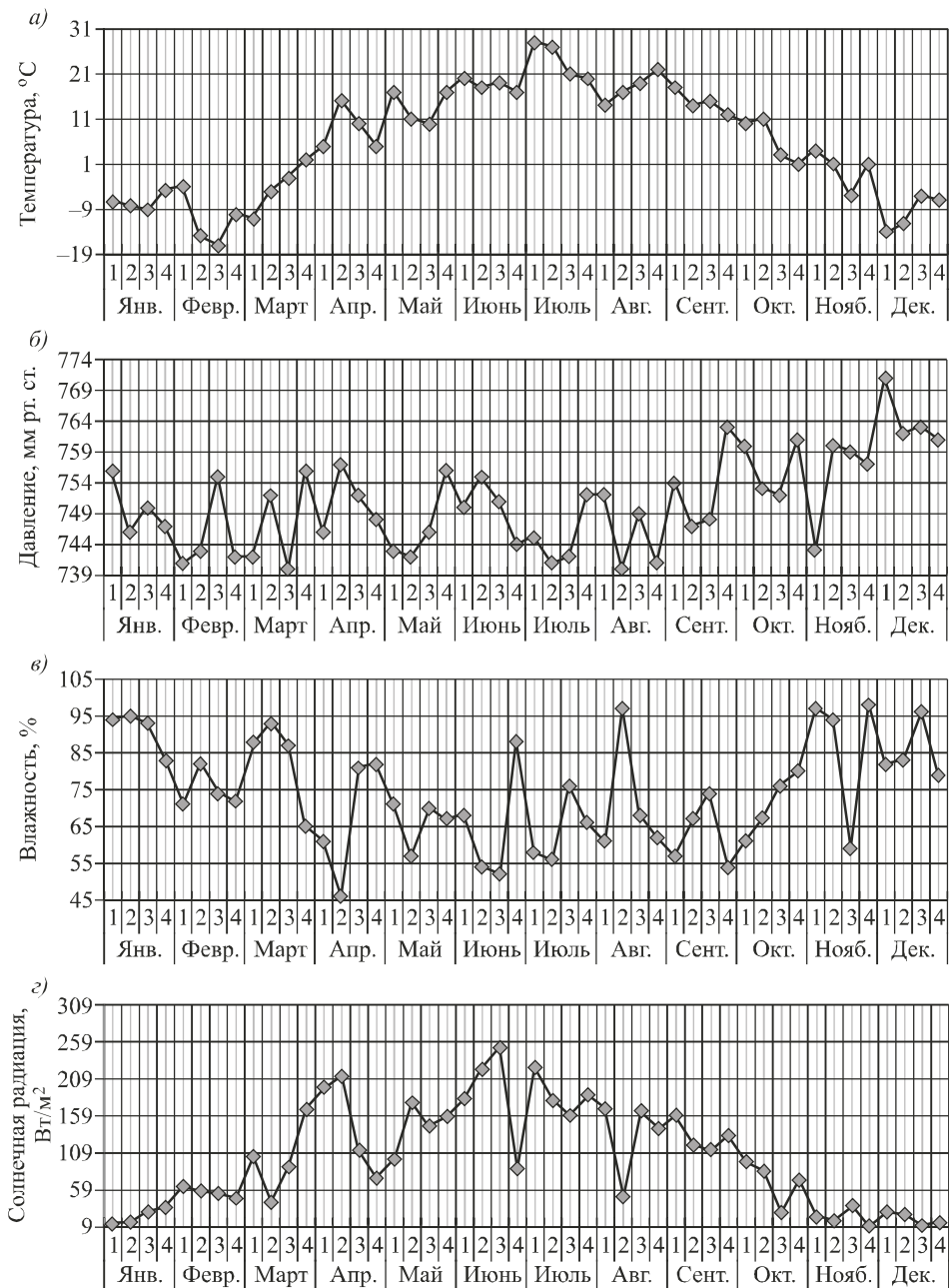


Рис. 3. Параметры климатических испытаний за 2020 г. температура (а), давление (б), влажность (в), солнечная радиация (з)

Fig. 3. Parameters of climate tests for 2020 temperature (a), pressure (b), humidity (v), solar radiation (g)

$$Y_2 = 0,010 + 0,001X_1X_2 + 0,003X_2^2. \quad (4)$$

Графическая интерпретация уравнений (3) и (4) представлена на рис. 2, анализируя которые можно утверждать, что содержание диоксида титана в наполнителе от 10 до 30 % от массы пирогенного микрокремнезема практически не оказывает влияния на прочность при сжатии VIP-панели. Максимальные значения прочности получены для составов, содержащих X_1 в пределах 14–21, X_2 – 11–12,5 %. Оптимальные по теплопроводности значения находятся при содержании диоксида титана в промежутке от 16 до 20 %; минерального волокна 9,5–10,5 %.

Для определения влияния условий климатического воздействия образцы VIP размещались на стендах испытательной лаборатории.

Усредненные показатели изменения климатических факторов, оказывающих наибольшее влияние на климатическую стойкость теплоизоляционных панелей, представлены на рис. 3.

В процессе экспонирования периодически (через каждые 2 мес) определяли коэффициент теплопроводности, кинетика изменения которого представлена на рис. 4.

Анализируя результаты, можно сделать выводы:

1) образцы № 5, 8 практически не увеличили значение коэффициента теплопроводности, образец сохранил свои свойства;

2) у образцов № 2, 4, 7, 9 произошло небольшое увеличение коэффициента теплопроводности;

3) у образцов № 1, 3, 6 произошло значительное снижение теплотехнических характеристик.

С учетом полученных значений коэффициента теплопроводности VIP-панелей был проведен расчет сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, приведенной на рис. 5. Нормативное сопротивление

Таблица 3. Результаты расчетов сопротивления теплопередаче с использованием разного состава вакуумного теплоизоляционного материала для наружных стен из кирпича

Table 3. Results of calculations of heat transfer resistance using different composition of vacuum thermal insulation material for brick exterior walls

Утеплитель	Сопротивление теплопередаче для наружных стен R_0^{Φ}		$R_0^{\Phi} > R_0^{Tp}$
	до испытаний	после испытаний	
1	4,13	3,26	Удовлетворяет
2	3,8	3,48	-//-
3	4,54	3,77	-//-
4	5,09	4,51	-//-
5	3,79	3,45	-//-
6	4,54	3,42	-//-
7	6,79	4,6	-//-
8	2,68	2,52	Не удовлетворяет
9	2,48	2,29	-//-

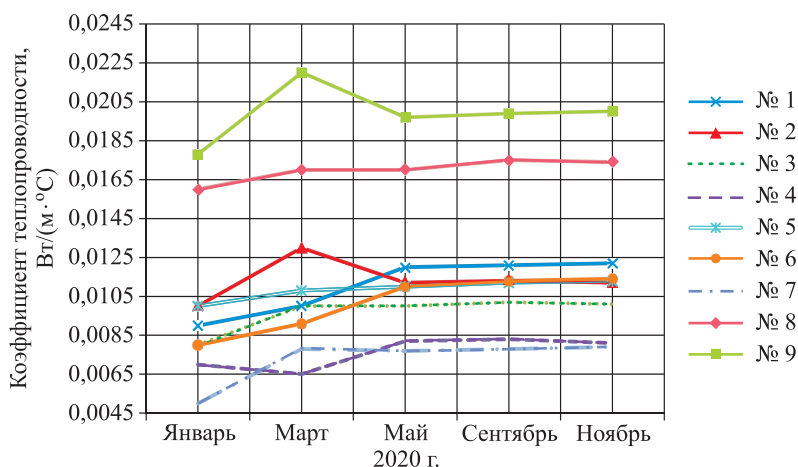


Рис. 4. Изменение коэффициента теплопроводности исследуемых образцов

Fig. 4. Change in the thermal conductivity coefficient of the studied samples

ние теплопередаче (R_0^{TP}) для наружных стен в Москве должно быть не менее $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$. Изменения сопротивления теплопередаче исследуемых образцов показаны в табл. 3.

По полученным данным изменения коэффициента теплопроводности образцов была спрогнозирована долговечность VIP-панелей для ограждающей конструкции (рис. 6).

Анализ экспериментальных данных производился методом математического тренда, который представляет собой функцию сглаживания

$$y(x) = a \ln(x) + b, \quad (5)$$

где x – номера периода во временном ряду;
 y – последовательность значений, которые мы анализируем и прогнозируем;
 b – точка пересечения с осью y на графике;
 a – значение, на которое увеличивается следующее значение временного ряда.

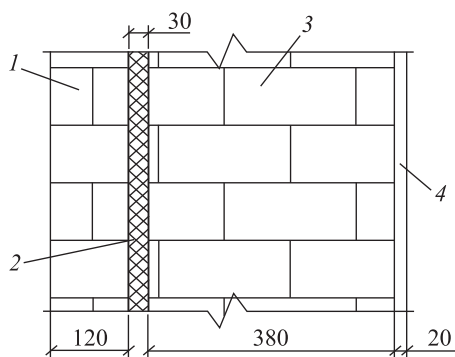


Рис. 5. Пример выполнения кирпичной стены с вакуумным утеплителем

1 – облицовка из кирпича 120 мм; 2 – вакуумная панель 30 мм; 3 – кладка кирпичная; 4 – известково-песчаная штукатурка

Fig. 5. Example of a brick wall with vacuum insulation

1 – facing made of brick 120 mm; 2 – vacuum panel 30 mm; 3 – brick masonry; 4 – lime-sand plaster

Анализируя графики, представленные на рис. 6, можно утверждать, что для определения срока службы вакуумных теплоизоляционных панелей большую роль играют сопротивление теплопередаче до проведения испытания, а также разница между конечным и начальным сопротивлением теплопередаче.

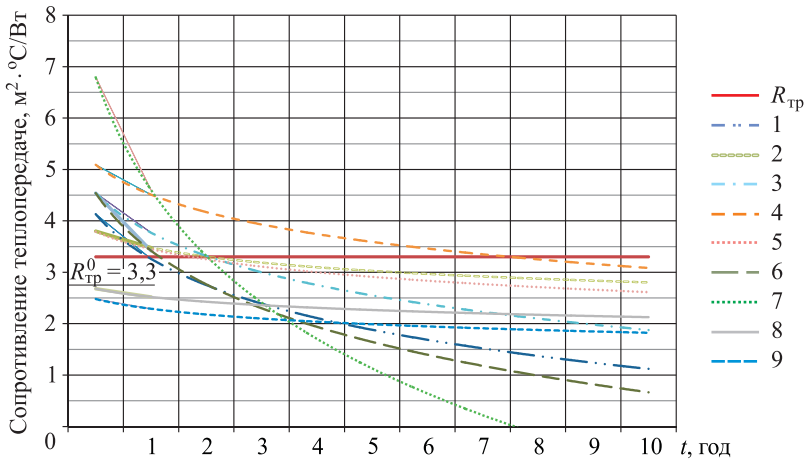


Рис. 6. Срок службы вакуумированных панелей для ограждающей конструкции (кирпичной стены)

Fig. 6. Sewice life of vacuumed panels for the enclosing structure (brick wall)

Выводы. 1. Наилучший состав по коэффициенту теплопроводности № 7, состоящий из 10 % диоксида титана и 12,5 % минерального волокна (оболочка – PET/PE).

2. Наилучший состав по долговечности также № 7.

Список источников

1. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Перспективы применения вакуумно-порошковой теплоизоляции на нефтепроводах // Строит. материалы. 2000. № 1. С. 12–13.
2. Лузин В.П., Корнилов А.В. Эффективные теплоизоляционные материалы для строительной индустрии // Строит. материалы. 2004. № 5. С. 26–27.
3. Барабанщиков Ю.Г., Шарифуллина А.Р. Эффективность использования вакуумных теплоизоляционных панелей в строительстве // Синергия наук. 2017. № 11. С. 815–821.
4. Кокоев М.Н. Разработка энерго- и ресурсосберегающих строительных изделий, зданий и сооружений: Дис. ... канд. техн. наук. Нальчик, 2005. 257 с.
5. Пат. 2144595 С1 Российская Федерация. МПК E04B 1/80, F16L 59/06, F16L 59/07. Вакуумное теплоизоляционное изделие / М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров; заявл. 26.11.1997; опубл. 20.01.2000.
6. Пат. 99041 Российская Федерация. МПК E04F 13/077 (2006.01). Стеновая многослойная панель / В.П. Селяев, В.И. Травуш, А.К. Осипов, О.Г. Маштаев; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. 2010120159/03; заявл. 19.05.2010, опубл. 10.11.2010; Бюл. № 31.
7. Пат. 152710 Российская Федерация. МПК E 04 C 2/00. Трехслойная стеновая панель / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, П.В. Селяев, Е.И. Куприяшкина, И.П. Долгов; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. № 2014144642; заявл. 05.11.14; опубл. 22.05.14; Бюл. № 21.
8. Куприяшкина Л.И., Карандашов Д.Л., Муханов М.А., Родькина Д.А. Климатическая стойкость вакуумных теплоизоляционных панелей // Эксперт: теория и практика. 2020. № 3. С. 37–41.

9. Schwab H., Heinemann U., Ebert H.-P., Fricke J. Dependence of thermal conductivity on water content in vacuum insulation panels with fumed silica kernels // Thermal envelope and building science. 2005. P. 13.
10. Simmler H., Brunner S. Aging and service life of VIP in buildings // 7th International vacuum insulation symposium. Empa; Duebendorf; Zurich; Switzerland, 2005. P. 15–22.

References

1. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Prospects for the use of vacuum-powder thermal insulation on oil pipelines. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 2000; (1): 12–13. (In Russ.).
2. Luzin V.P., Kornilov A.V. Effective heat-insulating materials for the construction industry. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 2004; (5): 26–27. (In Russ.).
3. Barabanshchikov Yu.G., Sharifullina A.R. Efficiency of using vacuum heat-insulating panels in construction. *Sinergiya nauk = Synergy of Sciences*. 2017; (11): 815–821. (In Russ.).
4. Kokoev M.N. Development of energy and resource-saving building products, buildings and structures: Author diss. ... PhD. Nalchik, 2005. 257 p. (In Russ.).
5. Pat. 2144595 C1 Russian Federation, IPC E04B 1/80, F16L 59/06, F16L 59/07. Vacuum thermal insulation product. M.N. Kokoev, V.T. Fedorov; appl. 11.26.1997; publ. 01/20/2000. (In Russ.).
6. Pat. 99041 Russian Federation, IPC E04F 13/077 (2006.01). Multilayer wall panel. V.P. Selyaev, V.I. Travush, A.K. Osipov, O.G. Mashtaev; appl. Ogarev Mordovian State University. 2010120159/03; appl. 05/19/2010, publ. 10.11.2010; Bull. No. 31. (In Russ.).
7. Pat. 152710 Russian Federation, MPK E 04 S 2/00. Three-layer wall panel. V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, P.V. Selyaev, E.I. Kupriyashkina, I.P. Dolgov; appl. Ogarev Mordovian State University. No. 2014144642; appl. 11.05.14; publ. 05.22.14; Bull. No. 21. (In Russ.).
8. Kupriyashkina L.I., Karandashov D.L., Mukhanov M.A., Rod'kina D.A. Climatic resistance of vacuum heat-insulating panels. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: theory and practice*. 2020; (3): 37–41. (In Russ.).
9. Schwab H., Heinemann U., Ebert H.-P., Fricke J. Dependence of thermal conductivity on water content in vacuum insulation panels with fumed silica kernels. Thermal envelope and building science. 2005. P. 13.
10. Simmler H., Brunner S. Aging and service life of VIP in buildings. 7th International vacuum insulation symposium. Empa; Duebendorf; Zurich; Switzerland, 2005. P. 15–22.

Информация об авторах

В.П. Селяев – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, nform80@mail.ru

Л.И. Куприяшкина – кандидат технических наук, доцент, kupriashkina.liudmila@yandex.ru

М.А. Муханов – аспирант

О.В. Лияскин – инженер

Information about the authors

V.P. Selyaev – Academician of RAASN, DSc, Professor, nform80@mail.ru

L.I. Kupriyashkina – PhD, Ass. Professor

M.A. Mukhanov – Post-graduate Student

O.V. Liaskin – Engineer

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.12.2021
Одобрена после рецензирования 12.01.2022
Принята к публикации 19.01.2022

The article was submitted 13.12.2021
Approved after reviewing 12.01.2022
Accepted for publication 19.01.2022