

УДК 629.5.06

С.Н. Зеленов, П.В. Семашко
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «ИНТИЗОЛ»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье представлены результаты исследования теплоизоляционного материала на основе пеностекла «ИНТИЗОЛ», предназначенного для тепловой изоляции судовых конструкций. Был определен коэффициент теплопроводности методом сравнения с теплопроводностью эталонного материала (метод пластины) и установлена его зависимость от температуры. Результаты исследования рекомендуются для использования в инженерных теплотехнических расчетах.

Ключевые слова: теплопередача коэффициент теплопроводности, метод пластины, образцы материала.

Введение

В последние годы произошло значительное расширение номенклатуры теплоизоляционных материалов, применяемых в судостроительной промышленности и одобренных различными классификационными обществами. Сертификата типового одобрения, как правило, достаточно для использования в различных конструкциях судов. В то же время в ряде случаев требуются дополнительные подтверждения и согласования на возможность использования материалов других надзорных органов.

Целью работы является определение коэффициента теплопроводности материала «ИНТИЗОЛ» и его зависимости от температуры. На рис. 1 показан внешний вид исследуемого материала.

В настоящей статье приведены результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности для двух круглых образцов различной толщины. Работа выполнялась на стандартной установке для исследования теплопередачи типа ТП-001 № 030 производства СКБ Днепропетровского филиала НПО «Союзвузприбор» (Украина).



Рис. 1. Внешний вид исходной заготовки исследуемого материала «ИНТИЗОЛ»

Общие теоретические сведения

Для изучения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов, неметаллических жидкостей и газов в основном применяются методы, в которых испытуемый образец имеет форму пластины, трубы или полого шара и обеспечиваются условия для протекания через образец одномерного теплового потока [1-3].

Рассмотрим плоскопараллельную пластину, пронизываемую одномерным тепловым потоком с линиями тока, перпендикулярными к поверхности пластины. Теплообмен теплопроводностью через такую стенку происходит согласно закону Фурье:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток, проходящий через пластину; Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала пластины; Вт/(м·К); t_1, t_2 – температуры боковых поверхностей пластины; К; δ – толщина пластины, м.

Формула (1) применяется в том случае, если коэффициент λ принимается постоянным, не зависящим от температуры, что справедливо при малых перепадах температуры ($t_1 - t_2$). В общем случае следует учитывать температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала.

Известно, что для большинства теплоизоляционных материалов в узком интервале температур (до 50 К) величина коэффициента теплопроводности с достаточной степенью точности описывается линейной функцией вида

$$\lambda = f(t) = \lambda_0(1 + K_\lambda \cdot t). \quad (2)$$

Для большинства материалов $K_\lambda > 0$. Однако, некоторые материалы, обладают свойством уменьшения λ с возрастанием температуры и часто по сложному закону. Если ограничиться случаями $K_\lambda = \text{const}$, то для расчетов по формуле (1) берется среднее значение $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \lambda_0(1 + K_\lambda \cdot \bar{t}), \quad (3)$$

где $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$, тогда получим:

$$q = \lambda(\bar{t}) \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (4)$$

В основе зависимостей (1) и (4) лежит допущение о бесконечной протяженности пластины. В реальной схеме опыта образцы имеют конечные размеры. В связи с этим практическая реализация метода имеет свои особенности, связанные в первую очередь с появлением утечек теплоты через боковые грани образца. При прохождении одномерного теплового потока через бесконечную пластину все линии тока параллельны друг другу и перпендикулярны сторонам пластины, т. е. вся теплота, поступающая к одной его поверхности, переходит к другой без изменения поверхностной плотности.

При использовании образцов конечных размеров часть теплового потока, поступающего в образец, рассеивается во внешнюю среду через его боковую поверхность и на противоположную поверхность попадает измененный поток. Поэтому тепловой поток становится неоднородным, а линии тока вблизи боковой поверхности искривляются, что необходимо учитывать при разработке методики проведения эксперимента. Практическая реализация метода пластины связана также с трудностями измерения температуры поверхностей на горячей t_1 и холодной t_2 сторонах образца, разность которых входит в расчетную формулу (4). Наиболее удобны для этой цели термопары, но монтаж их непосредственно на образце затруднен. Поэтому образец, пластину, помещают между двумя плоскими металлическими пластинами (постоянные элементы установки), а спаи термопар монтируют в них вблизи рабочих поверхностей. Однако монтаж термопар за пределами образца имеет свои недостатки, так как на границах контакта образца с металлическими пластинами возникают контактные тепловые сопротивления R_x . Величина R_x зависит от качества поверхности контактирующих плоскостей, теплопроводности газовой прослойки и величины внешнего сжатия пластин и отличаются заметной нестабильностью. Наличие R_x не дает возможности использовать метод пластины с вынесенными за пределы образца термопарами для исследования теплопроводности материалов при $\lambda > 10$ Вт/(м·К). Уменьшить R_x можно, если увеличить давление сжатия между пластинами, повысить качество обработки поверхностей образцов или смазать кон-

тактирующие плоскости какой-либо жидкостью, коэффициент теплопроводности которой близок к теплопроводности исследуемого материала. Если образцы изготовлены из воздушно-пористых материалов малой плотности, а также если исследуются газы или жидкости, то влиянием контактных сопротивлений можно пренебречь.

Экспериментальная установка и исследуемые образцы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Установка состоит из пульта управления и смонтированными на нем КИП и приборами системы электропитания. Рабочий участок состоит из двух фторопластовых образцов 2 и 3 толщиной $\delta = 5$ мм с наружным диаметром $d = 140$ мм. Между пластинами находится электронагреватель 1, размещенный в капсуле из нержавеющей стали и выполненный в виде диска диаметром 140 мм.

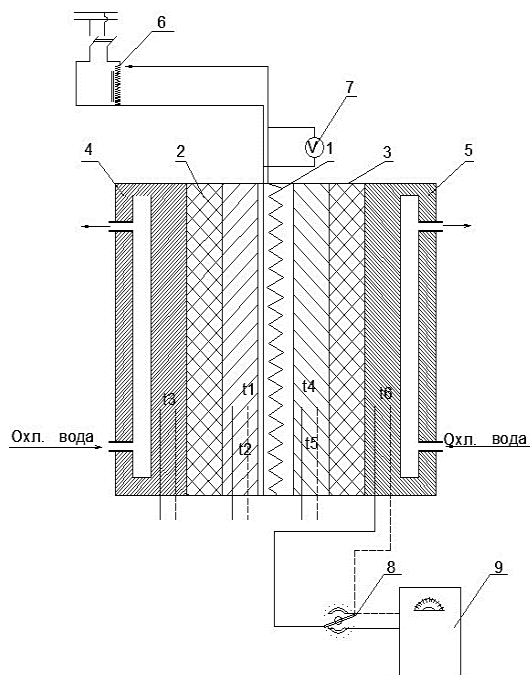


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

На плоских наружных поверхностях капсулы размещены по две хромель-копелевые термопары t_1, t_2, t_4, t_5 для измерения температуры. Термопары t_1 и t_4 в центре рабочей поверхности нагревателя, t_2 и t_5 — по краям. Опытные образцы 2 и 3 располагаются между нагревателем и холодильниками 4 и 5. Охлаждающая жидкость в холодильнике 4 находится в тепловом контакте с опытным образцом 2. В центре образца для измерения температуры закреплена термопара t_3 . То же самое сделано и на втором образце, который размещен в холодильнике 5 и где установлена термопара t_6 . Холодильники изготовлены из нержавеющей стали и снабжены патрубками подачи и слива охлаждающей воды. Большой расход воды обеспечивает изотермичность наружных поверхностей образцов. Таким образом, тепловой поток, проходящий через исследуемые образцы, уносится протекающей через холодильники водой. Равномерное распределение тепловыделяющих элементов электронагревателя, в свою очередь, обеспечивает равномерность плотности теплового потока, идущего от электронагревателя. Регулирование теплового потока обеспечивается автотрансформатором 6, который дает возможность изменять напряжение 7 протекающего тока, питающего электронагреватель, а значит, и изменять потребляемую нагревателем мощность. Термопары $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ присоединены к переключателю 8, помощью которого они поочередно подключаются к электронному потенциометру 9.

Методика и порядок проведения опытов

1. Определение времени выхода установки на установившийся температурный режим, предваряющий начало проведения измерений. Установлено, что это время составляет ~ 55 мин с момента включения нагревателя на мощность $W = 10$ Вт, далее, соответственно, по 30 мин при переключении на мощности 20, 30 и 50 Вт. О наступлении стационарного режима свидетельствовало постоянство температур с обеих сторон образца. В дальнейшем все измерения проводились и заносились в протокол после выхода установки на стационарный режим.

2. Предварительные испытания двух эталонных образцов, выполненных из фторопласта, с целью определения их коэффициента теплового потока. Так как образцы имеют одинаковые размеры, то можно предположить, что через них проходит одинаковый тепловой поток. Равенство температур $t_1 = t_4$ и $t_3 = t_6$ должно подтверждать данное предположение.

3. Проведение испытаний в объеме п. 2, заменив один из эталонных образцов поочередно на первый, затем на второй образцы из исследуемого материала.

Методика и результаты расчета коэффициента теплопроводности

Определение коэффициента теплопроводности испытуемого материала начинается с нахождения среднего значения вспомогательного расчетного коэффициента теплового потока \bar{K}_3 для материала эталонного образца. В общем случае тепловой поток $Q_{\text{общ}}$, создаваемый нагревателем, складывается из теплового потока, проходящего через образцы и теряемого через корпус нагревателя Q_k . При хорошей теплоизоляции можно принять $Q_k = 0$, тогда общий тепловой поток $Q_{\text{общ}} = W$, где W – электрическая мощность электронагревателя, определяемая с помощью ваттметра. Проведенные тестовые испытания подтвердили предположение о том, что тепловой поток нагревателя делится поровну на каждый из образцов. В результате для трех значений проходящего через образец теплового потока были найдены три значения вспомогательного расчетного коэффициента K_3 . В дальнейших расчетах использовалось среднее значение вспомогательного коэффициента теплового потока эталонного материала $\bar{K}_3 = 0,685$ Вт/°С. Результаты проведенных испытаний и полученные для различных температур значения вспомогательного коэффициента теплового потока эталонных образцов приведены в табл. 1.

Дальнейшие испытания проводились после снятия одного эталонного образца и замены его поочередно на образцы из испытуемых материалов. При этом сначала определялся тепловой поток через эталонный образец по формуле $Q_k = \bar{K}_3 \cdot \Delta t_2$, затем – тепловой поток через опытный образец по формуле $Q_{\text{оп}} = Q - Q_k$.

Расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности опытного образца методом пластины имеет вид:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{Q \cdot \delta}{2F \cdot \Delta t_1},$$

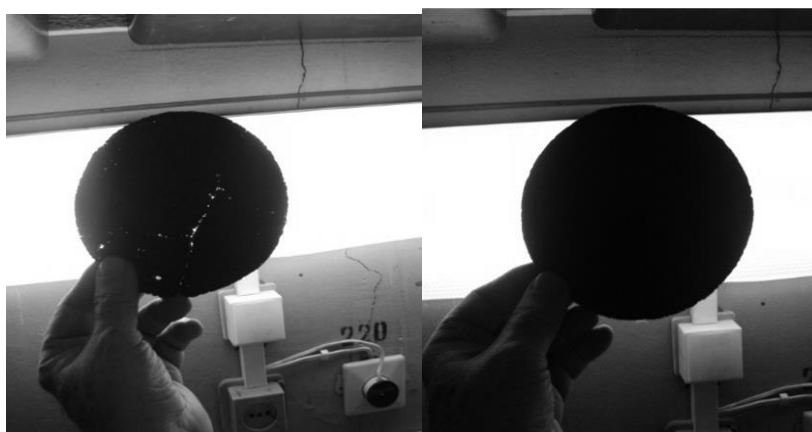
где $F = 0,785d^2$ – площадь образца, через которую передается тепловой поток, d – диаметр образца, м, δ – толщина образца, м. Для экспериментов из исследуемого материала были изготовлены образцы двух типоразмеров: №1 – диаметром $d = 137$ мм, толщиной $\delta = 5,5$ мм и контактной площадью $F = 0,0147$ м² и №2 – диаметром $d = 138$ мм, толщиной $\delta = 12,7$ мм и контактной площадью $F = 0,015$ м². Исследуемые образцы показаны на рис. 3.

Таблица 1.
Результаты измерений и расчета значения
приведенного коэффициента теплового потока для эталонных образцов

№ опыта	Интервал между замерами, мин	Эталонный образец №1			Эталонный образец №2			Мощность нагревателя $W(Q)$, Вт	Тепловой поток на один образец Q_1 , Вт	Коэффициент $K_3 = Q/\Delta t$, Вт/°C	Среднее значение \bar{K}_3 , Вт/°C
		$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_1 = t_1 - t_3$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_2 = t_4 - t_6$				
1	30	42	20	22	42	20	22	30	15	0,682	0,682
	10	42	20	22	42,1	20	22			0,682	
	15	41,8	19,7	22	41,8	19,7	22			0,682	
				22			22			0,682	
2	20	47,8	19	28,8	48	18,8	29,2	40	20	0,690	0,690
	10	48	19	29	48,2	19	29,2			0,690	
	15	48	19,3	28,7	48,2	19	29,2			0,692	
				28,9			29,2			0,691	
3	15	54,5	18	36,5	55,2	17,9	37,2	50	25	0,679	0,684
	10	54	18,3	35,7	55	18	37			0,684	
	5	54	18,2	35,8	54,6	18	36,6			0,690	
				36			36,9				
Среднее значение коэффициента теплового потока эталонных образцов										0,685	



а



б

Рис. 3. Исследуемые образцы
а – внешний вид образцов сбоку; б – внешний вид образцов на просвет

Коэффициент теплопроводности материала зависит от температуры, поэтому значения $\lambda_{оп}$ необходимо отнести к средней температуре образца $t_{cp} = \frac{t_1 + t_3}{2}$.

Результаты проведенных испытаний и полученные при различных температурах значения $\lambda_{оп}$ приведены в табл. 2, 3. По ним были построены графические зависимости $\lambda_{оп} = f(t_{cp})$, представленные на рис. 4. В табл. 4 приведены результаты определения коэффициента теплопроводности опытных образцов.

Таблица 2.
Результаты измерений и расчета значения коэффициента теплопроводности для образца №1 ($\delta = 5,5$ мм)

№ опыта	Интервал между замерами, мин	Опытный образец №1			Эталонный образец			Мощность (тепловой поток) нагревателя $W(Q)$, Вт	Тепловой поток эталонного образца $Q_э$, Вт	Тепловой поток испытуемого образца $Q_{оп}$, Вт	Коэффициент теплопроводности испытуемого образца $\lambda_{оп}$, Вт/м·°К
		$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_1 = t_1 - t_3$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_2 = t_4 - t_6$				
1	10	27,0	14,5	12,5	24,6	15,1	9,5	10	6,5	3,5	0,105
	5	27,2	14,5	12,7	24,6	15,2	9,4		6,44	3,56	0,105
	7	27,2	14,5	12,7	24,6	15,3	9,3		6,37	3,63	0,107
Средние значения				12,6		9,4		6,44	3,56	0,106	
2	10	38,5	14,6	23,9	34,3	15,7	18,6	20	12,74	7,26	0,114
	10	38,5	14,6	23,9	34,3	15,5	18,8		12,9	7,1	0,111
	5	38,5	14,6	23,9	34,3	15,6	18,9		13,0	7,0	0,110
Средние значения				23,9		18,8		12,9	7,1	0,112	
3	5	50,8	14,8	35,0	44,5	16,3	28,2	30	19,3	10,7	0,111
	7	50	14,5	35,5	44,0	16	28,0		19,18	10,82	0,114
	10	50	14,5	35,5	44,0	16	28,0		19,18	10,82	0,114
Средние значения				35,7		28,0 7		19,23	10,77	0,113	
4	15	72,8	14,3	58,5	63,3	16,3	47,0	50	32,2	17,8	0,114
	10	72,3	14,3	58,0	62,8	16,3	45,8		31,4	18,6	0,120
	10	72,3	14,3	58,0	62,5	16,3	46,2		31,6	18,4	0,119
Средние значения				58,2		46,3		31,7	18,3	0,118	

Выводы и заключение

В ходе работы был определен коэффициент теплопроводности испытуемого материала «ИНТИЗОЛ» методом сравнения с теплопроводностью эталонного материала (фторопласта).

Получены значения коэффициента λ , которые составили $\lambda_{оп} = 0,158...0,178$ Вт/м·К в диапазоне средних значений температур $t_{cp} = 20...50^\circ\text{C}$. Табличные значения коэффициента теплопроводности продуктов «ИНТИЗОЛ» находятся в пределах $\lambda = 0,052...0,108$ Вт/м·К. Найденные значения коэффициентов теплопроводности отличаются от табличных на $\sim 35\%$

Коэффициент теплопроводности имеет линейную зависимость от температуры. С ростом температуры он увеличивается, соответственно, при понижении температуры – уменьшается.

Уменьшение толщины материала приводит к существенному уменьшению коэффициента теплопроводности. В этом случае положительно сказывается увеличение воздушной прослойки в структуре слоя материала. Однако, одновременно он становится и более хрупким, что существенно усложнит ведение изоляционных работ на судне. Для исключения раскрашивания слоя материала его следует снаружи покрывать фольгой.

Таблица 3.
Результаты измерений и расчета значения коэффициента теплопроводности для образца №2 ($\delta = 12,7$ мм)

№ опыта	Интервал между измерениями, мин	Опытный образец №2			Эталонный образец			Мощность (тепловой поток) нагревателя $W(Q)$, Вт	Тепловой поток эталонного образца $Q_э$, Вт	Тепловой поток испытуемого образца $Q_{оп}$, Вт	Коэффициент теплопроводности испытуемого образца $\lambda_{оп}$, Вт/м·°К
		$t_1, °C$	$t_3, °C$	$\Delta t_1 = t_1 - t_3$	$t_4, °C$	$t_6, °C$	$\Delta t_2 = t_4 - t_6$				
1	10	27,4	13,0	14,4	24,2	13,6	10,6	10	7,26	2,74	0,161
	5	27,5	13,0	14,5	24,5	14	10,5		7,20	2,80	0,163
	10	27,8	12,7	15,0	24,5	13,8	10,7		8,00	2,00	0,153
Среднее значение				14,6			10,6		7,49	2,51	0,158
2	10	40,2	12,5	27,5	34,7	13,4	21,3	20	14,6	5,60	0,166
	10	40,0	12,5	27,5	34,8	13,3	21,5		14,73	5,27	0,162
	10	40,0	12,5	27,5	34,6	13,4	21,2		14,52	5,48	0,168
Среднее значение				27,5			21,3		14,60	5,45	0,165
3	15	53,3	12,6	40,7	45,0	13,2	31,8	30	21,80	8,20	0,170
	10	53,3	12,5	40,8	45,3	13,0	32,3		22,12	7,90	0,164
	12	53,3	12,5	40,8	45	13,2	31,8		21,80	8,20	0,170
Среднее значение				40,8			32,0		21,90	8,10	0,168
4	10	79,0	14,0	65,0	66,8	14,0	52,8	50	36,17	13,87	0,180
	15	79,0	14,0	65,0	67,0	14,0	53		36,30	13,70	0,178
	7	79,3	13,8	65,5	67,5	14,5	53		36,30	13,70	0,177
Среднее значение				65,2			52,9		36,24	13,76	0,178

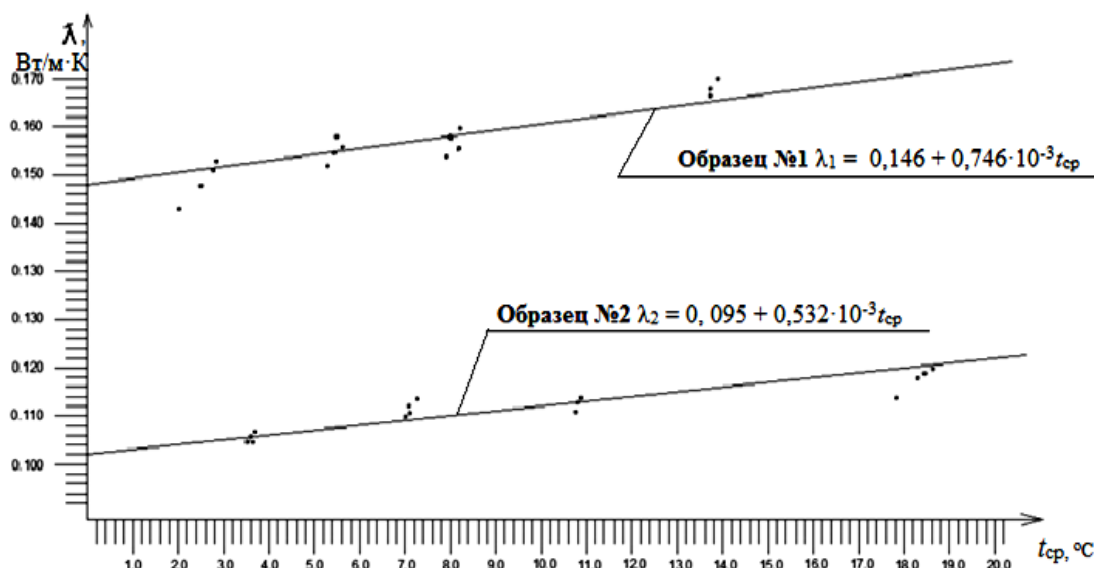


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

После статистической обработки результатов измерений по вышеприведенным зависимостям, были получены следующие значения коэффициента теплопроводности: образец №1 $\lambda_1 = 0,112 \pm 0,044$ Вт/м·К; образец №2 $\lambda_2 = 0,167 \pm 0,045$ Вт/м·К или в аналитическом виде $\lambda_1 = 0,146 + 0,746 \cdot 10^{-3} t_{ср}$ (Вт/м·К); $\lambda_2 = 0,095 + 0,532 \cdot 10^{-3} t_{ср}$ (Вт/м·К).

Таблица 4.
Сводные результаты испытаний образцов материала

№ опыта	Мощность нагревателя W , Вт	Образец № 1				Образец № 2			
		Тепловой поток		Средняя температура $\bar{t}_{оп}$, °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{оп}$, Вт/м·К	Тепловой поток		Средняя температура $\bar{t}_{оп}$, °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{оп}$, Вт/м·К
		через эталонный образец $Q_э$, Вт	через опытный образец $Q_{оп}$, Вт			через эталонный образец $Q_э$, Вт	через опытный образец $Q_{оп}$, Вт		
1	10	6,46	3,54	20,85	0,106	7,49	2,51	20	0,158
2	20	12,9	7,10	26,55	0,112	14,60	5,40	26,3	0,165
3	30	19,23	10,77	32,44	0,113	21,90	8,10	32,9	0,168
4	50	31,7	18,30	43,38	0,118	36,24	13,76	46,5	0,178

В результате исследования были получены значения и построены зависимости коэффициента теплопроводности испытуемого материала для двух образцов толщиной $\delta = 5,5$ мм (образец № 1) и 12,7 мм (образец № 2) в диапазоне значений температур t от 20 °С до 47 °С. Величина коэффициента теплопроводности λ в данном диапазоне температур составила соответственно: для первого образца – 0,106...0,118 Вт/м·К, для второго – 0,158...0,178 Вт/м·К. Установлено, что снижение толщины приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности за счет увеличения воздушного пространства в слое материала.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: из-за мелкопористой структуры (мелкие частицы твердого спекшегося материала с большой долей воздушной прослойки) материал обладает относительно низкой теплопроводностью и может быть отнесен к теплоизоляционным материалам. Наличие шероховатости поверхности плит способствует снижению тепловых потерь из-за дополнительной воздушной прослойки.

Экономический эффект от применения данного материала по назначению определится при сравнении его с характеристиками других теплоизолирующих материалов, разрешенных Регистром, с учетом его доступности.

Библиографический список

1. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
3. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005006> (дата обращения 12.01.2019).