

В. П. СЕЛЯЕВ
Н. Н. КИСЕЛЕВ
О. В. ЛИЯСКИН

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ СЖАТИИ

DIAGRAMS OF VACUUM INSULATING PANEL DEFORMATION DURING COMPRESSION

Рассмотрена возможность применения вакуумных изоляционных панелей (VIP) с зернистым наполнителем для изготовления трёхслойных ограждающих стеновых панелей, плит перекрытия и покрытия. Показаны результаты экспериментальных исследований вакуумных изоляционных панелей, проведенных с целью аналитического описания диаграмм деформирования VIP панелей при действии сжимающей нагрузки. Установлено: деформативные свойства вакуумных изоляционных панелей с зернистым наполнителем не зависят от крупности частиц наполнителя, но зависят от объёмного содержания наполнителя; диаграмму деформирования, описывающую зависимость между напряжениями и относительными деформациями при сжатии вакуумной изоляционной панели с зернистым наполнителем, можно аппроксимировать функцией Г.Б. Бюльфингера. Полученные результаты дают возможность расчетным путём определить напряженное состояние в плоских листах обшивки при местной передаче нагрузки.

Ключевые слова: теплоизоляция, панель, вакуум, зернистый наполнитель, диаграмма деформирования, сжатие, напряжение, деформация

Решение проблемы энергосбережения при строительстве зданий и сооружений зависит от доступности и качества высокоэффективных теплоизоляционных материалов и изделий [1, 2]. В последние годы интенсивно ведутся поиски и разработки новых теплоизоляционных материалов и изделий, альтернативных традиционно применяемым: минеральной вате, пенополистиролу, пенополиуретану, которые не отвечают современным требованиям по экологии, долговечности, огнестойкости [3, 4].

Анализ публикационной активности по этой теме показывает, что все большее внимание учёных и практиков привлекают исследования, направленные на создание теплоизоляционных изделий типа VIP – вакуумных изоляционных панелей [5–8]. Панели VIP представляют собой плоские элементы, выполненные из многослойной воздухонепроницаемой

The possibility of using vacuum insulation panels (VIP) with a granular filler for the manufacture of three-layer enclosing wall panels, floor slabs and coatings is considered. The results of experimental studies of vacuum insulation panels, carried out with the aim of analytically describing the deformation diagrams of VIP panels under the action of a compressive load, are presented. It has been established: deformative properties of vacuum insulation panels with granular filler do not depend on the size of the filler particles, but depend on the volume content of the filler; a deformation diagram describing the relationship between stresses and relative deformations during compression of a vacuum insulating panel with a granular filler can be approximated by the function G. B. Bülfinger. The results obtained make it possible by calculation to determine the stress state in flat plating sheets during local load transfer.

Keywords: thermal insulation, panel, vacuum, granular filler, deformation diagram, compression, stress, deformation

оболочки, наполненной зернистым и волокнистым наполнителем. В качестве зернистого наполнителя применяется аморфный микрокремнезем, представленный минералом опал, поровая структура которого формируется в виде иерархически выстроенной масштаб-но-инвариантной системы из отдельных глобулярных частиц, отдельных и ассоциативных кластеров. Квазиопаловая структура зернистой системы обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства [2, 9]. Для поддержания формы изделия VIP при вакуумировании вводится волокнистый минеральный наполнитель. Сопротивление теплопередаче вакуумной панели в пять-десять раз выше, чем у традиционных утеплителей, что подтверждено теоретически и экспериментально [1, 10].

Изделие VIP можно применять для изготовления трёхслойных плит покрытий и пере-

крытий, ограждающих конструкций. Панели для стен и покрытий (перекрытий) зданий состоят из двух наружных обшивок из прочного листового материала и среднего слоя – утеплителя [2]. Для внешней обшивки можно применять плоские или профилированные листы из алюминия, стекла, латонита. Для внутренних обшивок можно применять листовые материалы не только из металла и стекла, но и из древесины, высокопрочного бетона и других конструкционных материалов. Для обеспечения прочности и жесткости трехслойные панели рассчитывают по двум предельным состояниям: прочности и деформативности. При расчете на поперечный изгиб трёхслойные панели рассматриваются как плиты, свободно опертые по двум сторонам или опертые по контуру. При расчете трёхслойных панелей необходимо соблюдение условий:

$$E_{np}/G \leq 10000; 200 \geq h_0/\delta \geq 4; l/h_0 \geq 10, \quad (1)$$

где E_{np} – приведенный модуль упругости материала обшивок, равный $E_{np} = E/(1-\mu)$; E и μ – модули Юнга и Пуассона материала обшивок; h_0 – высота среднего (теплоизоляционного) слоя; G – модуль сдвига среднего слоя; δ – толщина обшивки; l – пролет панели; $h = h_0 + \delta$ – высота поперечного сечения панели с листовыми внешними обшивками.

При определении напряжений от местной нагрузки в верхнем слое обшивки и в среднем слое, обшивка рассматривается как бесконечная пластина на упругом основании (роль упругого основания играет средний слой) с коэффициентом постели $K = 2E_1/h_0$, где E_1 – модуль упругости теплоизоляционного материала ($E_1 = E_k$).

Следовательно, для расчета трёхслойных панелей с утеплителем VIP необходимо знать механические характеристики изделия VIP (E_1 и G).

Целью предлагаемой работы является экспериментальное определение модуля упругости (Юнга) E_1 и аналитическое описание диаграммы деформирования при сжатии изделия VIP (среднего слоя трёхслойной плиты).

Для экспериментального определения модуля упругости были изготовлены вакуумные панели размером 100x100x10 мм. В качестве наполнителя применяли белую сажу марки БС-100, диатомит Атемарского карьера, базальтовые волокна. Оболочка образцов выполнялась из двухслойного пластика (PET/PE; PA/PE). Плотность образцов составляла 170 и 260 кг/м³ соответственно, наполнитель – микрокремнезем и диатомит.

Для сравнения произведены аналогичные испытания изделия VIP китайского производства в металлизированной оболочке.

При проведении эксперимента ставилась задача оценить влияние количества наполнителя и волокна на механические характеристики вакуумных изоляционных панелей. Для этого был реализован двухфакторный эксперимент по плану Кифера–Коно, который позволил получить полиномиальную модель зависимости уровня напряжений (y_i) при 10 % деформации от количества порошка (x_1) и волокна (x_2) вида:

$$y_1 = 0,236 + 0,037x_1 + 0,015x_2 - 0,013x_1^2 - 0,003x_1x_2 - 0,018x_2^2, \quad (2)$$

$$y_2 = 0,224 + 0,032x_1 + 0,09x_2 - 0,004x_1^2 - 0,019x_1x_2 - 0,047x_2^2. \quad (3)$$

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 1, 2.

Из анализа уравнений (2), (3) и графических зависимостей (см. рис. 1, 2) следует, что крупность частиц микрокремнезема БС-100 (нанометровая размерность) и диатомита (микрометровая размерность) практически не влияет на уровень напряжений сжатия при 10 % относительной деформации.

Диаграммы деформирования имеют вид, характерный для самоуплотняющихся материалов (рис. 3–5).

На рисунках представлены диаграммы деформирования, полученные при сжатии вакуумных панелей: рис. 3 – китайский аналог; рис. 4 – зернистый наполнитель диатомит; рис. 5 – зернистый наполнитель микрокремнезем БС-100.

Для аналитического описания диаграммы деформирования VIP изделия при сжатии наиболее приемлемой является функция Г.Б. Бюльфингера в относительных координатах вида:

$$\sigma/\sigma_u = \alpha(\varepsilon/\varepsilon_u)^\beta, \quad (4)$$

где σ_u – предельно допустимое значение напряжений; ε – относительная деформация, соответствующая σ_u ; α и β – коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Для этого произведем путем логарифмирования линеаризацию уравнения (4) и тогда β определим по формуле

$$\beta = (\ln(\sigma_1/\sigma_u) - \ln(\sigma_2/\sigma_u)) / (\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_u) - \ln(\varepsilon_2/\varepsilon_u)). \quad (5)$$

На рис. 6 в двойных логарифмических координатах построены графики зависимости σ - ε по экспериментальным данным, представленным на рис. 5 (принято $\sigma_u = 5$ МПа). Значения $\ln(\sigma/\sigma_u) - \ln(\varepsilon/\varepsilon_u)$ хорошо ложатся на прямые линии, которые сходятся в начале координат.

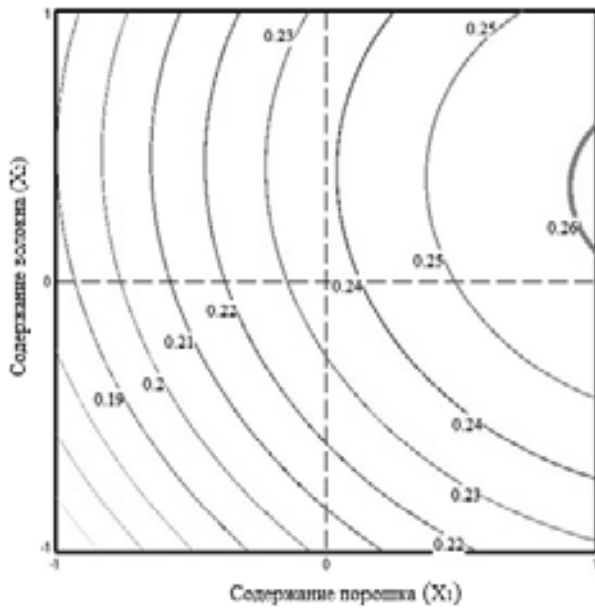


Рис. 1. Графическая зависимость напряжения (y_1) при $\epsilon = 10\%$ от количества наполнителя: x_1 – белая сажа; x_2 – минеральное волокно

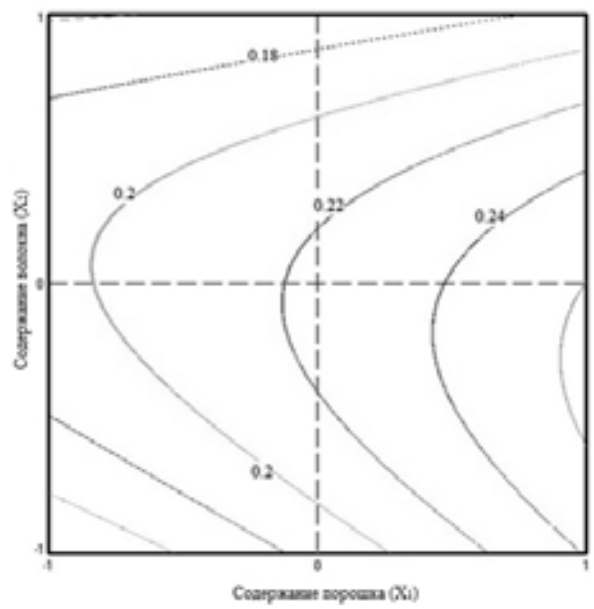


Рис. 2. Графическая зависимость напряжения (y_2) при $\epsilon = 10\%$ от количества наполнителя: x_1 – немодифицированный атемарский диатомит; x_2 – минеральное волокно

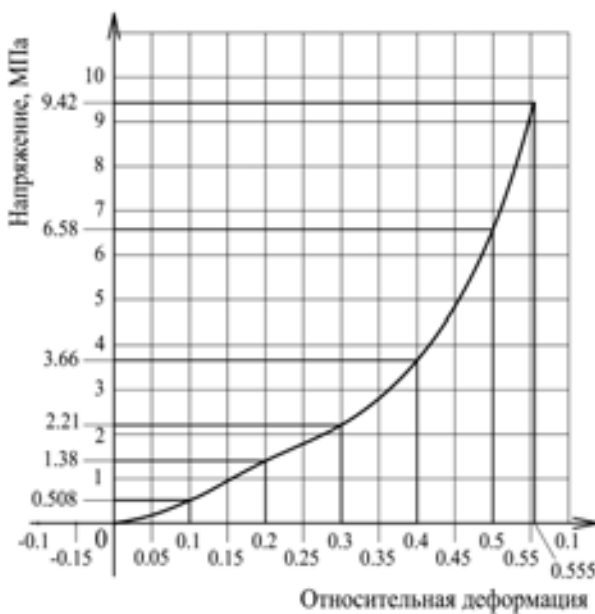


Рис. 3. Диаграмма, полученная при испытании китайского образца вакуумной теплоизоляции

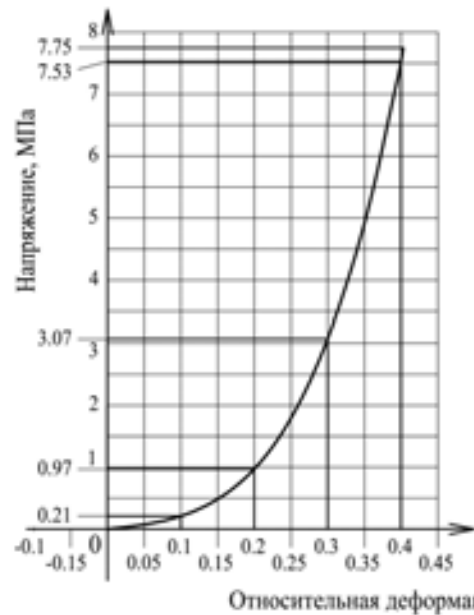


Рис. 4. Диаграмма, полученная при испытании вакуумной теплоизоляции на основе диатомита

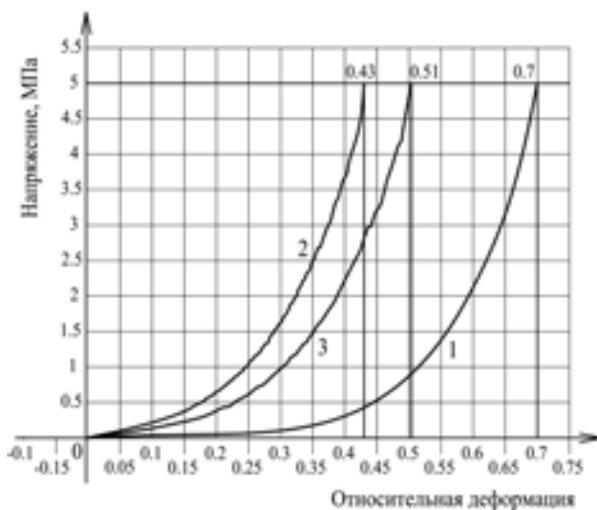


Рис. 5. Диаграммы деформирования при сжатии панели VIP с зернистым наполнителем БС-100: 1, 2, 3 – содержание наполнителя в частях – относительных единицах (по возрастанию)

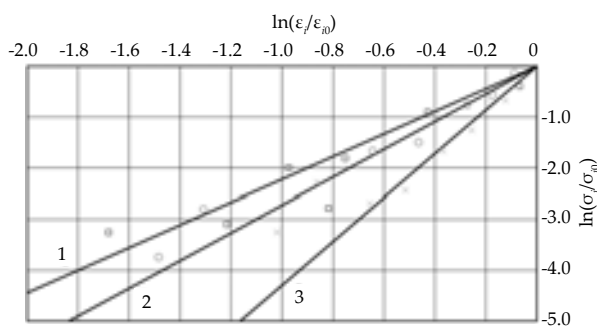


Рис. 6. Линеаризация экспериментальных данных, представленных на рис. 5

Следовательно, коэффициент $\alpha = 1$. По формуле (5) определены значения коэффициентов β , которые составляют $\beta_1 = 5,25$; $\beta_2 = 2,3$; $\beta_3 = 3,2$.

С учетом полученных экспериментальных данных модуль упругости теплоизоляционного материала зависит от количества зернистого наполнителя в панели VIP и от уровня сжимающих напряжений. Зависимость модуля упругости зернистой системы VIP предлагается определять по формуле вида:

$$E_1 = \partial\sigma/\partial\varepsilon = \sigma_u \beta_i (\varepsilon^{\beta_i-1}/\varepsilon_u^{\beta_i}), \quad (6)$$

где $\beta_i = 5,25(1); 2,3(2); 3,2(3)$.

Выводы. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено: деформативные свойства вакуумных изоляционных панелей с зернистым наполнителем не зависят от крупности частиц наполнителя, но зависят от объемного содержания наполнителя. Диаграмму деформирования, описы-

вающую зависимость между напряжениями и относительными деформациями при сжатии вакуумной изоляционной панели с зернистым наполнителем, можно аппроксимировать функцией Г.Б. Бюльфингера.

Полученные результаты дают возможность расчетным путём определить напряженное состояние в плоских листах обшивки при местной передаче нагрузки.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ № 18-48-130001/18 «Оптимизационное моделирование свойств теплоизоляционных функционально-градиентных изделий на основе минеральных порошков оксида кремния, синтезированного из природного диатомита».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дульнев Г.Н., Сигалова Г.В. Теплопроводность моно- и полидисперсных зернистых материалов // Строительная теплофизика. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 40–47.
2. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперстных порошков микрокремнезема и диатомита : монография / В.П. Селяев, В.А. Неверов, А.К. Осипов [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 220 с.
3. Возможность создания теплоизоляционных материалов на основе наноструктурированного микрокремнезема из диатомита / В.П. Селяев, А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина, А.А. Седова, Е.Л. Кечуткина, Л.А. Супонина // Наука: 21 век. 2011. № 3(15). С. 76–86.
4. Селяев П.В., Киселев Н.Н., Лияскин О.В. Принципы создания порошковой теплоизоляции на основе микрокремнезема // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 3 (28). С. 55–59.
5. Bofago F.E. & al, Structure of vacuum insulation panel in building system // 11th International Vacuum Insulation Symposium, Switzerland, 2013, pp. 69–70.
6. Страница Vacuum-insulated prefabricated elements in construction 09/2007: BINE Information Service. – <http://www.bine.info> (дата обращения: 01.04.2019).
7. Schupp H.B. & al, VIP im Mauerwerksbau Vakuumgedämmter Mauerstein Vakuumgedämmter Mauerziegel // VIP – Bau, Fachtagung, Rostock-Warnemünde, 10–11. Juli 2003.
8. Возможность применения хлопкового волокна для производства вакуумных теплоизоляционных панелей / В.П. Селяев, А.М. Данилов, П.В. Селяев, Н.Н. Киселев, О.Г. Маштаев, Е.Л. Кечуткина // Технология текстильной промышленности. 2017. № 1. С. 112–118.
9. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей / В.П. Селяев, В.А. Неверов, О.Г. Маштаев, А.В. Колотушкин // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7. С. 15–25.

10. Васильев Л.Л. Теплопроводность неметаллических зернистых систем // Строительная теплофизика. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 48–56.

REFERENCES

1. Dulnev G.N., Sigalova G.V. Thermal conductivity of mono- and polydisperse granular materials. *Stroitel'naya teplofizika* [Building Thermophysics], Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1966, pp. 40–47. (in Russian)

2. Selyaev V.P., Neverov V.A., Osipov A.K. [and other] *Teploizolyatsionnyye materialy i izdeliya na osnove vakuumirovannykh disperstnykh poroshkov mikrokremnezema i diatomita* [Thermal insulation materials and products based on vacuum silica dispersible powders of silica fume and diatomite] Monograph, Saransk, Publisher Mordovia University, 2013. 220 p.

3. Selyaev V.P., Osipov A.K., Kupriyashkina L.I., Sedova A.A., Kechutkina E.L., Suponina L.A. The possibility of creating heat-insulating materials based on nanostructured silica fume from diatomite. *Nauka: 21 vek* [Science: 21st Century], 2011, no. 3(15), pp. 76–86. (in Russian)

4. Selyaev P.V., Kiselev N.N., Liyaskin O.V. Principles for the creation of powder thermal insulation based on silica fume. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2016, no. 3 (28), pp. 55–59. (in Russian)

5. F.E. Bofago & al, Structure of vacuum insulation panel in building system. 11th International Vacuum Insulation Symposium, Switzerland, 2013, pp. 69–70.

6. Vacuum-insulated prefabricated elements in construction 09/2007: BINE Information Service. Available at: <http://www.bine.info> (accessed 1 April 2019)

7. H.B. Schupp & al, VIP im Mauerwerksbau Vakuumgedämmt Mauer-stein Vakuum Gedämmt Mauerziegel. VIP – Bau, Fachtagung, Rostock-Warnemünde, 10–11. Juli 2003.

8. Selyaev V.P., Danilov A.M., Selyaev P.V., Kiselev N.N., Mashtaev O.G., Kechutkina E.L. Possibility of using cotton fiber for the production of vacuum thermal insulation panels. *Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Textile Technology], 2017, no. 1, pp. 112–118. (in Russian)

9. Selyaev V.P., Neverov V.A., Mashtaev O.G., Kolotushkin A.V. Properties of silica fume from natural diatomite and its application in the manufacture of vacuum thermal insulation panels. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal], 2013, no. 7, pp. 15–25. (in Russian)

10. Vasiliev L.L. Thermal conductivity of non-metallic granular systems. *Stroitel'naya teplofizika* [Building thermophysics], Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1966, pp. 48–56. (in Russian)

Об авторах:

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович

академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций Мордовский государственный университет 430000, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68, тел.: (8342)47-71-56
E-mail: ntorm80@mail.ru

SELYAEV Vladimir P.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Building Structures Chair Ogarev Mordovia State University 443000, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68, tel. (8342)47-71-56
E-mail: ntorm80@mail.ru

КИСЕЛЕВ Николай Николаевич

инженер кафедры строительных конструкций Мордовский государственный университет 430000, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68, E-mail: nicolay1992@mail.ru

KISELEV Nikolay N.

Engineer of the Building Structures Chair Ogarev Mordovia State University 443000, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68, E-mail: nicolay1992@mail.ru

ЛИЯСКИН Олег Викторович

аспирант кафедры строительных конструкций Мордовский государственный университет 430000, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68, E-mail: oliyaskin@mail.ru

LIYASKIN Oleg V.

Postgraduate Student of the Building Structures Chair Ogarev Mordovia State University 443000, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68, E-mail: nicolay1992@mail.ru

Для цитирования: Селяев В.П., Киселев Н.Н., Лияскин О.В. Диаграммы деформирования вакуумных изоляционных панелей при сжатии // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 17–21. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.3.

For citation: Selyaev V.P., Kiselev N.N., Liyaskin O.V. Diagrams of Vacuum Insulating Panel Deformation During Compression // Urban construction and Architecture. 2019. V.9, 3. Pp. 17–21. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.3.