

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАКТОРНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ УТЕПЛИТЕЛЕЙ

Простроение адекватной математической модели изменения величины коэффициента теплопроводности конструктивных элементов теплозащитного ограждения опалубочных форм, предназначенных для выдерживания бетона в условиях пониженных температур, под влиянием изменяющейся влажности утеплителя [1], является одной из приоритетных задач, обеспечивающих существенное снижение энергоемкости возведения зданий и сооружений.

Понимая наличие многофакторной зависимости рассматриваемых взаимосвязей, автор исследования считает, тем не менее, правомерным так же и использование однофакторных моделей, описывающих явления увеличения интенсивности остывания конструкции под влиянием повышения влажности материала утеплителя.

Путем экспериментальных и теоретических исследований, что является продолжением исследований [2, 3], установлено влияние изменения величины влажности, наиболее часто применяемых высокоэффективных и местных теплоизоляционных материалов, на изменение величины коэффициента теплопроводности этих же материалов и построены однофакторные математические модели взаимосвязи коэффициента теплопередачи и влажности утеплителей.

Представлены однофакторные математические модели для определения формы связи между коэффициентом теплопроводности и влажностью изоляционного материала для рассматриваемых двух групп теплозащитных ограждений опалубочных форм:

- высокоэффективные утеплители, изготовленные на неорганической и органической основе (пенопласт плотностью  $16 \text{ кг/м}^3$ ; пенопласт плотностью  $18 \text{ кг/м}^3$ ; вспененный пенопласт, выполненный непрерывным методом; жесткая пена из полуретана плотностью  $40 \text{ кг/м}^3$ ; минеральная вата;
- утеплители на основе местных материалов (соломенные маты, льнокастрочные плиты, фибролит и др.).

Исследование изменения теплофизических характеристик *пенопласта* плотностью  $16 \text{ кг/м}^3$ , и установление закономерности изменения коэффициента теплопроводности в пределах  $0,037 < \lambda < 0,088 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$  от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 30 \%$ , представлено результатами, помещенными в табл. 1. С увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает в 2,3 раза, что приводит к увеличению теплопотерь через теплое ограждение в 1,3÷1,4 раза по сравнению с сухим теплоизоляционным материалом.

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  описана адекватной моделью математической регрессии параболического типа; функция и аргумент которой представлены в табл. 1.

$$\lambda = 0,037 + 0,00026 \cdot w + 0,0000486 \cdot w^2 \quad (1)$$

Математическая модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 0,999713$ ; незначительной величиной среднего квадратичного отклонения; равной  $0,0004$  и высокой точностью формулы, в которой  $d = 0,0573 \%$ .

**Таблица 1.**

Изменение теплофизических характеристик пенопласта плотностью  $16 \text{ кг/м}^3$ , определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности для пенопласта, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,037	0,037
5	0,039	0,039
10	0,044	0,044
15	0,052	0,052
20	0,061	0,061
25	0,074	0,074
30	0,088	0,088

Параметры теплофизических характеристик пенопласта плотностью  $18 \text{ кг/м}^3$ , позволяющие установить закономерности изменения зависимости коэффициента теплопроводности в пределах  $0,038 < \lambda < 0,088 \text{ Вт/(м°C)}$  от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 25 \%$ , представлены в табл. 2. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает в 2,4 раза, что, соответственно, приводит к увеличению теплопотерь через теплозащитное ограждение в 1,4÷1,5 раза по сравнению с сухим материалом.

**Таблица 2.**

Изменение теплофизических характеристик пенопласта плотностью  $18 \text{ кг/м}^3$ , определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности для пенопласта, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,038	0,038
5	0,046	0,046
10	0,054	0,054
15	0,064	0,064
20	0,075	0,075
25	0,088	0,088

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  описана адекватной математической моделью параболического типа, в соответствии с которой

$$\lambda = 0,038 + 0,00132 \cdot w + 0,0000264 \cdot w^2 \quad (2)$$

Математическая модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 0,999766$ , незначительной величиной среднего квадратического отклонения, равной 0,0004 и высокой точностью формулы, в которой  $d = 0,00469 \%$ .

Параметры теплофизических характеристик вспененного пенопласта, изготовляемого при помощи непрерывного метода, позволяющие установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности материала, изменяющегося в пределах  $0,0253 < \lambda < 0,0382 \text{ Вт/(м°C)}$  от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 15 \%$ , представлены в табл. 3. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает в 1,5 раза, что, соответственно, приводит к увеличению теплопотерь в 1,2÷1,3.

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  имеет линейную зависимость, описана при помощи адекватной математической модели, в которой

$$\lambda = 0,0253 + 0,00086 \cdot w \quad (3)$$

**Таблица 3.**

Изменение теплофизических характеристик вспененного пенопласта, определяющее взаимосвязь  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности вспененного пенопласта, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,0253	0,0253
5	0,0296	0,0296
10	0,0339	0,0339
15	0,0382	0,0382

Математическая модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 1,0$  нулевой величиной среднего квадратического отклонения, и высокой точностью формулы, в которой  $d = 0,001$  %, что позволяет считать подтвержденной гипотезу о функциональной зависимости изменения коэффициента теплопроводности вспененного пенопласта с изменением его влажности.

Изменение величины теплофизических характеристик полиуретановой пены плотностью  $40 \text{ кг/м}^3$ , позволяют установить закономерности изменения зависимости коэффициента теплопроводности утеплителя в пределах  $0,018 < \lambda < 0,069 \text{ Вт/(м°C)}$  от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 30$  %. Данные представлены в табл. 4. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя в представленном пределе величина коэффициента теплопроводности возрастает в 3,8 раза что, соответственно, приводит к увеличению теплотерь через теплозащитное ограждение в 1.5÷1.6 раза по сравнению с сухим теплоизоляционным материалом.

**Таблица 4.**

Изменение теплофизических характеристик полиуретановой пены плотностью  $40 \text{ кг/м}^3$ , определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности полиуретановой пены, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,018	0,018
5	0,019	0,019
10	0,024	0,024
15	0,031	0,031
20	0,041	0,041
25	0,054	0,054
30	0,069	0,069

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  в этом случае описана адекватной математической моделью параболического типа, в которой

$$\lambda = 0,018 + 0,0006 \cdot w + 0,0000552 \cdot w^2 \quad (4)$$

Модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 0,99985$ , незначительной величиной среднего квадратического отклонения, равной  $0,0003$  и высокой точностью формулы, в которой  $d = 0,0301$  %. Анализируя пределы изменения коэффициента теплопроводности высокоэффективных и, по-этому, дорогостоящих термоизоляционных материалов под воздействием проникающей в ее толщу влаги, можно утверждать, что более 50 % потерь тепла происходит из-за увлажнения материала теплозащитного ограждения возводимых и эксплуатируемых конструкций.

Исследованные величины теплофизических характеристик дешевых местных утеплителей, таких как соломенные маты, позволяют установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности материала, изменяющегося в пределах  $0,0769 < \lambda < 0,3028 \text{ Вт/(м°C)}$  от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w$

< 25 %, Данные представлены в табл. 5. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает в 4 раза, что, соответственно, приводит к увеличению теплопотерь через тепловое ограждение в 1,6-1.7 раза по сравнению с сухим теплоизоляционным материалом.

**Таблица 5.**  
Изменение теплофизических характеристик соломенных матов, определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности соломенных матов, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,0769	0,0769
5	0,1235	0,1235
10	0,1700	0,1700
15	0,2166	0,2166
20	0,2632	0,2632
25	0,3098	0,3098

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  описана при помощи адекватной математической модели линейного типа, в которой

$$\lambda = 0,07689 + 0,00932 \cdot w \quad (5)$$

Математическая модель зависимости характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 1,0$  незначительной величиной среднего квадратического отклонения, равной 0,000032 и стопроцентной точностью формулы, в которой  $d = 0,000$  %, что позволяет считать подтвержденной гипотезу о линейной зависимости изменения величины коэффициента теплопроводности соломенных матов от изменения их влажности.

Исследование параметров теплофизических характеристик льнокастричных плит, позволяют установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности материала, изменяющегося в пределах  $0,0348 < \lambda < 0,1469$  Вт/(м°C) от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 25$  %. Данные представлены в табл. 6. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает так же в 4,2 раза.

**Таблица 6.**  
Изменение теплофизических характеристик льнокастричных плит, определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$

Влажность, $w$ , %	Коэффициент теплопроводности льнокастричных плит, $\lambda$ , Вт/(м°C)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,0348	0,0348
5	0,0572	0,0572
10	0,0796	0,0796
15	0,1020	0,1020
20	0,1245	0,1245
25	0,1469	0,1469

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  описана при помощи адекватной математической модели линейного типа, в которой

$$\lambda = 0,03478 + 0,00448 \cdot w \quad (6)$$

Модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 1,0$  незначительной величиной среднего квадратического отклонения, равной 0,000032 и стопроцентной точностью формулы, в которой  $d = 0,000$  %, что позволяет считать подтвержденной гипотезу о линейной зависимости изменения коэффициента теплопроводности льнокастричных плит от изменения их влажности.

Исследование параметров теплофизических характеристик *фибrolита*, позволяют установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности материала, изменяющегося в пределах  $0,0771 < \lambda < 0,3329$  Вт/(м°С) от содержания влаги, изменяющегося в пределах  $0 < w < 25$  %. Данные представлены в табл. 7. Установлено, что с увеличением влажности материала утеплителя величина коэффициента теплопроводности возрастает так же в 4,3 раза.

**Таблица 7.**

*Изменение теплофизических характеристик фибrolита, определяющее взаимосвязи  $\lambda = F(w)$*

Влажность, w, %	Коэффициент теплопроводности фибrolита, $\lambda$ , Вт/(м°С)	
	данные экспериментов	теоретические данные
0	0,0771	0,0771
5	0,1283	0,1283
10	0,1794	0,1794
15	0,2306	0,2306
20	0,2817	0,2817
25	0,3329	0,3329

Однофакторная взаимосвязь  $\lambda = F(w)$  описана при помощи адекватной математической модели линейного типа, в которой

$$\lambda = 0,07711 + 0,01023 \cdot w \quad (7)$$

Математическая модель характеризуется высоким значением коэффициента корреляции  $R = 1,0$  незначительной величиной среднего квадратического отклонения, равной 0,000029 и высокой точностью формулы, в которой  $d = 0,000$  %, что позволяет считать подтвержденной гипотезу о функциональной связи и линейной зависимости изменения коэффициента теплопроводности соломенных матов от изменения их влажности.

Установлен тип взаимосвязи и построены математические модели, описывающие взаимозависимости изменения теплопроводности представителей двух групп теплоизоляционных материалов под воздействием изменяющейся величины влажности материала, что позволяет обеспечить снижение энергоемкости строительных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко В.И., Осипова В.А., Сукомел А.С.: Теплопередача. Изд. Энергия, Москва, 1975 г.
2. Tye R. P.: Aging of cellular plastics - a comprehensive bibliography. "Jornal of Thermal Insulation", 1988 nr 11, 196-222.
3. Bobko F.A. :Optimalizacja potencjału energetycznego teżenia mieszanki w aspekcie zapewnienia 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.