

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ

Е. В. Овчинников, О. С. Анненкова

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

В статье рассматривается моделирование процесса теплопередачи минераловатных плит различной структуры и управление структурой плит.

Ключевые слова: минеральная матрица, кондуктивная составляющая теплопроводности воздуха, формостабильность изделия, коэффициент корреляции, коэффициент конструктивного качества.

На основе анализа методик расчета теплопроводности волокнистого теплоизоляционного материала разработана компьютерная программа расчета результирующей теплопроводности волокнистой плиты, которая складывается из кондуктивной составляющей теплопроводности воздуха в порах, а также кондуктивной и радиационной составляющих теплопроводности минеральной матрицы [4]. При этом принимается, что для волокнистой теплоизоляции, конвективной составляющей теплопередачи можно пренебречь в связи с соизмеримостью эквивалентного размера пор с длиной свободного пробега молекул воздуха [3].

Моделирование процесса теплопередачи с перечисленными допущениями показало, что величины, входящие в результирующую теплопроводность, могут отличаться для плит различной ориентации волокон, следствием чего является изменение расчетной теплопроводности. Зависимость теплопроводности от средней плотности волокнистой плиты разной структуры при различном диаметре минерального волокна приведена на рисунках 1 и 2.

Для плит слоистой структуры (рисунок 1) обеспечение максимального термического сопротивления реализуется при ориентации теплового потока поперек слоев минеральных волокон, эксплуатируемых в условиях стеновой изоляции отапливаемого здания, когда они расположены параллельно друг другу без переплетений и защемлений. Для плит однородной пространственной структуры (рисунок 2) волокна того же состава и диаметра имеют взаимно ортогональное пересечение в пространстве, образуя одинаковые по размеру в трех направлениях эквивалентные поры. Все остальные варианты взаимного расположения минеральных волокон

в теле плиты, могут рассматриваться как частные случаи или комбинации этих двух базовых вариантов моделей.

Как показывают проведенные данные, результирующая теплопроводность волокнистых плит различной структуры отличается друг от друга. Зависимость теплопроводности для плит одной и той же структуры характеризуется увеличением теплопроводности с увеличением средней плотности и диаметра минерального волокна. Это объясняется разной величиной эквивалентного размера пор при различной упаковке волокон.

Однако влияние составляющих теплопроводности носит неоднозначный характер, что иллюстрируется повышением результирующей теплопроводности при уменьшении средней плотности плит ниже определенной для каждого диаметра волокон величины (наличие перегиба кривых на рисунках 1 и 2). Наибольшее влияние в формировании отличий имеет кондуктивная составляющая теплопроводности воздуха, которая для плит горизонтальной структуры меньше за счет более малого эквивалентного размера пор при всех остальных равных условиях.

Это справедливо для теплового потока, направленного строго поперек волокон, для других направлений игнорирование конвекционной составляющей теплопередачи может привести к переоценке величины термического сопротивления материала слоистой структуры.

Для плит любой структуры наличие колебаний плотности теплоизоляционного материала или локальной переориентации волокон в теле плиты сказывается на теплопередаче за счет изменения эквивалентного размера пор. Для плит слоистой структуры направление вектора теплопередачи потока вдоль слоя волокон увеличивает значение

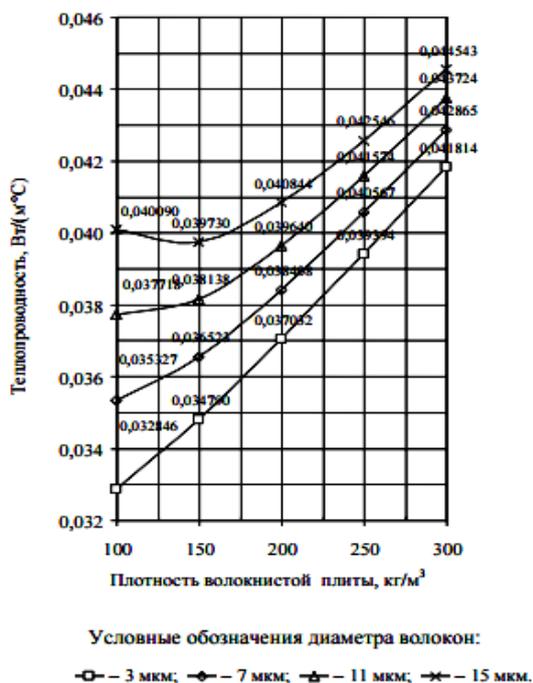


Рисунок 1 – Зависимость теплопроводности от средней плотности волокнистой плиты горизонтально слоистой структуры при различном диаметре волокна

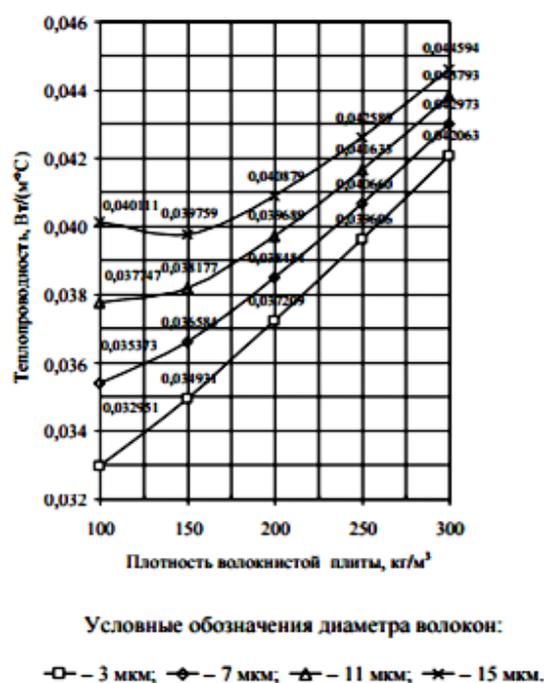


Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности от средней плотности волокнистой плиты однородной структуры при различном диаметре минерального волокна

кондуктивной составляющей теплопроводности воздуха за счет резкого увеличения эквивалентного размера пор. Это должно быть указано в строительной проектной и технологической документации в целях исключения произвольной ориентации утеплителя анизотропной структуры в ограждающих конструкциях.

Управление структурой минераловатных плит в процессе формования минераловатного ковра обеспечивает получение достаточно разнообразных по эксплуатационным свойствам изделий [1].

Конвейерная технология ВНИПИТеплопроекта, характеризующаяся плитами горизонтально слоистой структуры (ГОСТ 9573), обеспечивает получение минераловатной теплоизоляции марки D200 с нормируемой прочностью на сжатие 40 кПа. Технология получения изделий пространственной ориентации, разработанная УралНИИИстромпроектом (ГОСТ 22950), за счет формирования однородной пространственной структуры позволяет получить плиты повышенной жесткости марки D175–D225 со значительно более высокой нормируемой прочностью в 100 кПа, которые известны под товарной маркой «ППЖ-200». Различные технические решения по изготовлению минераловатных матов с

вертикальной слоистостью (ГОСТ 23307), минераловатных изделий гофрированной структуры (ГОСТ 22950), «Флор баттс В», «Руф баттс В» фирмы Rock-wool за счет переориентации волокон при формовании однослойного ковра или слоя волокон в многослойном изделии обеспечивают получение плит марки D180 с прочностью на сжатие до 60 кПа.

Прочность плиты обеспечивается жесткостью волокнистого каркаса и зависит от ориентации волокна по отношению к основному эксплуатационному воздействию, диаметра минерального волокна, величины отрезка волокна между двумя соседними пересечениями волокон, вида закрепления минераловатного волокна в склейке: жесткого (термореактивное связующее), шарнирного (термопластичное связующее) или фрикционного (без связующего – маты минераловатные).

Возможности управления структурой плит с пространственной ориентацией волокон, изготовленных с использованием минеральной ваты типа «В» (ГОСТ 4640) и синтетического термореактивного карбамидного связующего, можно проследить на серии плит, испытанных по стандартным методикам, характеристики которых приведены в таблицах 1, 2.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ

Таблица 1 – Технические характеристики плит (С104–С106)

Плотность средняя, кг/м ³	Прочность на сжатие, кПа	Количество синтетического связующего, процент по массе	Количество минерального волокна, кг на 1 м ³ плит
167,01	86,22	5,93	157,11
167,49	77,44	6,53	156,55
170,35	78,67	6,18	159,83
172,46	84,22	5,85	162,36
174,93	81,11	7,05	162,60
185,54	105,11	6,39	173,69
195,33	134,67	6,22	183,18
197,78	105,67	5,89	186,12
198,64	130,00	6,87	184,99
201,83	119,44	6,29	189,12
205,00	134,22	5,71	193,30
214,78	145,28	6,07	201,74
216,35	148,33	5,86	203,67
223,15	141,56	5,91	209,96
225,05	138,67	5,52	212,62
226,43	156,11	5,57	213,83
232,60	138,11	6,27	218,01

Таблица 2 – Технические характеристики плит (серия № 15)

Плотность средняя, кг/м ³	Прочность на сжатие, кПа	Количество связующего, процент по массе	Количество волокна, кг на 1 м ³ плит
181	85	8,05	166,08
187	114	11,25	166,34
188	104	11,56	166,62
190	88	8,81	172,98
193	71	4,17	185,15
194	72	4,03	185,72
195	137	8,73	177,88
196	100	7,27	182,00
197	116	8,30	180,84
198	73	3,33	191,65
200	80	4,18	191,65
201	74	3,79	193,58
204	75	3,63	196,18
205	106	4,47	195,75
206	163	8,92	188,00
209	133	6,12	196,06
211	112	4,08	202,69
214	124	11,67	189,02
216	118	2,93	209,34
217	146	9,11	196,93
217	131	6,29	203,36
222	157	9,42	201,34
222	143	5,37	209,86
226	137	12,56	197,73

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции

Номер серии	Плотность средняя (кг/м ³) – прочность при сжатии (кПа)	Коэффициент конструктивного качества (кПа) – прочность на сжатие (кПа)
Серия С104–С106	0,93	0,95
Серия №15	0,64	0,97

Для определения влияния конкретного технического показателя качества на прочность волокнистых плит были определены коэффициенты корреляции между основными качественными характеристиками утеплителя, значения которых приведены в таблице 3.

Для серии С104–С106 (таблица 1) влияние плотности на прочность (коэффициент корреляции 0,93) определяется плотностью упаковки волокна, то есть количеством волокна в единице объема плиты, и его ориентацией. Влияние коэффициента конструктивного качества на прочность при сжатии (коэффициент корреляции 0,95) обусловлено только ориентацией волокна. Именно влиянием структурного фактора можно объяснить различие по величинам прочности при одной и той же средней плотности плит.

Для плит серии № 15 (таблица 2) имеет место снижение величины этого коэффициента до 0,64, т.е. уменьшение суммарного влияния плотности структуры и структурной ориентации волокон, однако влияние коэффициента конструктивного качества на прочность возрастает (коэффициент корреляции 0,97). Это показывает, что величина прочности волокнистого утеплителя в большей степени определяется ориентацией волокна в структуре плиты, а средняя плотность изделия характеризует надежность сохранения этой ориентации в процессе расчетного срока эксплуатации, т.е. формостабильность волокнистого изделия. Минераловатная теплоизоляция с маркой по плотности D200 является наиболее востребованной. Это объясняется тем, что в процессе монтажа и первых лет эксплуатации происходит наиболее интенсивное коррозия всех компонентов утеплителя, приводящая к уменьшению длины волокна, ослаблению адгезионных и когезионных свойств склейки связующего, проявлению внутренних напряжений и потере формостабильности. Именно обеспечение формостабильности утеплителя при воздействии агрессивных факторов среды эксплуатации (долговременные температурно-влажностные, гравитационные и вибромеханические воздействия) является залогом его долговечности.

Для плит слоистой горизонтальной структуры диаметр, длина волокна и связанная с ним эластичность, гибкость, повышающие надежность зацементации волокна в теле плиты, играют определяющую роль в обеспечении формостабильности изделий. Поэтому для изделий слоистой структуры рекомендуется использовать стеклянное волокно или

базальтовое волокно, которые в наибольшей мере обладают всем комплексом перечисленных выше свойств. При коррозии уменьшение длины волокна для плит слоистой структуры чревато значительным снижением ее эксплуатационных свойств, пылением, слеживаемостью, на чем базируются рекомендации к применению для них влагостойкой минеральной ваты типов «А» и «Б» по ГОСТ 4640 с модулем кислотности более 1,4.

Отличие минеральной ваты из шлакового сырья, наиболее распространенного в Российской Федерации, заключается в том, что шлаковое волокно менее эластичное и более короткое по сравнению базальтовым и стеклянным волокном. Исследование влияния диаметра волокна и плотности упаковки его в плите на основной параметр теплоизоляционного материала – эквивалентный размер пор, позволяет количественно оценить эффективность теплоизоляции с различной ориентацией волокон.

Для волокнистых материалов эквивалентный размер пор принимается равный расстоянию между соседними волокнами, если рассматривать сечение, перпендикулярное направлению волокон. Величина отрезка волокна между двумя соседними пересечениями волокон, которая больше эквивалентного размера пор на диаметр волокна, характеризует величину взаимного закрепления волокон в теле плиты и зависит от вида волокнистой структуры. Зависимость эквивалентного размера пор от средней плотности волокнистой плиты слоистой структуры при различном диаметре минерального волокна приведена на рисунках 3 и 4.

При использовании минерального волокна одного диаметра минераловатные плиты с большей плотностью характеризуются меньшим эквивалентным размером пор. Эквивалентный размер пор прямо пропорционален количеству взаимных пересечений с другими волокнами, которые при наличии синтетического связующего обеспечивают жесткость структуры. Общее количество пересечений (склеек) определяется средней плотностью плиты, содержанием связующего и величиной диаметра минерального волокна, прямо пропорционально размеру пор и является залогом обеспечения прочности и формостабильности изделий. Зависимость количества взаимных пересечений волокон от средней плотности плит однородной пространственной структуры с 10% содержанием связующего при различном диаметре минерального волокна приведена на рисунке 5.

Например, для минераловатных плит однородной пространственной структуры с 5% связующего и диаметром волокон 8 мкм с плотностью 75 кг/м³ и 175 кг/м³ волокно длиной 1 мм имеет соответственно не менее 12 и 19 взаимных пересечений с другими волокнами (склеек).

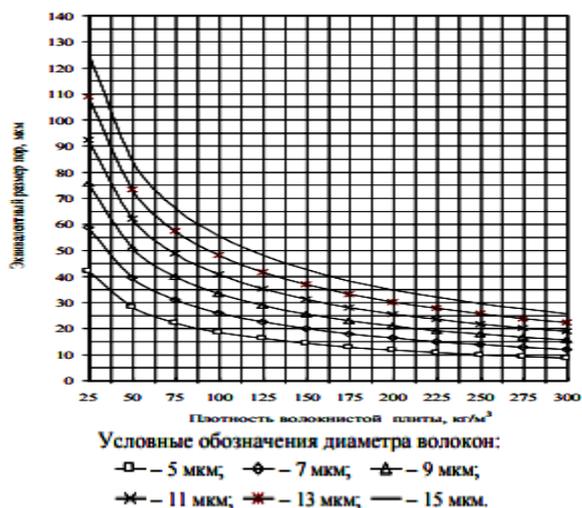


Рисунок 3 – Зависимость эквивалентного размера пор от средней плотности волокнистой плиты слоистой структуры при различном диаметре минерального волокна

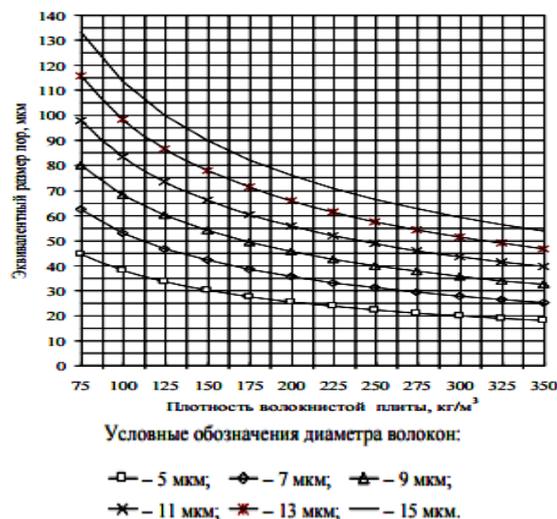


Рисунок 4 – Зависимость эквивалентного размера пор от средней плотности волокнистой плиты однородной пространственной структуры с 10% содержанием связующего при различном диаметре минерального волокна

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ

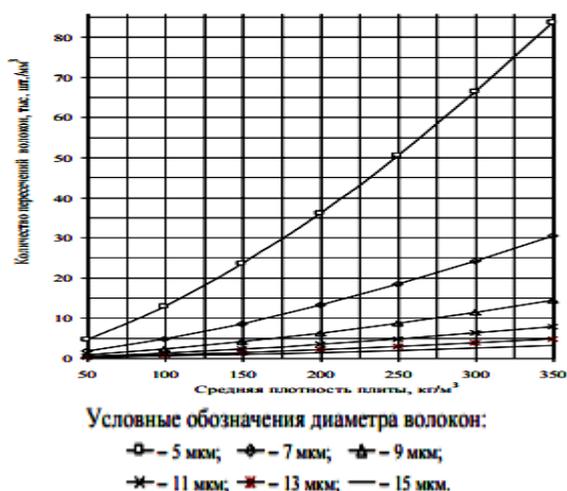


Рисунок 5 – Зависимость количества взаимных пересечений волокон от средней плотности плит однородной пространственной структуры с 10% содержанием связующего при различном диаметре минерального волокна

Таблица 4 – Расчетный диаметр глобул связующего

Средняя плотность плиты, кг/м ³	Расчетный диаметр глобул при следующих значениях диаметра минерального волокна, мкм						
	3	5	7	9	11	13	15
100	5,06	8,43	11,81	15,18	18,55	21,92	25,30
125	4,87	8,12	11,37	14,62	17,87	21,12	24,37
150	4,73	7,88	11,03	14,19	17,34	20,49	23,64
175	4,61	7,68	10,75	13,83	16,90	19,97	23,04
200	4,51	7,51	10,52	13,52	16,53	19,53	22,54

Увеличение количества пересечений с ростом средней плотности плиты является обоснованием повышения надежности закрепления волокна в плитах любой структуры. Для высокомарочных плит D175 и выше возможно применение шлаковой минеральной ваты со сравнительно короткой длиной волокна, полученной из минерального расплава с модулем кислотности до 1,4.

Многолетний положительный опыт использования минеральной ваты, полученной на основе доменных шлаков [2], для изготовления минераловатных плит повышенной жесткости (ГОСТ 22950) доказывает возможность для применения плит повышенной жесткости ППЖ-200 минеральной ваты всех типов (ГОСТ 4640).

В плитах различной структуры оптимальным является такое распределение синтетического связующего, когда оно находится только в узлах пересечений волокон. Если предположить, что дисперсии полимерного

связующего имеют вид шарообразных глобул, находящихся только в местах пресечения волокон, то расчетный диаметр глобулы определится средней плотностью плит, диаметром минерального волокна и количеством синтетического связующего. Расчетный диаметр глобул для минераловатных плит однородной пространственной структуры с 10% связующего приведен в таблице 4.

Диаметр глобул, как и эквивалентный размер пор, уменьшается при повышении плотности плит и уменьшении диаметра минеральных волокон. Расчеты показывают, что расчетный диаметр глобул соразмерим с диаметром минерального волокна, но не превышает величины диаметра эквивалентных пор и существует значительный резерв в снижении расхода синтетического связующего. Однако исследование макроструктуры реальной плиты показывает, что распределение связующего в волокнистом каркасе носит неоднородный, статистически неопределенный характер, зависящий от свойств полимерного связующего, технологических возможностей оборудования по его нанесению на волокно. Это указывает на имеющиеся значительные потенциальные возможности сокращения расхода связующего без снижения прочности плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобров, Ю. Л. Изделия гофрированной структуры (ИГС) – перспективный вид тепловой изоляции / Ю. Л. Бобров // Строительные материалы. – 1992. – № 4. – С. 2-4.
- Бобров, Ю. Л. Условия получения минераловатных плит повышенной прочности и долговечности / Ю.Л. Бобров, Г.Ф. Тобольский // Строительные материалы – 1974. – № 4. – С. 12.
- Киселев, И. Я. «Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры» / И. Я. Киселев // «Строительные материалы». – 2003. – № 7. – С. 17-18.
- Широкородюк, В. К. Технология минераловатных плит повышенной жесткости с заданной структурой / В. К. Широкородюк. – Краснодар, 2013. – 84 с.

Овчинников Е. В. – магистрант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: ev.ovchinnikov@bk.ru.

Анненкова О.С. – к.т.н., доцент кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: 222-ru@mail.ru.