

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОЛЕЙ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НЕКОТОРЫХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Езерский¹, Т.Ф. Ельчищева²

*Белостокский политехнический институт, Республика Польша (1);
Кафедра «Архитектура и строительство зданий», ГОУ ВПО «ТГТУ» (2)*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гатаповой

Сущность проблемы и обоснование актуальности исследования

Повышение требований по теплозащите ограждающих конструкций зданий диктует необходимость использования слоистых ограждений, состоящих из традиционных каменных материалов и эффективных плитных утеплителей. Однако теплоизоляционные свойства слоев, составляющих ограждающие конструкции, могут изменяться вследствие накопления в поровом пространстве стеновых материалов гигроскопических солей. Последние либо вводятся целенаправленно как противоморозные добавки, либо попадают из окружающей среды вследствие широкого распространения солей в природе, производственной и хозяйственной деятельности человека. Наличие солей наблюдается не только в поверхностных слоях ограждений. Соли также достаточно равномерно распределяются по всей толщине наружных стен. Сезонные колебания влагосодержания стенового материала вызывают образование из солевых растворов кристаллов солей (безводных или кристаллогидратов) с теплопроводностью, в несколько раз превышающей теплопроводность скелета материала и в десятки раз – теплопроводность внутрипорового вещества незасоленного материала. Это обстоятельство требует учета в теплотехнических расчетах изменения теплопроводности стеновых материалов, вызванного наличием солей.

Постановка задачи, выбор факторов и функции цели

В работе поставлена задача изучить в лабораторных условиях влияние гигроскопических солей на коэффициент теплопроводности выбранных стеновых материалов – силикатного и глиняного кирпича плотностью, соответственно, 1780 и 1800 кг/м³, а также плит из минеральной ваты плотностью 150 кг/м³. В качестве соли, вводимой в стеновой кирпич, выбран хлорид натрия NaCl (плотность кристаллов соли $\rho_c = 2,165$ г/см³, коэффициент теплопроводности кристаллов $\lambda_c = 9,98$ Вт/(м·°C)). В минераловатные плиты вводились растворы двух солей – сульфата калия K₂SO₄ ($\rho_c = 2,662$ г/см³, $\lambda_c = 8,8$ Вт/(м·°C)) и хлорида кальция CaCl₂ ($\rho_c = 2,515$ г/см³, $\lambda_c = 4,7$ Вт/(м·°C)).

Поскольку теплопроводность стеновых материалов тесно связана с влагосодержанием, а влага, в свою очередь, способна растворять соли, изменяя их свойства, то для выбранных материалов и солей рассматривалась зависимость коэффициента теплопроводности λ от массового солесодержания материалов c , %, и массового влагосодержания материалов ω , %.

Минимальное значение уровня фактора «влагосодержание» (« ω ») принято $\omega_1 = 0$. Промежуточные значения принимали для условий эксплуатации А и Б (определяются по [5] в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности территории РФ), тогда $\omega_2 = \omega_A$ и $\omega_3 = \omega_B$. Максимальное значение уровня ω

принимали с учетом предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в материале к концу периода влагонакопления $\Delta\omega_{\text{ср}}$, % (масс.), для условий эксплуатации Б, тогда $\omega_4 = \omega_B + \Delta\omega_{\text{ср}}$. Для силикатного кирпича промежуточные уровни ω составили 2; 4 и 6 % (масс.); для глиняного кирпича – 1; 2 и 3,5 % (масс.); для минераловатных плит – 2; 5 и 8 % (масс.).

Максимальное значение уровня фактора «солесодержание» («с») назначали по результатам натурных исследований зданий с солевой производственной средой. Для силикатного и глиняного кирпича уровни c составили 0; 1,5; 3,0 и 4,5 % (масс.); для минераловатных плит – 0; 4 и 8 % (масс.).

Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента по определению λ предварительно проводили засоление образцов-кубов стеновых материалов с длиной ребра силикатного кирпича 80 мм; глиняного кирпича – 65 мм; минераловатных плит – 60 мм согласно методике [1]. В каждый образец вводили разбавленный раствор соли, объем которой складывался из объема насыщенного раствора соли и дистиллированной воды, обеспечивающей необходимое содержание влаги в материале и равномерность распределения соли по объему образца. В качестве исходных использовали следующие насыщенные растворы: хлорида натрия с массовым содержанием соли $m_c = 26,416$ % и плотностью раствора $\rho_p = 1,196$ г/см³; сульфата калия с $m_c = 9,99$ % и $\rho_p = 1,010$ г/см³; хлорида кальция с $m_c = 42,69$ % и $\rho_p = 1,515$ г/см³. После засоления образцы выдерживали в течение 10 дней под воздухопроницаемой пленкой.

В лабораторных условиях на опытной установке нестационарным импульсным методом с использованием линейного источника тепла измеряли коэффициент теплопроводности засоленных стеновых материалов [4]. Для каждого стенового материала величину λ измеряли на трех образцах-дублерах для каждого уровня изменяемого фактора. Коэффициент теплопроводности стеновых материалов определяли по методу температурно-временных интервалов и максимуму избыточной температуры. Время проведения одного опыта составляло 1–5 мин, что исключало высушивание образцов и обеспечивало определение λ без изменения фазового состава внутрипорового вещества.

Результаты эксперимента и их обработка

Результаты измерений коэффициента теплопроводности принятых материалов представлены в табл. 1. Для каждого уровня влагосодержания и солесодержания вычисляли такие статистические параметры, как средние значения коэффициентов теплопроводности отдельных опытов $\bar{x}_{\bullet j}$, их дисперсии S_j^2 и среднее квадратичное отклонение S . Нулевую гипотезу об однородности дисперсий отдельных групп нормально распределенных совокупностей проверяли по наблюдаемому значению критерия Кохрена $G_{\text{набл}}$. При числе выборочных дисперсий N , числе степеней свободы каждой дисперсии f и уровне значимости α наблюдаемое значение критерия Кохрена $G_{\text{набл}}$ для увлажненных материалов и $c=0$ оказалось равным: для силикатного кирпича 0,3345, для глиняного кирпича – 0,4021, для минераловатных плит – 0,3912. Полученные значения не превышали критического значения $G_{(0,05;2;4)} = 0,7679$. Следовательно, можно принять гипотезу об однородности дисперсий и назначить в качестве общей оценки дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов среднее арифметическое значение дисперсий отдельных уровней $S_{\{x\}}^2$ и среднее квадратичное отклонение $S_{\{x\}}$. Для выбранных

Таблица 1

**Коэффициент теплопроводности стеновых материалов,
содержащих соли и влагу**

ω, % (масс.)	с, % (масс.)	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С), образцов			$\bar{x}_{\bullet j}$
		1	2	3	
1	2	3	4	5	6
Глиняный кирпич					
0	0	0,5524	0,5302	0,5702	0,5509
	1,5	0,5800	0,5812	0,5715	0,5775
	3,0	0,6020	0,5913	0,6013	0,5982
	4,5	0,6120	0,6240	0,6315	0,6225
1	0	0,7525	0,6900	0,7970	0,7465
	1,5	0,7850	0,7985	0,8100	0,7978
	3,0	0,8340	0,8490	0,8575	0,8468
	4,5	0,8812	0,8990	0,9010	0,8937
2	0	0,8140	0,7520	0,8310	0,7990
	1,5	0,8420	0,8580	0,8635	0,8545
	3,0	0,8895	0,8923	0,9000	0,8939
	4,5	0,9502	0,9670	0,9720	0,9631
3,5	0	0,8700	0,7970	0,8835	0,8520
	1,5	0,8872	0,8930	0,9100	0,8967
	3,0	0,9312	0,9490	0,9517	0,9440
	4,5	0,9872	0,9980	1,0095	0,9982
Силикатный кирпич					
0	0	0,7100	0,7082	0,6800	0,6994
	1,5	1,0290	1,0196	1,0388	1,0291
	3,0	1,0889	1,0497	1,1286	1,0891
	4,5	1,3276	1,2963	1,3589	1,3276
2	0	0,9900	0,9800	0,9928	0,9876
	1,5	1,3451	1,3194	1,3714	1,3453
	3,0	1,0089	0,9901	1,0273	1,0088
	4,5	1,3111	1,2986	1,3228	1,3109
4	0	1,2400	1,2200	1,2438	1,2346
	1,5	0,9999	0,9880	1,0114	0,9998
	3,0	1,1907	1,1627	1,2203	1,1912
	4,5	1,1731	1,1715	1,1730	1,1731
6	0	1,3428	1,3610	1,3702	1,3580
	1,5	1,1588	1,1327	1,1855	1,1590
	3,0	1,4599	1,4284	1,4915	1,4599
	4,5	1,5926	1,6000	1,5856	1,5927
Минераловатные плиты + K ₂ SO ₄					
0	0	0,0488	0,0525	0,0484	0,0499
	4	0,0520	0,0511	0,0559	0,0530
	8	0,0530	0,0550	0,0564	0,0548

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
2	0	0,0563	0,0514	0,0539	0,0539
	4	0,0540	0,0530	0,0535	0,0535
	8	0,0545	0,0535	0,0585	0,0555
5	0	0,0768	0,0766	0,0769	0,0768
	4	0,0800	0,0811	0,0849	0,0820
	8	0,0851	0,0848	0,0881	0,0860
8	0	0,1014	0,1000	0,1028	0,1014
	4	0,1030	0,1083	0,1133	0,1082
	8	0,1097	0,1115	0,1088	0,1100
Минераловатные плиты + CaCl ₂					
0	0	0,0488	0,0525	0,0484	0,0499
	4	0,0513	0,0500	0,0547	0,0520
	8	0,0515	0,0520	0,0555	0,0530
2	0	0,0563	0,0514	0,0539	0,0539
	4	0,0516	0,0513	0,0525	0,0518
	8	0,0525	0,0535	0,0560	0,0540
5	0	0,0768	0,0766	0,0769	0,0768
	4	0,0611	0,0600	0,0634	0,0615
	8	0,0625	0,0645	0,0680	0,0650
8	0	0,1014	0,1000	0,1028	0,1014
	4	0,0790	0,0798	0,0812	0,0800
	8	0,0711	0,0704	0,0724	0,0713

материалов при уровне $c = 0$ вычисленные значения статистических параметров составили: для силикатного кирпича $S_{\{x\}}^2 = 1,26 \cdot 10^{-2}$, $S_{\{x\}} = 1,12 \cdot 10^{-1}$; для глиняного кирпича $S_{\{x\}}^2 = 1,8 \cdot 10^{-3}$, $S_{\{x\}} = 4,25 \cdot 10^{-2}$; для минераловатных плит $S_{\{x\}}^2 = 3,27 \cdot 10^{-6}$, $S_{\{x\}} = 1,81 \cdot 10^{-3}$.

Доверительные интервалы a_i определяли по формуле

$$(\bar{x}_{\bullet j} - \Delta_i) < a_i < (\bar{x}_{\bullet j} + \Delta_i); \quad \Delta = \frac{t_{\gamma} S_{\{x\}}}{\sqrt{n}},$$

где Δ – точность оценки; n – число наблюдений на каждом уровне; t_{γ} – определяется в соответствии с [2, прил. 3]; $\gamma = 0,95$. Для материалов, содержащих соли, значения $G_{\text{набл}}$, $G_{\text{кр}}$, $S_{\{x\}}^2$, $S_{\{x\}}$ и Δ представлены в табл. 2.

Интерпретация результатов эксперимента

Для проверки значимости влияния фактора «солесодержание» на коэффициент теплопроводности материалов при различных значениях влагосодержания проведен однофакторный дисперсионный анализ результатов лабораторного эксперимента, позволяющий выявить неравенство эффектов по крайней мере двух уровней фактора. Сравнивали факторную $S_{\text{факт}}^2$ и остаточную $S_{\text{ост}}^2$ дисперсии по

Таблица 2

Статистические параметры и доверительные интервалы значений коэффициента теплопроводности засоленных материалов

Наименование материала и соли	Кирпич силикатный + NaCl	Кирпич глиняный + NaCl	Минераловатные плиты + K ₂ SO ₄	Минераловатные плиты + CaCl ₂
$G_{\text{набл}}$	0,1619	0,1252	0,4820	0,2874
$G_{\text{кр}}$	$G_{(0,05;2;12)} = 0,3924$		$G_{(0,05;2;8)} = 0,5157$	
$S_{\{x\}}^2$	$2,03 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$6,88 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$
$S_{\{x\}}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$
t_{γ}	2,0302		2,0698	
n	36	12	24	
Δ	$4,82 \cdot 10^{-2}$	$5,98 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$7,77 \cdot 10^{-4}$

критерию Фишера–Снедекора (критерию F) [2]. Наблюдаемое значение критерия F определяли по формуле

$$F_{\text{набл}} = S_{\text{факт}}^2 / S_{\text{ост}}^2.$$

Критическую точку $F_{\text{кр}}$ определяли по [2, прил. 7] при $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S_{\text{факт}}^2$ и $S_{\text{ост}}^2$, соответственно, $p - 1$ и $p(n - 1)$; p – число уровней фактора «солесодержание».

При $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$ фактор «с» оказывает значимое влияние на коэффициент теплопроводности, причем может наблюдаться как значимое увеличение, так и значимое уменьшение λ .

Оказалось, что фактор «с» оказывает значимое влияние на λ силикатного и глиняного кирпича. Для минераловатных плит дисперсионный анализ не выявил значимого влияния на λ фактора «с» при уровнях $c = 4$ и $c = 8$ % (масс.) и $\omega = 0$; 2; 5; 8 % (масс.).

Однако дисперсионный анализ не дает информации о том, какие из уровней солесодержания оказывают значимое влияние на λ . Для выявления этого провели попарное сравнение средних с помощью метода множественного сравнения (Т-метода) Тьюки [2]. Для p уровней влияющего фактора существует $p(p - 1)/2$ пар выборочных средних, для которых допускается сравнение $\bar{x}_{\bullet j} - \bar{x}_{\bullet j^*}$, где

$j \neq j^*$. Для всех разностей вида $\bar{x}_{\bullet j} - \bar{x}_{\bullet j^*}$ рассчитывали студентизированный

размах $q_{\text{набл}}$ делением указанной разности на $\sqrt{S_{\text{ост}}^2/n}$. Значения критической точки $q_{\text{кр}}$ определяли со степенями свободы p и $p(p - 1)$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Всякое абсолютное значение полученной величины, превышающее $q_{\text{кр}}$, считали значимым.

Оказалось, что для силикатного кирпича при $\omega = 0$ значимое влияние на λ оказывают уровни $c = 1,5$; 3; 4,5 % (масс.); при $\omega = 2$ % (масс.) – уровни $c = 1,5$; 4,5 % (масс.).

Значимое влияние на λ глиняного кирпича при $\omega = 0; 1\%$ (масс.) оказывают уровни $c = 3; 4,5\%$ (масс.). При $\omega = 2\%$ (масс.) – оказывают уровни $c = 1,5; 3; 4,5\%$ (масс.). При $\omega = 3,5\%$ (масс.) – уровни $c = 3; 4,5\%$ (масс.). Для минераловатных плит при всех значениях ω назначенные уровни солесодержания не оказывают значимого влияния на λ .

Установлено, что фактор «солесодержание» оказывает значимое влияние на коэффициент теплопроводности в сторону его увеличения, преимущественно, при низком содержании влаги. Это связано с тем, что при низкой влажности в поровом пространстве материалов присутствуют кристаллы солей с коэффициентом теплопроводности более высоким, чем у внутрипорового вещества и скелета материала. Значимое влияние в сторону уменьшения λ наблюдается при большей влажности материалов, это вызвано образованием в поровом пространстве растворов солей различной концентрации, теплопроводность которых ниже теплопроводности поровой влаги, а также снижением составляющей теплопередачи за счет диффузии пара над растворами по сравнению с диффузией над водой, не содержащей растворенных солей.

При выбранных для проведения эксперимента уровнях массового солесодержания наиболее заметным оказалось влияние фактора «с» на λ силикатного и глиняного кирпича (каменных материалов). Однако сравнение характера влияния солей на λ материалов с различной плотностью в зависимости от массового солесодержания c , % (масс.), может привести к ошибочным выводам вследствие различного фактического содержания соли в единице объема материала. Так, для каменных материалов при одинаковом значении c , %, масса соли в единице объема в 12 раз больше, чем для минераловатных плит вследствие того, что каменных материалов в 12 раз больше ρ минераловатных плит. Поэтому для анализа влияния солей на теплопроводность стеновых материалов с различной плотностью необходимо ввести одинаковую массу соли в одинаковые объемы образцов материалов, достигнув одинакового удельного солесодержания $c_{уд}$, г/см³. Массовое солесодержание определяется по формуле (1), удельное – по формуле (2):

$$c = m_c 100 / m_0 = m_c 100 / \rho V, \% \text{ (масс.)}, \quad (1)$$

где m_c – масса соли, вводимой в образец материала, г; m_0 – масса образца, высушенного при температуре 105 °С, г; ρ и V – плотность, г/см³, и объем материала, см³, соответственно;

$$c_{уд} = c \rho / 100, \text{ г/см}^2. \quad (2)$$

Тогда количество соли, содержащейся в одинаковых объемах исследуемых материалов с различной плотностью, будет одинаковым, и результаты сравнения влияния соли на λ будут корректными. Выдвинутое предположение было подтверждено расчетами на математической модели [3].

Выводы

Проведенное исследование подтвердило, что теплообмен в солесодержащих стеновых материалах имеет специфические особенности. Засоление стеновых материалов оказывает сложное влияние на величину коэффициента теплопроводности. Наличие кристаллов солей в поровом пространстве материалов повышает величину их коэффициента теплопроводности. В то же время увеличение влагосодержания засоленного материала приводит к растворению кристаллов солей и замедлению роста коэффициента теплопроводности вследствие эффекта пониже-

ния теплопроводности растворов солей и составляющей теплопередачи за счет диффузии паров воды над растворами (по сравнению с диффузией над поровой влагой, не содержащей растворенных солей). Поэтому при определенных уровнях влажности наличие соли не оказывает значимого влияния на коэффициент теплопроводности стеновых материалов.

При одинаковом удельном содержании соли в материалах с различной плотностью и прочих равных условиях наиболее значительное изменение коэффициента теплопроводности ожидается для материалов с низкой плотностью и высокой пористостью. Свойство солей образовывать кристаллогидраты при кристаллизации из солевых растворов должно учитываться при изучении теплопередачи в поровом пространстве стеновых материалов вследствие различия в величине коэффициента теплопроводности безводной соли и кристаллогидрата.

Список литературы

1. Аксенова, И.В. Методика лабораторного засоления строительных материалов / И.В. Аксенова, В.А. Езерский // Музееведение и охрана памятников. Реставрация и консервация музейных ценностей. ВНИИР. – 1981. – Вып. 6. – С. 18–22.
2. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1977. – 479 с.
3. Езерский, В.А. Применение метода математического моделирования для исследования теплопроводности минераловатных плит, содержащих водорастворимые соли / В.А. Езерский, Т.Ф. Ельчищева // Современные проблемы строительного материаловедения : материалы седьмых акад. чтений РААСН : в 2 ч. – Белгород, 2001. – Ч. 2. – С. 106–113.
4. Езерский, В.А. Установка для экспериментального определения теплофизических характеристик соледержащих стеновых материалов / В.А. Езерский, Т.Ф. Ельчищева // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 1999. – Вып. 4. – С. 132–136.
5. Тепловая защита зданий : СНиП 23–02–2003 : утв. Госстроем России 26.06.2003 : взамен СНиП II–3–79* : ввод. в действие с 01.10.2003. – М. : Госстрой России, ФГУП СПП, 2004. – 28 с.

Analysis of Salt Effect on Thermal Diffusivity of Some Wallings

V.A. Ezersky, T.F. Elchishcheva

*Belostock Polytechnic Institute, Belostock, Poland (1);
Tambov State Technical University (2)*

Analyse der Salzeinwirkung auf die Wärmeleitfähigkeit der einigen Wandstoffe

Analyse de l'influence des sels sur la conductibilité de la chaleur de certains matériaux de parois