

УДК 691-419:536.2

В.П. СЕЛЯЕВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА, Н.Н. КИСЕЛЕВ

**КЛИМАТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ  
ВАКУУМНЫХ ПАНЕЛЕЙ\***

Приведен сравнительный анализ технических характеристик VIP-панелей. Показано влияние различных видов наполнителей на изменение коэффициента теплопроводности исследуемых теплоизоляционных материалов. Дано сравнение химического и гранулометрического состава, топографии поверхности частиц аморфного микрокремнезема. Рассмотрено влияние климатических параметров: температуры, влажности, давления и солнечной радиации на изменение сопротивления теплопередачи вакуумных панелей. Показаны возможности использования полученных панелей в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** вакуумная панель, наполнитель, теплопередача, долговечность, климатические испытания, теплопроводность, микрокремнезем, теплоизоляционный материал.

**DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-22-29**

Строительная отрасль РФ в ближайшие годы должна почти в 2 раза увеличить объем жилищного строительства. При этом ставится задача снизить удельное энергопотребление системы теплоснабжения зданий и сооружений до 32–40 Вт · ч/м<sup>2</sup> · °С · сут. В соответствии с федеральным законом «Об энергосбережении» от 03.04.1996 г. № 28–ФЗ в современной строительной индустрии особое внимание будет уделено качеству теплоизоляционных материалов. Широко применяемые изделия на основе пенополистирола, минеральной ваты не соответствуют современным требованиям экологии, противопожарной безопасности, долговечности.

Перспективные теплоизоляционные материалы, которым уделяют большое внимание, – это материалы нового поколения на основе наноструктурированных тонкодисперсных порошков, к которым относятся вакуумные теплоизоляционные панели (VIP-панели). Использование их для теплоизоляции ограждающих конструкций жилых зданий представляется более эффективным решением, чем применение традиционного утеплителя [1–9]. Вакуумная порошковая теплоизоляция отличается экологичностью, пожаробезопасностью, ремонтпригодностью и низким коэффициентом теплопроводности ( $\lambda = 0,002–0,02$  Вт/(м · К)).

Использование пенопластов и минеральной ваты не позволяет снизить теплопередачу без значительного увеличения толщины изделия. В связи с этим в 1950-х гг. сотрудниками кафедры теплофизики Ленинградского института точной механики и оптики под руководством Г.Н. Дульнева была предложена теплоизоляция с помощью вакуума.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-48-130001/18.

© Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Киселев Н.Н., 2018

Коллективом кафедры строительных конструкций МГУ им. Н.П. Огарева под руководством академика РААСН В.П. Селяева предложено новое конструкционное решение теплоизоляционной панели: наружный слой выполняется из декоративного стекла, а внутренний – из латонита, теплоизоляционный слой, расположенный между ними, – из вакуумированного наноструктурированного порошка из частиц микрокремнезема крупностью до 100 нм и пористостью 95 %, все слои соединяются полиуретановым клеем (RU 98021, МПК У 04С 2/02, опубл. 27.09.2010).

Для сохранения вакуума обычно применяется гибкая оболочка из многослойного материала, включающего алюминиевую фольгу, пластик. Известно предложение изготавливать панель методом горячего прессования под давлением в гибкой оболочке из фольги и полимерной пленки (патент РФ № 106715, МПК F16L 59/00, опубл. 20.07.2011). Наполнитель содержит связующую добавку из полиэтилена, гибкая оболочка выполняется из химически стойкого пластика. Недостатком подобного решения является технологическая трудность создания регулярного открытого порового пространства в наполнителе для вакуумирования. Кроме того, используемые для изготовления наполнителя материалы (фольга, пластик, бумага) имеют достаточно высокую теплопроводность. Связующая добавка из полиэтилена также снижает теплопроводность панели.

Целью настоящей работы являются создание панели VIP с использованием местных минеральных наполнителей и исследование климатической стойкости вакуумных изоляционных панелей VIP.

На кафедре строительных конструкций НИ МГУ им. Н.П. Огарева была предложена вакуумная теплоизоляционная панель Diatomit-VIP, состоящая из вакуумированного наноструктурированного порошка частиц микрокремнезема, полученного из диатомита, упакованного в термостойкую полимерную пленку, которая заключена в жесткую пенополиуретановую оболочку-форму, выполненную из двух частей, входящих друг в друга и соединенных между собой полиуретановым клеем (патент РФ №150467, опубл. 20.02.2015).

Исследовано влияние вида зернового и волокнистого наполнителя на теплопроводность вакуумных изоляционных панелей. Для этого были изготовлены образцы в виде плит размером 140×125×10 мм и 160×140×10 мм. Оболочка выполнялась из металлизированной полимерной пленки PA/PE. Дисперсный наполнитель применяли в виде порошка из частиц диоксида кремния различного происхождения: природный (диатомит), пирогенный, осажденный, конденсированный. Осажденный аморфный кремнезем получали золь-гель методом путем осаждения оксида кремния из коллоидного раствора кремниевой кислоты [10].

Сравнение химического и гранулометрического состава, топографии поверхности частиц аморфного микрокремнезема, полученного из Атемарского месторождения диатомита в Республике Мордовия по авторской технологии [10], с лучшими мировыми аналогами показало, что по качественным показателям они превосходят зарубежные аналоги и значительно экономичнее, энергоэффективнее в производстве (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав и свойства микрокремнезема (МК)

Характеристика микрокремнезема	Диатомит Атемарский	МК аморфный (из диатомита)	МК конденсированный	МК пирогенный	МК (США)
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2200	2200	2200	2200	2200
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	600–800	150–200	150–200	100	80
Пористость, %	50–60	93	93	95	96
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	7	12	12	20	20
Крупность частиц, мкм	1–100	0,33–0,45	0,29–1,21	0,29–0,97	0,29–1,97
Диапазон размерностей, нм	360–1500	290–800	290–1200	270–760	790–560
Потеря массы	8,87	3,09	3,9	11,5	3,3
Фрактальная размерность частиц	2,27	2,64	2,40	2,83	2,70
Крупность рассеивающих неоднородностей, нм	7–48	4–40	4–40	4–40	4–40
Химический состав:					
SiO <sub>2</sub>	87,23	97,82	90,42	97,1	99,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,15	0,46	0,61	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,41	0,16	1,71	0,09	0,09
K <sub>2</sub> O	1,21	0,50	2,50	–	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,32	0,51	–	–	0,01
Na <sub>2</sub> O	–	–	0,89	0,70	–
MgO	0,73	–	1,84	–	–
MnO	–	–	0,26	–	–
SO <sub>3</sub>	0,03	–	0,67	0,03	–
CaO	1,75	0,03	0,56	0,63	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	–	0,32	–	0,01
NiO	–	–	–	–	0,01
Cl	–	–	–	0,92	0,03

Был проведен сравнительный анализ VIP-панелей, изготовленных различными производителями. В результате испытаний установлено, что разработанные панели не уступают по своим характеристикам подобным изделиям, произведенным в других странах (табл. 2).

В качестве наполнителя применили хлопковые, базальтовые, стекольные волокна. Результаты испытаний на теплопроводность приведены в табл. 3.

Анализ экспериментальных данных, представленных в табл. 3, показал, что на теплопроводность VIP влияют гранулометрические, топологические характеристики порошка наполнителя. Они близки у всех видов МК, кроме природного диатомита. Для повышения теплопроводности предпочтительно

Таблица 2. Сравнение технических характеристик VIP-панелей на основе аморфного микрокремнезема

Показатель	США (VIP)	Германия (FRONT-VIP)	Китай (VOKES-VIP)	Китай/США (Nanopor-VIP)	Россия (Diatomit-VIP)
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,01–0,008	0,02–0,002	0,02–0,002	0,018–0,002	0,02–0,002
Стабильность размеров, %	1	1	1	1	1
Огнестойкость, класс	A1	A1	A1	A1	A1
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	100	80	100	90	100
Стоимость, руб./м <sup>2</sup>	800	900	900	800	400
Толщина, мм	20	20	20	20	20

Таблица 3. Теплопроводность вакуумных VIP-панелей

Параметры образцов	1	2	3	4	5	6	7	8
Состав	МК/Х	МК/Х	МК/Б	Д/СВ	МК <sup>1</sup> /СВ	МК <sup>2</sup> /СВ	ППЭ	ПП
Градиент, °С	20	20	20	20	20	20	10	10
$\lambda$ , Вт/(м · °С)	0,004	0,021	0,012	0,012	0,009	0,008	0,018	0,022

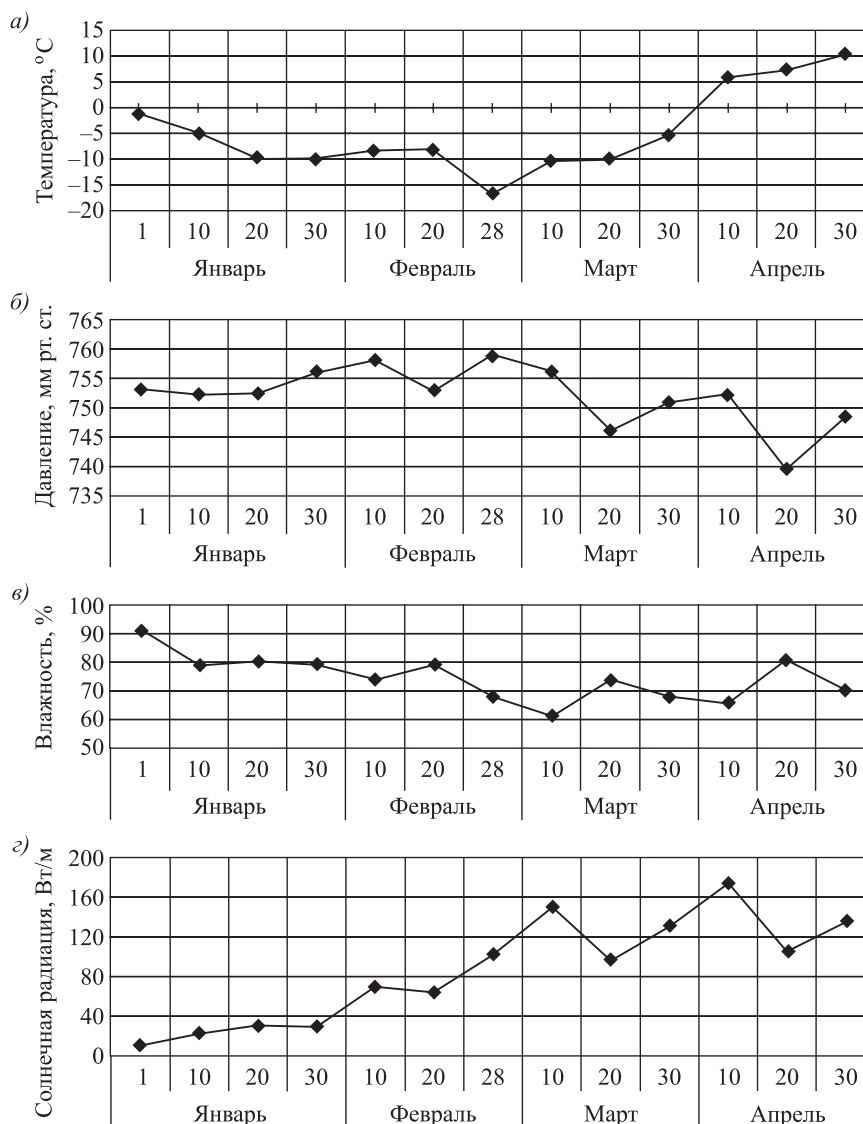
Примечание. МК – микрокремнезем; Х – хлопковое волокно; Д – диатомит; СВ – стекловолокно; МК<sup>1</sup> – микрокремнезем из диатомита; МК<sup>2</sup> – микрокремнезем производства США; ППЭ – пенополистирол экструдированный; ПП – пенопласт; образец 2 без вакуумирования; соотношение МК/Х = МК/Б = МК/СВ = 100/5 (вес.ч.).

применять хлопковые волокна. При потере вакуума теплоизоляционные свойства панели ухудшаются до уровня ППЭ.

Для определения долговечности разработанных VIP-панелей проводились климатические испытания (рисунок). Были изготовлены образцы вакуумных теплоизоляционных панелей размером 100×100×10 мм с различными видами наполнителей:

- образец 1 – белая сажа марки БС-100 (оболочка – РА/РЕ);
- образец 2 – пирогенный микрокремнезем;
- образец 3 – модифицированный микрокремнезем (синтезированный золь-гель методом из диатомита);
- образец 4 – пирогенный микрокремнезем марки Орисил 300;
- образец 5 – белая сажа марки БС-100 (оболочка – полимерная пленка) [4, 5].

Во время экспериментального исследования влияния на вакуумные панели атмосферных воздействий (температуры, влажности, давления и солнечной радиации) фиксировались следующие показатели:  $Q$  – интенсивность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta$  – толщина образца, мм;  $t_1$  – температура на внешней поверхности панели, °С;  $t_2$  – температура на внутренней поверхности панели, °С;  $m$  – масса образца, г;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С) (табл. 4).



Параметры климатических испытаний: температура (а), давление (б), влажность (в), солнечная радиация (з)

Анализ экспериментальных данных показал, что полученные VIP-панели можно использовать в качестве теплоизоляционных ограждающих материалов. Образец 4 не прошел климатические испытания, так как, вероятно, вследствие занесения в процессе изготовления анаэробных бактерий произошло вздутие оболочки и развакуумирование панели.

С учетом полученного коэффициента теплопроводности был проведен теплотехнический расчет ограждающих конструкций жилых домов с использованием в качестве теплоизоляционного материала разработанных вакуумных панелей. Требуемое сопротивление теплопередаче ( $R_0^{TP}$ ) для наружных стен должно быть не менее  $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , для кровли – не менее  $4,8 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Сопротивления теплопередаче, полученные в процессе эксперимента, для наружных стен и кровли ( $R_0^{\Phi}$ ) приведены в табл. 5. Испытуемые образцы удовлетворяют предъявляемым нормам.

Таблица 4. Изменение коэффициента теплопроводности VIP-панелей

Образец	$Q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$\Delta$ , мм	$m$ , г	$\lambda$ , Вт/(м·°С)
<i>Показания от 05.2016 г.</i>						
1	22	2,1	-13,8	10,7665	60,1	0,014897
2	31	2,9	-27,2	11,29	43,4	0,011628
3	22	5,7	-20,5	11,3	38,06	0,009489
4	24	5,7	-13,3	10,2	48,25	0,012884
5	35	1,4	-24,6	10,06	38,79	0,013542
<i>Показания от 01.2017 г.</i>						
1	32	2,6	-15,7	10,7665	60,11	0,0188
2	43	5,1	-19,4	11,29	43,42	0,019
3	36	2,5	-22,3	11,3	38,12	0,016
4	<i>Произошло развакуумирование панели</i>					
5	36	-2	22,7	10,06	38,8	0,017

Таблица 5. Результаты расчетов термического сопротивления с использованием разного теплоизоляционного материала

Утеплитель-образец	Сопротивление теплопередаче		$R_0^\Phi > R_0^{TP}$
	для наружных стен $R_0^\Phi$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	для кровли $R_0^\Phi$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	
1	4,2	5,1	Удовлетворяет
2	4,7	6,1	»
3	5,5	7,77	»
4	4,51	5,72	»
5	4,42	5,74	»
Газоблок	2,39	1,31	Не удовлетворяет

**Выводы.** 1. Микрокремнезем, полученный из наноструктурированного диатомита, можно использовать в качестве наполнителя для производства качественных вакуумных теплоизоляционных панелей.

2. Технические характеристики полученных VIP-панелей не уступают зарубежным аналогам.

3. Вакуумные теплоизоляционные панели из модифицированного диатомита можно использовать в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селяев В.П., Неверов В.А., Осипов А.К. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 220 с.
2. Heinemann U., Caps R., Fricke J. Characterization and optimization of filler materials for vacuum super insulations // Vuoto scienza e tecnologia. 1999. Vol. 18, No. 12. P. 43–46.

3. Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И., Маштаев О.Г. Природные и искусственные микрокремнеземы в качестве наполнителей вакуумных изоляционных панелей // Строит. материалы. 2014. № 9. С. 1–7.
4. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Киселев Н.Н., Селяев П.В. Оптимизация состава наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели на основе пирогенного микрокремнезема // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 5. С. 36–42.
5. Васильев Л.Л. Теплопроводность неметаллических зернистых систем // Строительная теплофизика. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 48–56.
6. Caps R., Friske J. Konzepte für den Einsatz, von evakuirten Dämmungen bei Passivhäusern. 4 Passivhaus Tagung, Kassel, Marz 2000. S.171–177.
7. Данилевский Л.Н. Вакуумная теплоизоляция и перспективы использования в строительстве // Архитектура и строительство. 2006. № 5. С. 114–117.
8. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 132 с.
9. Дульнев Г.Н., Сигалова Г.В. Теплопроводность моно-полидисперсных зернистых материалов // Строительная теплофизика. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 40–47.
10. Пат. 2526454 Российская Федерация, МПК С01 В33/18. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема / В.П. Селяев, А.К. Осипов, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина; Заявитель и патентообладатель Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. № 2013104054/05; заявл. 30.01.13; опубл. 20.08.14, Бюл. № 23.

**Селяев Владимир Павлович**, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: ntorm80@mail.ru.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Куприяшкина Людмила Ивановна**, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

**Киселев Николай Николаевич**, асп.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 26.09.18

**Selyaev Vladimir Pavlovich**, Academician of RAASN, DSc, Professor;

E-mail: ntorm80@mail.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna**, PhD, Professor;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kiselev Nikolai Nikolaevich**, Post-graduate Student

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

## **CLIMATIC DURABILITY OF VACUUM PANELS**

The comparative analysis of technical characteristics of VIP-panels is given. The influence of different types of fillers on the change in the thermal conductivity of the studied thermal insulation materials is shown. The chemical and granulometric composition and topography of the surface of amorphous microsilica particles are compared. The influence of climatic parameters: temperature, humidity, pressure and solar radiation on the change of heat transfer resistance of vacuum panels is considered. The possibilities of using the

obtained panels as a thermal insulation material in the enclosing structures of residential buildings are shown.

**Key words:** vacuum panel, filler, heat transfer, durability, climatic tests, thermal conductivity, microsilica, heat insulation material.

#### REFERENCES

1. Selyaev V.P., Neverov V.A., Osipov A.K. Teploizolyatsionnye materialy i izdeliya na osnove vakuumirovannykh dispersnykh poroshkov mikrokremnezema i diatomita [Thermal insulation materials and products based on vacuumed dispersed powders of microsilica and diatomite]. Saransk, 2013. 220 p. (in Russian)
2. Heinemann U., Caps R., Fricke J. Characterization and optimization of filler materials for vacuum super insulations. *Vuoto scienza e tecnologia*. 1999. Vol. 18, No. 12. Pp. 43–46.
3. Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I., Mashtayev O.G. Prirodnye i iskusstvennye mikrokremnezemy v kachestve napolniteley vakuumnykh izolyatsionnykh paneley [Natural and artificial microsilica as fillers of vacuum insulation panels]. *Stroitel'nye materialy* [Building material]. 2014. No. 9. Pp. 1–7. (in Russian)
4. Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Kiselev N.N., Selyaev P.V. Optimizatsiya sostava napolnitelya vakuumnoy teploizolyatsionnoy paneli na osnove pirogenogo mikrokremnezema [Optimization of the composition of the filler of a vacuum insulation panel based on pyrogenic microsilica]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 5. Pp. 36–42. (in Russian)
5. Vasil'ev L.L. Teploprovodnost' nemetallicheskiykh zernistykh sistem [The thermal conductivity of non-metallic granular systems]. *Stroitel'naya teplofizika* [Construction Thermophysics]. Moscow, Leningrad, 1966. Pp. 48–56. (in Russian)
6. Caps R., Fricke J. Konzepte für den Einsatz, von evakuirten Dämmungen bei Passivhäusern. 4 Passivhaus Tagung, Kassel, März 2000. Pp. 171–177.
7. Danilevskiy L.N. Vakuumnaya teploizolyatsiya i perspektivy ispol'zovaniya v stroitel'stve [Vacuum insulation and prospects for use in construction]. *Arkhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and Construction]. 2006. No. 5. Pp. 114–117. (in Russian)
8. Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad, 1974. 132 p. (in Russian)
9. Dul'nev G.N., Sigalova G.V. Teploprovodnost' mono-polidispersnykh zernistykh materialov [Thermal conductivity can be-polydisperse granular materials]. *Stroitel'naya teplofizika* [Construction Thermophysics]. Moscow, Leningrad, 1966. Pp. 40–47. (in Russian)
10. Pat. 2526454 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S01 V33/18. Sposob polucheniya tonkodispersnogo amorfnogo mikrokremnezema [A method of producing finely dispersed amorphous microsilica]. V.P. Selyaev, A.K. Osipov, A.A. Sedova, L.I. Kupriyashkina; Zayavitel' i patentoobladatel' Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogaryova. № 2013104054/05; zayavl. 30.01.13; opubl. 20.08.14. Bull. No. 23. (in Russian)