

Выбор материала с фазовым переходом для повышения энергоэффективности зданий

*Д.В. Тараненко, О.С. Мицкевич, О.С. Никитина, С.В. Дружинкин,
Н.Ю. Клиндух, Е.В. Пересыпкин
Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Аннотация: В работе представлены результаты исследований влияния материалов с фазовым переходом на внешней поверхности наружного ограждения на формирование средней величины теплового потока за один год, рассчитанной при изменении внешней температуры среды через каждые три часа. Исследовалась корреляция между тепловым потоком и характеристиками материала с фазовым переходом. Такие материалы увеличивают тепловую инерцию наружных ограждающих конструкций и способны снизить необходимое для поддержания микроклимата помещений количество электроэнергии.

В результате реализации метода математического планирования эксперимента получена адекватная математической модели зависимости плотности теплового потока от толщины слоя материала, скрытой теплотой фазового перехода, значений теплоемкости и теплопроводности до и после изменения фазового состояния. Проведена интерпретация коэффициентов математической модели и определены оптимальные значения варьируемых факторов с использованием функции желательности. На основании этих данных осуществлен выбор материала с температурой изменения фазы около 0°C для г. Красноярск.

Ключевые слова: энергосбережение, тепловой поток, сохранение теплоты, теплоаккумулирующий материал, аккумуляторы теплоты на фазовых переходах, материал с фазовым переходом.

В современном мире роль энерго- и ресурсосбережения огромна; большая доля в потреблении энергоресурсов принадлежит зданиям [1-3]. Одним из способов снизить энергопотребление зданий является размещение в ограждающих конструкциях зданий материалов с изменяющимся фазовым состоянием, для увеличения их тепловой инерции. Эти материалы поглощают избыток тепловой энергии при плавлении и восполняют ее дефицит в течение процесса кристаллизации, что приводит к задержке прохождения теплового потока сквозь конструкцию, к сглаживанию температуры воздуха в помещениях в течение дня и к понижению спроса на электроэнергию, потребляемую для отопления и кондиционирования воздуха.

На настоящий момент производится большое количество материалов с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) [4,5]. Многие из них подходят по температуре фазового перехода для размещения в ограждающих конструкциях зданий [6]. С целью оценки степени влияния характеристик таких материалов на теплотери зданий,

и выбора оптимального варианта сочетания толщины и теплофизических характеристик МИФС, проведена серия численных расчетов в соответствии с выбранным планом математического планирования.

Для вывода уравнения регрессии четыре количественных фактора варьировались на трех уровнях (таблица №1).

Таблица №1

Значения варьируемых факторов в натуральных и кодированных единицах

Уровень	Толщина МИФС		Скрытая теплота		C*		λ*	
	см	код. ед.	Дж/кг	код. ед.	—	код. ед.	—	код. ед.
1	1	-1	166500	-1	1	-1	1,5	-1
2	2	0	249750	0	1,5	0	1,75	0
3	3	+1	333000	+1	2	+1	2	+1

В таблице 1 безразмерные входные параметры C* и λ* – это отношение теплофизических характеристик материала с фазовым переходом в различных фазах:

$$C^* = \frac{C_L}{C_S},$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda_S}{\lambda_L},$$

где C_S, λ_S – теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала соответственно в жидком состоянии; C_L, λ_L – теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала соответственно в кристаллическом состоянии.

Для определения выходного параметра – теплового потока через внутреннюю поверхность стены – было реализовано 27 опытов. В расчетной модели геометрия стены представляла собой два соединенных в одномерном пространстве отрезка. Первому отрезку с внешней стороны была присвоена длина и другие характеристики согласно текущей строчки рабочей матрицы, составленной на основе таблицы 1 и матрицы планирования. При этом плотность материала с фазовым переходом и температура фазового перехода оставались всегда равными 1000 кг/м³ и 0°С. Второй отрезок имел

постоянную длину, равную 0,64 м., и неизменяемые теплофизические характеристики, значения которых были приняты как для кирпичной кладки из сплошного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе согласно своду правил «Тепловая защита зданий».

Начальным месяцем расчета выбран январь; временной шаг расчета составил 1 час. Использовались граничные условия 3-го рода: для наружной поверхности стены – коэффициент теплоотдачи 23 Вт/(м²·°С) и температура наружного воздуха T_{ext} в виде табличных данных температурной истории для г. Красноярск; для внутренней поверхности стены – коэффициент теплоотдачи 8,7 Вт/(м²·°С) и температура внутреннего воздуха T_{int} , которая была равна 20°С.

В результате расчета были получены величины выходного параметра. Максимальный тепловой поток составил 17,037 Вт/м², а минимальный 16,563 Вт/м².

Уравнение регрессии при ранжировании факторов по степени влияния на тепловой поток имеет вид:

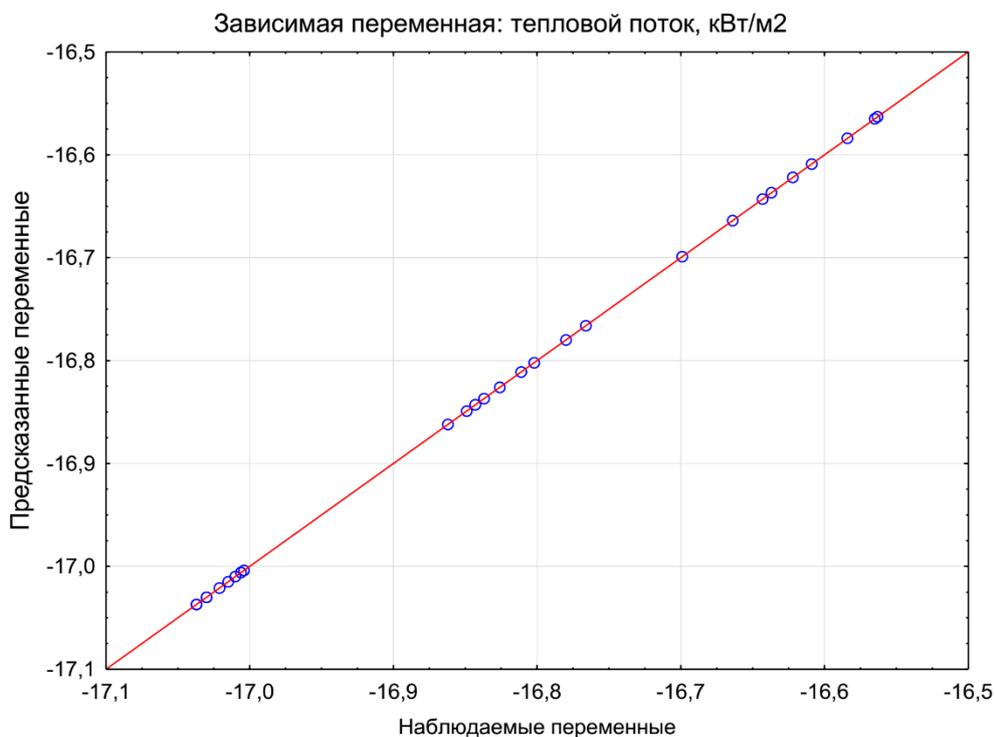
$$q = -16,848 + 0,216 \cdot x_1 - 0,046 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 + 0,044 \cdot x_1^2 + 0,034 \cdot x_2^2 - 0,032 \cdot x_4 + 0,025 \cdot x_2 \cdot x_4^2 - 0,024 \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,020 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 - 0,018 \cdot x_2 - 0,016 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,012 \cdot x_3 + 0,010 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,009 \cdot x_3 \cdot x_4^2 + 0,008 \cdot x_1 \cdot x_4^2 - 0,008 \cdot x_1 \cdot x_3^2 + 0,007 \cdot x_1^2 \cdot x_3 + 0,006 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,005 \cdot x_4^2 + 0,004 \cdot x_2^2 + 0,004 \cdot x_2 \cdot x_3^2 - 0,004 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,003 \cdot x_1^2 \cdot x_4 + 0,003 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,002 \cdot x_1^2 \cdot x_4^2 - 0,0002 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 0,0002 \cdot x_2 \cdot x_3$$

,
(1) где x_1 – фактор «толщина МИФС», x_2 – фактор «скрытая теплота», x_3 – фактор C^* , x_4 – фактор λ^* .

Таким образом, сокращение теплопотерь можно добиться при увеличении членов уравнения (1) с положительными коэффициентами регрессии.

Полученное уравнение точно описывает влияние исследуемых факторов на тепловой поток во всех опытах (рис.1), но сложно для интерпретации; далее была задействована встроенная в программный пакет STATISTICA функция желательности.

Рис. 1. – Диаграмма рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений

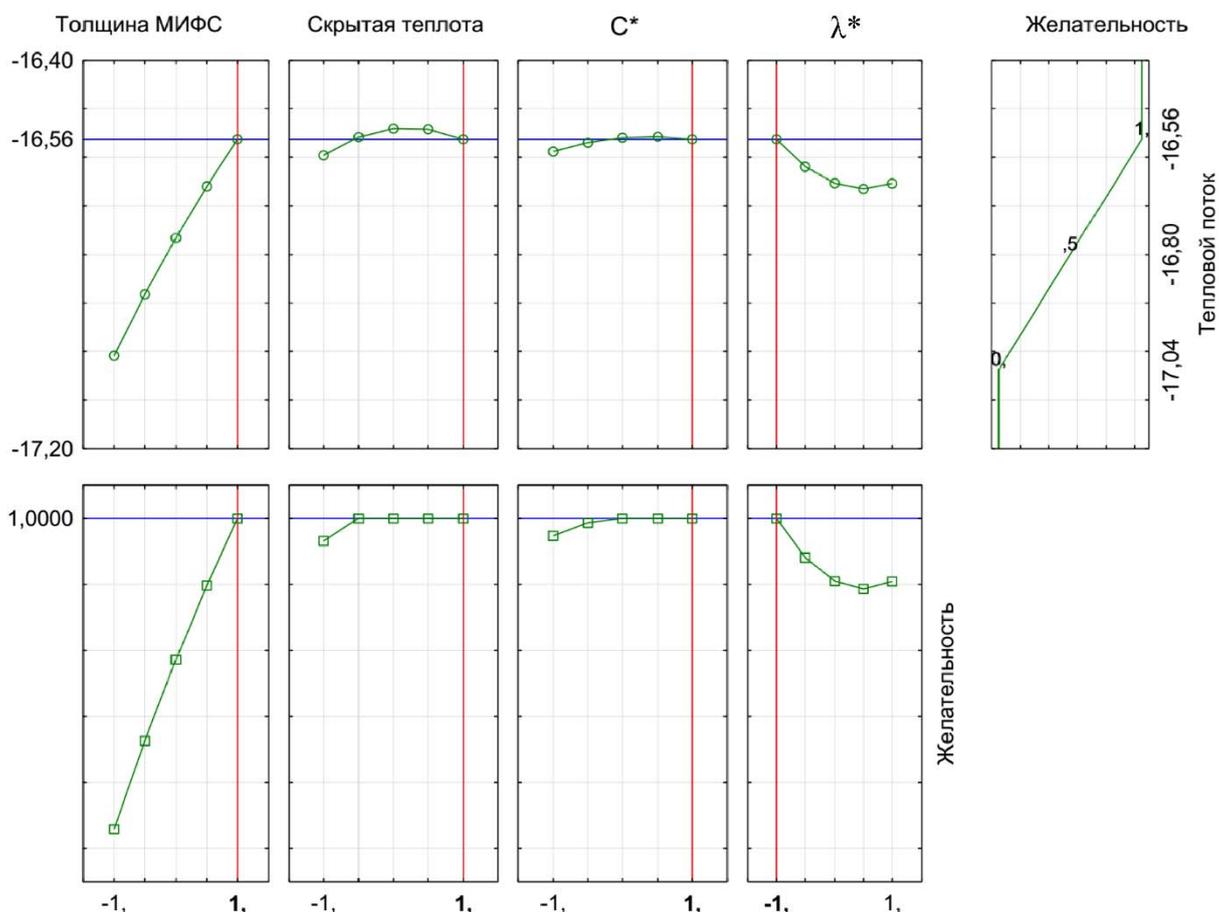


Функция желательности – способ перевода натуральных значений в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами. При этом граничные значения функции, например 0 и 1, соответствуют градациям «плохо – хорошо». Перевод в единую числовую шкалу дает возможность объединять в единый показатель самые разные параметры [7].

В исследуемой ситуации, за нулевое значение функции принято максимальное (по модулю) значение теплового потока, а за единичное значение – минимальное (по модулю), как наиболее желательное. По полученные графикам (рис.2) можно определить, какие уровни факторов дают наиболее желаемый отклик зависимой переменной (тепловой поток). Для такого фактора, как толщина МИФС, наиболее оптимален третий уровень (что соответствует натуральному значению 3 см); для фактора скрытая теплота третий уровень (333000 Дж/кг), для отношения теплоемкостей C^* третий уровень (2) и для отношения коэффициентов теплопроводности λ^* первый уровень (1,5).

Рис. 2. – Наиболее желаемые уровни факторов

Как видно по графикам рис.2, любое отклонение значений факторов от оптимальных значений, за исключением фактора «скрытая теплота», уменьшает значение



функции желательности. Особенно чувствителен отклик теплового потока к изменению толщины материала с фазовым переходом и к отношению теплопроводностей λ^* .

Распределение частных функций желательности в зависимости от соотношения рассматриваемых факторов показано на рис.3.

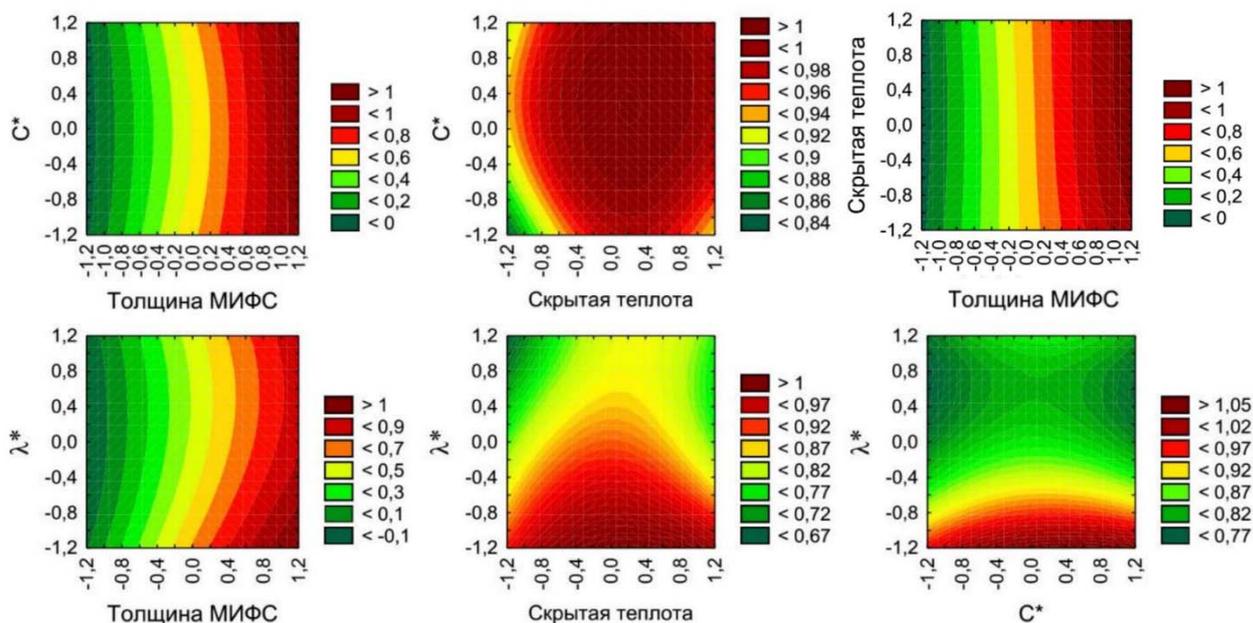


Рис. 3. – Частные функции желательности

Благоприятные по температуре фазового перехода материалы отобраны в таблицу №2. Если производителем материала заявлено только одно значение характеристики, принято, что изменение этой характеристики после фазового перехода мало и ее отношение в разных фазах приблизительно равно единице.

Таблица №2

Список наиболее подходящих МИФС

Наименование МИФС, его марка	Температура кристаллизации / плавления, °С	Скрытая теплота, КДж/кг	Удельная теплоемкость в жид./кристал., КДж/(кг·°С)	Теплопроводность в кристал./жид., Вт/(м·°С)	C^*	λ^*
вода (лед) [8]	≈ 0	333	4212/2050	2,22/0,56	2,05	3,7
savE HS 01 [9]	1/1	350	3.9/2.0	2.2/0.55	1,95	4
PureTemp -2 [10]	-2	277	4.02/2.10	2.21/0.60	1,91	3,68
Rubitherm RT0 [11]	-1	175	2	0.2/0.2	1	1
PlusICE E0 [12]	0	395	4.19	0.58	1	1
PlusICE A2 [12]	2	230	2.2	0.21	1	1

В большей мере всем критериям удовлетворяет материал PlusICE E0. Его характеристики в кодированных значениях с толщиной 3 см ($x_1=1$, $x_2=1,74$, $x_3=-1$, $x_4=-3$) дают по уравнению (1) тепловой поток $q=-16,22$ Вт/м². Для сравнения, тепловой поток через стену без МИФС составил -16,67 Вт/м².

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Анализ линейных коэффициентов уравнения регрессии показывает, что наибольшее влияние на снижение теплового потока оказывает толщина МИФС, затем отношение теплопроводностей λ^* . Именно эти факторы, по сравнению с остальными, способны оказать наибольшее воздействие на тепловой поток, согласно функции желательности.

2. В рассматриваемом случае, установка материала с фазовым переходом в целях повышения энергосбережения оказалась малоэффективна, что можно объяснить не самой подходящей для климата г. Красноярска выбранной температурой фазового перехода материала.

Литература

1. Алоян Р. М., Федосов С. В, Опарина Л. А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения: монография. Иваново: ПресСто, 2016. 276 с.
2. Паненко Н.Н., Скрябин А.Ю., Популиди К.К., Денисова А.В., Денисов В.В. Энергосбережение при очистке сточных вод населённых мест // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2339.
3. Байрамуков С.Х., Долаева З.Н. Комплексный подход к проблеме модернизации жилищного фонда // Инженерный вестник Дона.2013.№4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2048.
4. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications. Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2008. 308 p.
5. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components - An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2015. 271 p.
6. Назиров Р.А., Тараненко Д.В., Веде П.Ю. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // Строительство и реконструкция.2019.№2(82).С 90-105.
7. Гелашвили Д.Б., Лисовенко А.В., Безруков М.Е. Применение интегральных показателей на основе функции желательности для комплексной оценки качества сточных вод // Поволжский экологический журнал.2010.№4.С. 343-350.
8. Плотность льда и снега, теплопроводность, теплоемкость льда // ThermalInfo.ru URL: thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/plotnost-lda-i-snega-teploprovodnost-teploemkost-lda (дата обращения: 18.10.2019).
9. Pluss Technology for a better world // Pluss URL: www.pluss.co.in/ (дата обращения: 18.10.2019).
10. Global Authority on phase change material // PureTemp. URL: puretemp.com (дата обращения: 18.10.2019).
11. Rubitherm phase change material // Rubitherm. URL: rubitherm.eu/ (дата обращения: 18.10.2019).
12. PCM // PCM URL: pcmproducts.net (дата обращения: 18.10.2019).

References

1. Aloyan R. M., Fedosov S. V, Oparina L. A. Energoeffektivnye zdaniya- sostoyanie, problemy i puti resheniya: monografiya. [Energy-efficient buildings - state, problems and solutions: a monograph]. Ivanovo: PresSto, 2016. 276 p.
2. Panenko N.N., Skryabin A.Yu., Populidi K.K., Denisova A.V., Denisov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2339
3. Bayramukov S.Kh., Dolaeva Z.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2048.
4. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications. Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2008. 308 p.
5. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components - An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2015. 271 p.
6. Nazirov R.A., Taranenko D.V., Vede P.Yu. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya.2019.№2 (82).pp 90-105.
7. Gelashvili D.B., Lisovenko A.V., Bezrukov M.E. Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal.2010. №4. pp. 343-350.
8. Plotnost' l'da i snega, teploprovodnost', teploemkost' l'da. [Density of ice and snow, thermal conductivity, heat capacity of ice]. URL: thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/plotnost-lda-i-snega-teploprovodnost-teploemkost-lda (accessed: 18.10.2019).
9. Pluss Technology for a better world. URL: pluss.co.in/ (accessed: 18/10/2019).
10. Global Authority on phase change material URL: puretemp.com (accessed: 18.10.2019).
11. Rubitherm phase change material URL: rubitherm.eu/ (accessed: 18.10.2019).
12. PCM URL: pcmproducts.net (accessed: 18.10.2019).