

СЕЛЯЕВ В. П., НЕВЕРОВ В. А., МАШТАЕВ О. Г., КИСЕЛЕВ Н. Н.
ВАКУУМНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИАТОМИТА

Аннотация. Проведен сравнительный анализ порошка аморфного микрокремнезема, полученного из Атемарского диатомита, с порошком-наполнителем зарубежного производства. Изготовлены опытные образцы вакуумных изоляционных панелей и измерена их эффективная теплопроводность. Показана возможность производства вакуумных изоляционных панелей из местного минерального сырья.

Ключевые слова: вакуумная изоляционная панель, аморфный микрокремнезем, диатомит.

SELYAEV V. P., NEVEROV V. A., MASHTAEV O. G., KISELEV N. N.
VACUUM INSULATED PANELS BASED ON MODIFIED DIATOMITE

Abstract. The article presents the results of a comparative analytical test of the amorphous silica fume powder based on Atemar diatomite and a foreign filling powder. In this connection, vacuum isolation panel test samples have been produced, their heat transmittance measured. The study has proved the possibility to use local minerals for vacuum insulated panel production.

Keywords: vacuum insulated panel, amorphous silica fume, diatomite.

Повышение энергоэффективности зданий в последние десятилетия стало одним из основных направлений развития строительной индустрии. В Западной Европе начало разработок по улучшению теплозащиты эксплуатируемых зданий явилось следствием энергетического кризиса 1970-х годов, и с 1976 года в большинстве передовых стран нормируемые величины теплозащиты конструкций увеличились в 2–3,5 раза. В настоящее время требования к используемым теплоизоляционным материалам продолжают постоянно повышаться, ужесточаются нормативы теплопроницаемости и смежных параметров как отдельных строительных конструкций, так и зданий в целом.

Концепция энергосберегающего дома с заметным запозданием, но все же находит признание и в России. До недавнего времени дешевизна энергоносителей в нашей стране не позволяла ощутить максимальный экономический эффект от использования современных теплосберегающих материалов и соответствующих технологических решений. Но поскольку Россия взяла курс на построение эффективной экономики, то, согласно программе долгосрочного развития, особое внимание должно уделяться инновационным разработкам эффективных энергосберегающих систем для различных областей промышленности, строительства, ЖКХ и т.д. В Российской Федерации был принят закон «Об

энергосбережении и повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009 №261-ФЗ (ред. от 25.12.2012). Цель закона – создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышение энергетической эффективности.

Для развития концепции энергосберегающего дома необходимо учитывать практический опыт эксплуатации различных зданий. Очевидно, что энергоэффективность определяется совокупностью многих факторов. Данные технического мониторинга показывают, что при эксплуатации жилых зданий потери тепла распределяются следующим образом: через стены теряется до 40% тепла, через окна – 18%, подвал – 10%, крышу – 18%, вентиляцию – 14%. Из этого следует, что недостаточное термическое сопротивление ограждающих конструкций наиболее существенно влияет на энергоэффективность здания. Поэтому, используя качественное утепление стен можно значительно уменьшить теплопотери.

Теплоизоляция ограждающих конструкций здания позволяет повысить экономию топливных и энергетических ресурсов, сокращение эксплуатационных расходов, обеспечить необходимый уровень комфорта и звукоизоляции.

Строительство энергоэффективных энергосберегающих домов предполагает применение новых конструктивных решений, технологий, материалов для теплозащиты. В России необходимо значительно увеличить объемы производства теплоизоляционных материалов, расширить их ассортимент, улучшить качество и повысить долговечность. Особое внимание следует уделить разработке материалов нового поколения.

В последние годы страны Западной Европы охотно продают нашей стране технологии по производству теплоизоляции на основе пенополистирола. Существует множество причин такой «доброжелательности» европейских производителей. Но главное в том, что время теплоизоляции на основе синтетических материалов заканчивается. Они дешевле, легче, теплее, но они горят, выделяют вредные газы, подвержены биодegradации, нарушают экологию жизненного пространства. Поэтому на Западе все больше внимания обращают на теплоизоляцию из природных минеральных материалов. В настоящее время активно ведутся разработки по созданию эффективной теплоизоляции нового поколения на основе минеральных порошков, вакуумированных в специальные пакеты. Германия и США уже разработали, производят и применяют в строительной отрасли вакуумные теплоизоляционные панели (Vacuum Insulation Panel – VIP), имеющие коэффициент теплопроводности в диапазоне $0,002 \div 0,02$ Вт/(м·К), который на порядок ниже, чем у пенополистирола и пенополиуретана.

В России работа по созданию подобных теплоизоляционных материалов и обоснованию физических принципов данного типа теплоизоляции проводилась в 60-х годах прошлого века сотрудниками кафедры теплофизики Ленинградского института точной механики и оптики под руководством Г. Н. Дульнева [1; 2]. Длительное время порошковая теплоизоляция с вакуумированием применялась преимущественно в криогенной технике. Однако из-за высокой стоимости материалов и ряда других причин в строительной отрасли эти разработки применение не нашли.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями было установлено, что при создании вакуумных теплоизоляционных панелей необходимо обеспечить условия глубокого вакуума в замкнутом воздухонепроницаемом пространстве. Обеспечить высокую степень вакуума в замкнутых панелях-оболочках технически трудно. Проблема решается проще и надежнее, если оболочку из воздухонепроницаемой пленки наполнить пористым материалом из дисперсных зерен и волокон. Теоретически показано, что при размере пор порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$ м кинетический механизм передачи тепла практически исключается при давлении 100 Па.

Принципы создания теплоизоляции с вакуумированием порошковых материалов базируются на глубоком понимании физических процессов переноса тепла. Механизмы переноса тепла в зернистых системах реализуются в трех разновидностях – кондуктивный перенос, конвективный перенос и излучение. Вакуумная технология позволяет исключить все три механизма передачи тепла.

Показано [2], что теплопроводность газов практически не зависит от давления до тех пор, пока длина свободного пробега молекулы газа не становится сравнимой с размерами полости, в которой находится газ. Это обстоятельство требует создания глубокого вакуума для существенного снижения теплопроводности прослойки между разделяемыми средами, как, например, в [3; 4], но в то же время, данное свойство послужило основой для применения мелкопористых материалов в качестве теплоизоляции.

Использование мелкодисперсных пористых материалов позволяет решить задачу создания утеплителей с чрезвычайно малым значением коэффициента теплопроводности при гораздо менее жестких требованиях к конструкции теплоизоляционной системы и степени разрежения воздуха.

Технология производства вакуумных теплоизоляционных панелей включает в себя следующие операции:

- дозировка компонентов – тонкодисперсных порошков, волокон, сорбентов, поглотителей магнитных излучений;
- перемешивание компонентов в специальных смесителях;

- укладка смеси в формы;
- уплотнение (подпрессовка) уложенной смеси с целью придания изделию заданной формы и определенных размеров;
- высокотемпературная обработка изделия с целью удаления излишней влаги;
- упаковка изделия в оболочку с заданными размерами и формой;
- вакуумирование и запайка торцов оболочки.

Особая роль в технологии производства вакуумных теплоизоляционных панелей отводится наполнителям, которые в данном случае являются многофункциональными и поликомпонентными. Исходя из функциональных требований, наполнитель должен обеспечивать стабильные теплозащитные свойства VIP на весь нормативный или расчетный срок эксплуатации. Для этого, согласно экспериментальным данным, наполнитель должен иметь следующие характеристики: пористость наполнителя в состоянии свободной засыпки должна быть выше 92%; крупность частиц меньше 0,2 мм с высокой степенью однородности; координационное число должно находиться в пределах 2÷4, фрактальная размерность неоднородностей поверхности зерен наполнителя – в пределах 2.4-2.7; элементный состав более чем на 90% должен состоять из оксидов кремния. В то же время многокомпонентный наполнитель должен: обеспечивать заданную форму при изготовлении и в процессе эксплуатации; воспринимать значительные внешнее давление; обеспечивать возможность управления созданием многоуровневой поровой структуры наноразмерного уровня.

При формировании сердцевины VIP-панели частицы зернистой системы, взаимодействуя между собой, образуют кластеры с поровой структурой второго порядка (поры самих частиц образуют поровую структуру первого порядка), которая зависит от типа укладки частиц. Ее пористость может находиться в пределах 0,26...0,47 в зависимости от способа упаковки частиц (тетраэдрическая...кубическая). Поровая структура третьего уровня, состоящая из крупных пустот, формируется при образовании каркаса из кластеров и частиц. Сеть пустот, пронизывающих каркас зернистой системы создает поровую структуру четвертого порядка. Такая полиструктурная модель зернистой системы может быть реализована, если составляющие ее частицы имеют собственную пористую структуру и размеры менее 0,2 мм.

В проведенных исследованиях рассматривалась возможность применения при производстве вакуумных теплоизоляционных панелей порошка аморфного микрокремнезема, полученного из Атемарского диатомита. Для сравнения в качестве прототипа был выбран микрокремнезем, который применен в качестве наполнителя при изготовлении панелей типа FRONT-VIP компании VACU-ISOTEC KG (Германия).

Сравнительный анализ полученных структурных характеристик аморфного микрокремнезема с аналогичными параметрами тонкодисперсного порошка FRONT-VIP приведен в таблицах 1, 2.

Элементный состав аморфного микрокремнезема и порошка FRONT-VIP был определен методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра ARL Perform`X 4200. Результаты анализа (в пересчете на оксиды), приведенные в табл. 1, дают возможность сделать вывод о том, что аморфный микрокремнезем сходен по своему химическому составу с порошком FRONT-VIP, а достаточно высокое содержание диоксида кремния в нем позволяет рассматривать этот материал как полидисперсную зернистую систему, в целом пригодную для промышленного производства теплоизоляционных материалов.

Таблица 1

Состав аморфного микрокремнезема и порошка FRONT-VIP

	Соединение								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cl	NiO
Аморфный микрокремнезем	97,82	0,46	0,16	0,50	0,03	0,31	-	-	-
FRONT-VIP	99,77	-	0,09	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01

Для детального изучения гранулометрического состава исследуемых дисперсных систем применялся анализатор размеров частиц «Shimadzu SALD-3101», который предназначен для измерения размеров частиц в диапазоне 50 нм...3000 мкм методом лазерного дифракционного анализа с ультразвуковым диспергированием. Значения интервалов крупности частиц аморфного микрокремнезема и порошка FRONT-VIP представлены в табл. 2.

Таблица 2

Гранулометрический состав дисперсных систем

	Крупность, нм	Крупность, мкм
Аморфный микрокремнезем	330 – 450	2 – 640
FRONT-VIP	290 – 1000	2 – 64

Анализ этих данных показывает, что исследуемые порошки представляют собой полидисперсные системы и содержат в своем составе частицы, крупность которых лежит в двух интервалах – нано- и микрометровых масштабов. Следует отметить, что размеры частиц аморфного микрокремнезема имеют максимальное значение ≥ 100 мкм, тогда как это значение крупности тонкодисперсного наполнителя промышленной вакуумной изоляционной панели ~ 60 мкм, что, по-видимому, существенно понижает его эффективную теплопроводность за счет уменьшения площади контакта и достижения оптимального координационного числа частиц, а также пористости всей полиструктурной системы.

Изучение сорбционных свойств поверхности частиц, входящих в состав аморфного микрокремнезема и порошка FRONT-VIP, проводилось методом инфракрасной спектроскопии, который дает возможность регистрировать спектральные линии поглощения, возникающие в результате колебательного и вращательного движения молекул. ИК-спектры поглощения дисперсных порошков получены с применением инфракрасного Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-02» в диапазоне волновых чисел 450 – 4000 см⁻¹. Все спектры аморфного микрокремнезема и порошка FRONT-VIP имеют характерный для диоксида кремния вид.

Проведенные комплексные исследования структурных характеристик аморфного микрокремнезема из Атемарского диатомита позволяют сделать следующие выводы:

- аморфный микрокремнезем имеет сходный элементный состав с порошком FRONT-VIP;
- по гранулометрическому составу аморфный микрокремнезем близок к порошку-наполнителю вакуумной изоляционной панели FRONT-VIP;
- применение метода инфракрасной спектроскопии позволило установить, что в поровой системе частиц аморфного микрокремнезема адсорбируются молекулы воды, которые могут служить причиной его относительно высокой теплопроводности;
- для того, чтобы использовать аморфный микрокремнезем в качестве наполнителя сердцевины вакуумной изоляционной панели необходима его модификация: прокаливание при температуре, обеспечивающей дегидратацию порового пространства микро- и наноуровня.
- диатомит Атемарского месторождения Республики Мордовия можно считать подходящим сырьем для производства порошка-наполнителя вакуумных изоляционных панелей.

Вторым компонентом наполнителя, который применяется в количестве 2÷10% по массе, и служит для создания пространственного каркаса VIP, являются волокна. Рассмотрена возможность применения для изготовления VIP стеклянных, шлаковых, базальтовых, асбестовых волокон. Известны случаи применения волокон органического происхождения. Очевидно, что формование изделия и его свойства будут зависеть от длины, диаметра волокон, состояния их поверхности.

В качестве упаковочного материала в вакуумных теплоизоляционных панелях используются многослойные ламинированные пленки, к которым в зависимости от условий эксплуатации предъявляются самые разные требования: механическая прочность на разрыв, прокол, истираемость, химическая стойкость, выдерживание низких и высоких температур, свариваемость, непроницаемость к газам, антистатичность и т.д.

На основе аморфного микрокремнезема, полученного из Атемарского диатомита, были разработаны составы и технология изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей.

Панели состоят из минерального наполнителя и воздухонепроницаемой оболочки, торцы которой запаиваются после создания вакуума заданного уровня с применением специальной вакуум-упаковочной машины типа «Henkelman Polar 52П».

Наполнитель формируется из аморфного микрокремнезема, минерального волокна и специальных добавок. Компоненты дозируются в определенной пропорции, перемешиваются и затем из полученной волокнисто-дисперсной системы формируется плита заданных размеров. После этого плита помещается в оболочку и отправляется для вакуумирования и запайки в вакуум-упаковочную машину.

В экспериментальных исследованиях состав наполнителя подбирался в соответствии с планом Коно. После изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей были проведены испытания на теплопроводность. Определение коэффициента теплопроводности вакуумированных панелей выполнялись на лабораторной установке методом измерения плотности теплового потока.

Измерения значений температур и теплового потока выполнялись прибором ИПП-2, который предназначен для определения плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий и сооружений.

Установлено, что теплопроводность вакуумных теплоизоляционных панелей экспериментальных составов изменяется в пределах от 0,02 до 0,027 Вт/м[°]К, что сопоставимо с теплопроводностью панели-аналога FRONT-VIP ($\lambda=0,018\div 0,022$ Вт/м[°]К).

Проведенные исследования позволили создать и запатентовать теплоизоляционные панели двух видов [5, 6], которые по своим качествам и защитным свойствам не уступают зарубежным аналогам.

Таким образом, был проведен сравнительный анализ свойств аморфного микрокремнезема из диатомита Атемарского месторождения Республики Мордовия с порошком-наполнителем панелей FRONT-VIP. Сравнение химического, элементного, гранулометрического состава показало, что незначительная модификация частиц природного диатомита позволяет получить материал, пригодный для изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей. Теплопроводность VIP на диатомитовой основе можно варьировать в пределах от 0,02 до 0,002 Вт/(м·К). Этот новый уникальный материал позволит заменить теплозащитные материалы на полимерной основе: пенополистирол, пенополиуретан и другие пенопласты.

Для широкого внедрения VIP в практику необходимо: оптимизировать состав наполнителя, волокон, адсорбера, рассеивателей лучистой энергии; исследовать влияние влажности, температуры, атмосферного давления окружающей среды на долговечность VIP. Найти конструктивные решения VIP, позволяющие сопротивляться механическим нагрузкам, и обеспечивающие стабильность свойств на нормативный или расчетный срок эксплуатации.

Вакуумные теплоизоляционные панели могут найти применение не только в строительной отрасли, но и в машино-, авио-, судо-, ракето-, вагоностроении, в криогенной технике при изготовлении бытовых и промышленных холодильников, морозильных камер и установок.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Васильев Л. Л. Теплопроводность неметаллических зернистых систем // Строительная теплофизика. – М.; Л.: Энергия, 1966. – С. 48-56.
2. Дульнев Г. Н., Сигалова Г. В. Теплопроводность моно- и полидисперсных зернистых материалов // Строительная теплофизика. – М.; Л.: Энергия, 1966. – С. 40-47.
3. Вакуумное теплоизоляционное изделие: патент РФ 2144595 / М. Н. Кокоев, В. Т. Федеров. Бюл. № 220.01.2000.
4. Криогенные системы / А. М. Архаров, В. П. Беляков, Е. И. Микулин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 536 с.
5. Пат. 99041 РФ МПК³ Е 04 F 13/077. Стеновая многослойная панель / Селяев В. П., Травуш В. И., Осипов А. К., Маштаев О. Г.; патентообладатель Гос. образоват. учреждение высшего проф. образования «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева». – № 2010120159/03; заявл. 19.05.10; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31.
6. Пат. 98021 РФ МПК³ Е 04 С 2/02. Теплоизоляционная панель / Селяев В. П., Травуш В. И., Осипов А. К., Селяев П. В., Гладышев А. С.; патентообладатель Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева». – № 2010117836/03; заявл. 04.05.10; опубл. 27.09.10, Бюл. № 30.