

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА ТЕПЛООВОГО ОГРАЖДЕНИЯ

Определение формы взаимосвязи изменения коэффициента теплопроводности минеральной ваты и пенопласта при одновременном изменении их объемной массы и температуры изделия основано на доступных методах регрессионного анализа.

Рассмотрены многочисленные варианты теплоизоляционных конструктивных элементов теплозащитного ограждения монолитных бетонных конструкций, применяемые в условиях пониженных температур второй температурно климатической зоны [1], среди которых, мягкие, полужесткие и жесткие минераловатные плиты и плиты из пенопласта.

С целью определения пригодности их к использованию осуществлялся контроль стандартными методами [2, 3] длины, ширины и притупленности углов испытуемого образца, которые измерялись металлической линейкой с точностью до 1 мм в трех местах на расстоянии 50 мм от каждого края и обязательно посередине изделия; контроль прямоугольности плит — с помощью угольника-шаблона, а так же их толщины, для чего использовался ручной толщиномер.

Для наиболее точного измерения толщины образца испытываемой минераловатной плиты с помощью толщиномера изделие прокалывали в шести местах на расстоянии 10 мм от каждого края и в двух местах посередине изделия. При испытании образца была применена следующая методика: из определенной партии плит отбирали три, каждая из которых взвешивалась отдельно с точностью до 10 г, измерялись длина и толщина с точностью до 1 мм.

Объемная масса теплозащитного элемента ограждения в состоянии естественной влажности, оказывающая большое влияние на коэффициент его теплопередачи, определялась по следующей формуле:

$$\rho_0 = \frac{m}{V(1 + 0,01w)}, \quad (1)$$

где: m — масса изделия, кг;

V — объем изделия, м^3 ;

w — влажность изделия, %.

Объемную массу партии плит вычислялась как среднее арифметическое результатов трех измерений и взвешиваний.

Величину коэффициента теплопроводности определяли методом регулярного режима.

С целью определения влажности материала теплозащитного элемента ограждения из минераловатной плиты использовано трубчатое сверло диаметром 10 мм. В соответствии с ГОСТ 4640-76 выполнялось не менее 12 проб из разных мест исследуемой плиты, которые помещались в два прокаленные и взвешенные фарфоровые или корундовые тигли, предварительно измельчив и тщательно перемешав. Пробу материала предварительно высушивали при 105..110°C до постоянной массы и взвешивали с точностью до 0,01 г, причем масса навески в каждом случае была не менее 20 г.

Показатель влажности материала теплозащитного элемента ограждения из минераловатной плиты по массе (%) определялся как среднее арифметическое результатов двух измерений по формуле

$$w = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100, \quad (2)$$

где: m_1 – масса образца влажного материала, г;
 m – масса сухого материала, г.

Для определения влажности материалов применялись так же электрофизические методы, основанные на ослаблении бета- и гамма-излучений, взаимодействии нейтронного потока и исследуемого материала, отражении инфракрасных или видимых лучей, измерении диэлектрических характеристик и т.д. Нейтронный метод определения влажности основан на том, что самым эффективным замедлителем нейтронных частиц являются ядра наиболее легких элементов, в частности водорода. При облучении влажных материалов быстрыми нейтронами количество образующихся медленных нейтронов в основном определяется количеством атомов водорода в материале. Чем больше содержание влаги в материале, тем больше регистрируется медленных нейтронов.

Источником нейтронов обычно являются смеси радиоактивного элемента полония или радия с бериллием. В этой смеси происходит ядерная реакция с образованием углерода и нейтронов.

Приборы для определения влажности нейтронным способом состоят из датчика, детектора для обнаружения медленных нейтронов и электронного устройства для подсчета и автоматической записи количества медленных нейтронов, попадающих в детектор за 1 с. Датчик обычно помещен в портативный зонд. В конце зонда расположен источник быстрых нейтронов интенсивностью $5 \times 10^4 \dots 10^5$ нейтр/с. В датчике установлен свинцовый экран, а за ним гамма-счетчик, заключенный в серебряную фольгу. Медленные нейтроны, образовавшиеся при взаимодействии быстрых нейтронов с водородом воды, ударяясь о фольгу, вызывают ядерную реакцию, в результате которой образуется поток бета-частиц. Интенсивность потока бета-частиц, которая обычно пропорциональна влажности материала, регистрируется счетчиком. Измерение влажности нейтронным влагомером длится 20..40 с, т.е. значительно меньше, чем определение влажности традиционным методом. Расхождение между показаниями влагомеров и обычным способом определения влажности не достигают $\pm 0,5\%$ при влажности материала от 2 до 12%. Влагомерами можно определять количество воды в любом материале – твердом, жидком и парообразном.

Результаты исследований выполнены при использовании рототабельного планирования эксперимента.

Таблица 1.

Кодирование и пределы изменения влияющих факторов $\lambda = F(\gamma, t_6)$

№ п/п	Факторы	Пределы изменения					Интервал варьирования
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	Объемный вес минваты, кг/м ³ [x ₁]	32	56	116	176	200	60
2	Температура минваты, γ [x ₂]	-20	60	160	260	300	100

Таблица 2.

Планирование и реализация исследований, описывающих взаимосвязи $\lambda = F(\gamma, t_6)$

№ п/п	Матрицы				Результаты исследований	
	планирования		рабочая		λ	
	X_1	X_2	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$t_6, \text{°C}$	$y_1, \text{Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$	$y_2, \text{Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$
1	+	+	176	260	0,0554	0,0554
2	-	+	56	260	0,0804	0,0804
3	+	-	176	60	0,0376	0,0376
4	-	-	56	60	0,0396	0,0396
5	-1,414	0	32	160	0,0633	0,0633
6	+1,414	0	200	160	0,0442	0,0442
7	0	-1,414	116	-20	0,0321	0,0321
8	0	+1,414	116	300	0,0735	0,0735
9	0	0	116	160	0,0492	0,0492
10	0	0	116	160	0,0492	0,0492
11	0	0	116	160	0,0492	0,0492
12	0	0	116	160	0,0492	0,0492
13	0	0	116	160	0,0492	0,0492

Для построения математической модели взаимосвязи $\lambda = F(\gamma, t_6)$, описывающей зависимость изменения величины коэффициента теплопроводности, находящегося в пределах $0,029 \leq \lambda \leq 0,088 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$, от одновременного влияния величины объемной массы и температуры утеплителя, наиболее предпочтительным является полином второй степени

$$y_{po} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2, \text{ где: } X_1 \leftrightarrow \gamma \text{ кг/м}^3; X_2 \leftrightarrow t_6, \text{°C.}$$

Получена адекватная математическая модель вида

$$\lambda = 0,03419 - 0,000107\gamma + 0,0002 t_6 - 0,000001\gamma t_6 + 0,0000001\gamma^2 + 0,00000004 t_6^2 \quad (3)$$

Адекватность и предпочтение представленной модели характеризуется следующими показателями: величиной критерия Фишера $F = 6,671$, коэффициентом корреляции $R = 0,997982$, величиной остаточного среднего квадратичного отклонения $S_{ocm} = 0,001$, точностью расчетов $d = 0,403$. Показатели гладкости функции: нулевая величина минимальной кривизны, величина средней кривизны составила $0,004097$. Показатели полной кривизны по Гауссу в отдельной точке: минимальная величина равна нулю, средняя величина $-0,003556$, что является подтверждением предположения о нелинейности характера взаимосвязи между величиной коэффициента теплопроводности и изменяющейся температурой. Высокая точность построенной модели подтверждается результатами анализа ошибок измерений, расчетом однородности дисперсии. Дисперсия одного измерения $max s^2 = 0,000002$; средняя квадратичная ошибка одного измерения $0,001414$; коэффициент Кохрена $q_0 = 0,18$ при допустимой величине, равной $0,68$; дисперсия эксперимента $z^2 y = 0,000001$; средняя квадратичная ошибка эксперимента $z_0 = 0,001$; степень свободы меньшей дисперсии $f_1 = 4$, большей дисперсии $f_2 = 3$.

Предел изменения величины коэффициента теплопроводности в изменяющихся температурных условиях использования минеральной ваты с различной объемной массой составляет $0,0396 \leq \lambda \leq 0,0804$ или в 2,3 раза.

Определение формы двухфакторной взаимосвязи изменения коэффициента теплопроводности пенопласта при одновременном изменении его влажности и температуры изделия основано на доступных методах регрессионного анализа.

Как и в предыдущем параграфе, результаты исследований выполнены при использовании рототабельного планирования эксперимента. В этом случае дисперсия одного измерения $\text{max} s^2 = 0,00000032$; средняя квадратичная ошибка одного измерения $0,000566$; коэффициент Кохрена $q_0 = 0,213$ при допустимой величине, равной $0,68$; дисперсия эксперимента $z^2 y = 0,00000016$; средняя квадратичная ошибка эксперимента $z_0 = 0,0004$; степень свободы меньшей дисперсии $f_1 = 4$; большей дисперсии $- f_2 = 3$.

Таблица 3.

Кодирование и пределы изменения влияющих факторов $\lambda = F(w, t_6)$

№ п/п	Факторы	Пределы изменения					Интервал варьирования
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	Влажность пенопласта, % $[x_1]$	0,9	5	15	25	29,1	10
2	Температура пенопласта, $\gamma [x_2]$	-47	-30	10	50	67	40

Таблица 4.

Планирование и реализация исследований, описывающих взаимосвязи $\lambda = F(w, t_6)$

№ п/п	Матрицы				Результаты исследований	
	планирования		рабочая		λ	
	x_1	x_2	γ , кг/м ³	t_6 , °C	y_1 , Вт/(м°C)	y_2 , Вт/(м°C)
1	+	+	25	50	0,0741	0,0743
2	-	+	5	-30	0,0356	0,0360
3	+	-	25	-30	0,0654	0,0656
4	-	-	5	-30	0,0443	0,0447
5	-1,414	0	0,9	10	0,0405	0,0403
6	+1,414	0	29,1	10	0,0820	0,0828
7	0	-1,414	15	-47	0,0488	0,0482
8	0	+1,414	15	-67	0,0481	0,0487
9	0	0	15	10	0,0485	0,0487
10	0	0	15	10	0,0488	0,0489
11	0	0	15	10	0,0488	0,0482
12	0	0	15	10	0,0484	0,0487
13	0	0	15	10	0,0483	0,0489

При построении математической модели взаимосвязи $\lambda = F(w, t_6)$, описывающей зависимость изменения величины коэффициента теплопроводности, находящегося в пределах $0,035 \leq \lambda \leq 0,088$ Вт/(м°C), от одновременного влияния величины влажности и температуры утеплителя наиболее предпочтительным оказался полином второй степени

$$y_{po} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \text{ где: } x_1 \leftrightarrow w \%; x_2 \leftrightarrow t_6, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Получена адекватная математическая модель вида

$$\lambda = 0,042292 - 0,000537w + 0,000163 t_6 - 0,000011 w t_6 + 0,000064 w^2 \quad (4)$$

Адекватность и предпочтительность представленной модели характеризуется следующими показателями: величиной критерия Фишера $F = 5,2951$, коэффициента корреляции $R = 0,999972$, величиной остаточного среднего квадратичного отклонения $S_{ост} = 0,00009$, точностью расчетов $d = 0,006$. Показатели гладкости функции: нулевая величина минимальной кривизны, величина средней кривизны составила

0,006375. Показатели полной кривизны по Гауссу в отдельной точке: минимальная величина равна – 0,000019, средняя величина – 0,000019, что является подтверждением гипотезы о нелинейности характера взаимосвязи между величиной коэффициента теплопроводности и изменяющейся температурой.

Получены адекватные математические модели, описывающие взаимосвязи изменения величины коэффициента теплопередачи материала утеплителя при одновременном воздействии: изменяющейся температуры и объемной массы (для минеральной ваты) изменяющейся температуры и влажности (для пенопласта), что позволяет экономить до 40% используемой энергии на технологические потребности возведения зданий из монолитного бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bobko F.A. :Optimalizacja potencjału energetycznego teżenia mieszanki w aspekcie za pewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i elementów konstrukcyjnych. Wzniki badan. Podstawy modelowania i prognozowania. Monografia NR 47; ISBN 83-85031-95-2; ISSN 0860-5017./Politechnika Czestochowska (RP). - Czestochowa, 1997.s.243.
2. ГОСТ 17177-71. Термоизоляционные материалы.
3. PN-89/B-04620 Materiały i wyroby termoizolacyjne. Terminologia i klasyfikacja.

УДК 693.5/547.3

Бобко Ф.А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Теоретические основы энергосберегающих строительных технологий разработаны и представлены небольшим, с сожалением для строительной науки и практики, количеством трудов [1, 2, 3] и, что еще хуже, это факт отсутствия в стране направления, обеспечивающего пути исследования и эффективного использования *энергетического потенциала технологических процессов*, реализуемых как силами механического при укладке (монтаже) встраиваемых материалов (изделий) в конструкцию здания (сооружения), так и силами теплофизического взаимодействия.

Еще в начале 80-х годов автором статьи был разработан и прочитан курс лекций, по этой проблеме, предусмотренный в спецкурсе для студентов Брестского инженерно-строительного института, специальности СХС «Проблемы и перспективы сельскохозяйственного строительства». В настоящее время, начиная с 1992 года, в специальном курсе «Теоретические основы энергосберегающих строительных технологий», изучаемом студентами Политехнической (РП), направления и методы анализа технологических процессов строительного производства при помощи энергетических показателей расширены (Схема 1).

Технология строительных процессов, осуществляемых в соответствии с закономерностями преобразования механической энергии при производстве строительномонтажных работ, основывается на положениях закона сохранения механической энергии. В инерционной системе отсчета, что представлено в начальном курсе элементарной механики, (системе в которой справедлив закон инерции, материальная точка, на которую не действуют никакие силы, находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения) механическая энергия замкнутой системы, в которой нет диссипативных сил, остается постоянной в процессе движения. Так ра-