

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛЕЙ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

В.А. Езерский<sup>1</sup>, Т.Ф. Ельчищева<sup>2</sup>

*Кафедра “Основы строительства и строительная физика”  
Белостокского политехнического института (Республика Польша), (1);  
Кафедра “Архитектура и строительство зданий”, ТГТУ (2)*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** взаимопроникающие компоненты; внутрипоровое вещество; гигроскопические соли; комбинированная структура; коэффициент теплопроводности; кристаллогидрат; пеносиликат; структура с вкраплениями.

**Аннотация:** Исследован коэффициент теплопроводности пеносиликата, содержащего влагу и соли, с помощью метода математического моделирования. Выявлены основные закономерности влияния физико-химических свойств солей на коэффициент теплопроводности.

---

### 1 Введение

Соли широко распространены в природе, производственной и хозяйственной деятельности человека. Из-за высокой проникающей способности в виде растворов и аэрозолей они с течением времени накапливаются в наружных стенах зданий некоторых промышленных предприятий и памятников архитектуры. Благодаря способности понижать температуру точки замерзания растворов, соли могут вводиться в стеновой материал монолитных зданий в качестве противоморозной добавки при зимнем бетонировании. Содержание солей в материале изменяет его теплофизические свойства, в том числе и коэффициент теплопроводности. Однако до настоящего времени не установлены основные закономерности влияния солей на теплопроводность, не выявлена связь между физико-химическими свойствами солей и степенью этого влияния.

В данной работе авторы приводят результаты исследования с помощью метода математического моделирования теплопроводности пеносиликата, содержащего влагу и различные по физико-химическим свойствам соли.

В качестве модельного материала выбран пеносиликат ( $\gamma = 650 \text{ кг/м}^3$ ) с объемом пор 75 %.

### 2 Построение модели для расчета теплопроводности ячеистого бетона, содержащего влагу и соли

В поровом пространстве стеновых материалов могут находиться следующие составляющие:

- сухой воздух;
- водяной пар;
- растворы солей или жидкая влага;
- кристаллическая соль.

Строгое описание теплопроводности стеновых материалов сложно, громоздко и потому неэффективно. В связи с этим при построении математической модели использовали упрощенные формулы обобщенной проводимости, широко используемые для расчетов тепло-, электропроводности и магнитной проницаемости неоднородных сред. В этом случае расчет эффективной теплопроводности системы сводится к расчету проводимости элементарной ячейки. Ячейка имеет форму куба, а теплопроводность системы является функцией проводимости скелета материала и внутрипорового вещества  $\lambda = f(\lambda_{\text{ск}}, \lambda_{\text{впв}})$ .

При моделировании коэффициента теплопроводности пеносиликат, содержащий влагу и соли в поровом пространстве, рассматривался как условно гетерогенная система с комбинированной структурой (рис. 1, в), которая, в свою очередь, включает:

1) структуру с замкнутыми включениями, когда одна компонента непрерывна, а вторая – диспергирована (рис. 1, а). Этот тип структуры использовался при рассмотрении теплопроводности в системах:

- плотное вещество материала + кристаллы солей;
- воздух + водяной пар;
- водяной пар + жидкая влага (растворы солей).

2) структуру со взаимопроникающими компонентами, когда обе компоненты непрерывны (рис. 1, б). Такой тип структуры выбран при описании теплопроводности в системах:

- растворы солей (условный 100 %-й раствор соли + вода);
- твердая фаза материала (плотное вещество материала с кристаллами солей) + внутрипоровое вещество.

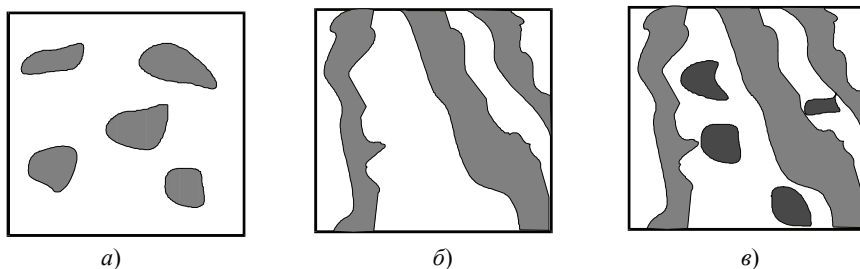
Расчеты теплопроводности системы “твердая фаза материала + внутрипоровое вещество” производили по формуле, приведенной в [1]

$$\lambda = \left[ 1 - m_2 \left( \frac{1}{1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} - \frac{1 - m_2}{3} \right)^{-1} \right] \lambda_1, \quad (1)$$

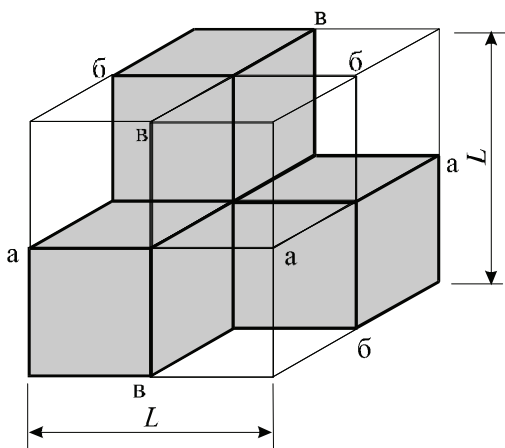
где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности, соответственно, твердой фазы и внутрипорового вещества, Вт/(м·°С);  $m_2$  – объемная концентрация включения.

Для оценки теплопроводности растворов солей и системы “твердая фаза материала + внутрипоровое вещество” использовали формулу (2), которая дает достаточно точные результаты без учета изотермического дробления (рис. 2) [1]:

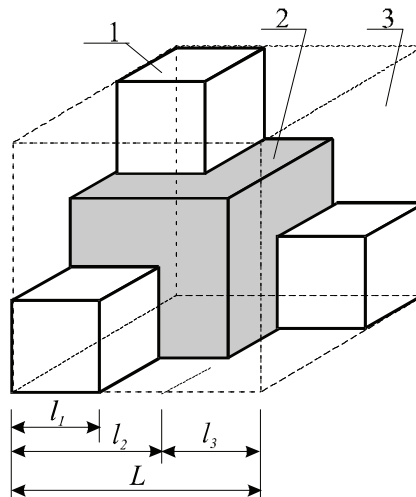
$$\lambda_a = \lambda_1 \left[ C^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C (1 - C) \cdot \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)^{-1} \right], \quad (2)$$



**Рис. 1 Типы структур неоднородных сред:**  
*а* – с изолированными включениями; *б* – с взаимопроникающими компонентами;  
*в* – комбинированная



**Рис. 2** Структура с взаимопроникающими компонентами (1/8 часть элементарной ячейки) и схемы дробления изотермическими (*a-a*) и адиабатическими (*б-б* и *в-в*) плоскостями



**Рис. 3** Модель влажных пористых материалов:

1 – твердая фаза; 2 – жидкая фаза;  
3 – парогазовая смесь

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности компонентов, Вт/(м·°С);  $m_2$  – объемная концентрация второго компонента; параметр  $C$  связан с толщиной бруса скелета  $h$  и внешним размером ячейки  $L$

$$C = (h/l) / (1 + h/l).$$

Теплопроводность внутрипорового вещества ( $\lambda_{\text{впв}}$ ) определяли по-разному, в зависимости от его состава. При наличии в порах пеносиликата только сухого воздуха с теплопроводностью  $\lambda_{\text{в}}$  получаем  $\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}}$ . При наличии в порах воздуха и пара  $\lambda_{\text{впв}}$  определялась как сумма теплопроводности сухого воздуха и пара за счет диффузии по формуле (3)

$$\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}} + k\lambda_{\text{п}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент диффузии, который зависит от свойств материала и определяется из опытных данных.

Теплопроводность за счет диффузии пара определяли по формуле (4), предложенной О. Кришером [3]

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{DM}{RT} \cdot \frac{p}{p - p_{\text{п}}} \cdot \frac{dp_{\text{п}}}{dT} \cdot r, \text{ Вт/(м·К)} \quad (4)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии пара в воздухе для неограниченного пространства, м<sup>2</sup>/с;  $M$  – молекулярная масса пара;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура пара, К;  $p$  – суммарное давление пара и воздуха, Па;  $r$  – теплота парообразования жидкости, Дж/кг.

При наличии в порах пеносиликата паро-воздушной смеси (рис. 3) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1$  и жидкости (воды или раствора соли) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$  теплопроводность порового пространства  $\lambda_{\text{впв}}$  определяли, используя формулы [1], при угле смачивания, равном нулю:

$$\frac{\lambda_{\text{впв}}}{\lambda_1} = \overline{S_1} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \left[ \frac{\overline{\Delta S}}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \cdot \overline{l_2}} + \frac{2\overline{S_3}}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \cdot \overline{l_1}} + \overline{S_4} \right], \quad (5)$$

где  $\overline{S_1} = \left(\frac{\omega - \omega_c}{1 - \omega_c}\right)^{1,6}$  при  $\omega \leq 0,5$ ;  $\overline{S_1} = \left(\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}\right)^{1,6}$  при  $\omega > 0,5$ ;  
 $\overline{l_1} = \sqrt{\overline{S_1}}$ ;  $\overline{l_2} = \sqrt[3]{\overline{\omega_c}}$ ;  $\overline{S_2} = \overline{l_2}^2$ ;  $\overline{S_3} = (1 - \overline{l_2}) \cdot \overline{l_1}$ ;  $\overline{S_4} = 1 - \overline{S_2} - 2\overline{S_3}$ ;  $\overline{\Delta S} = \overline{S_2} - \overline{S_1}$ ,

где  $\omega$  – объемное содержание влаги в материале.

При подготовке к расчетам определялись параметры модели. Для определения диффузной составляющей  $\lambda_{\text{пр}}$ , Вт/(м·°С), процесса теплопередачи в увлажненном материале, содержащем растворы солей, требуются данные о величине теплоты испарения воды  $r_p$ , Дж/кг, из насыщенных солевых растворов. Теплота испарения может быть представлена аналитической зависимостью

$$r_p = \frac{(\ln F - \ln p_{\text{пр}})RT}{M}, \quad (6)$$

где  $p_{\text{пр}}$  – давление водяного пара над раствором, Па;  $F=C/D$  – параметр, не зависящий от площади поверхности воды;  $C$  – коэффициент, пропорциональный площади поверхности испарения;  $D$  – коэффициент, пропорциональный поверхности конденсации;  $R, T, M$  – то же, что в формуле (4).

Тогда теплопроводность паро-воздушной смеси над раствором соли:

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{DM}{RT} \cdot \frac{p}{p - p_{\text{пр}}} \cdot \frac{dp_{\text{пр}}}{dT} \cdot r_p, \text{ Вт/(м·К)}. \quad (7)$$

В случае насыщенных растворов или растворов, близких к насыщению, давление насыщенного водяного пара  $p_p^{\text{н}}$ , Па, рассчитывали по формуле, приведенной в [4]

$$p_p^{\text{н}} = \varphi_r^{\text{н}} p_p^{\text{н}} / 100. \quad (8)$$

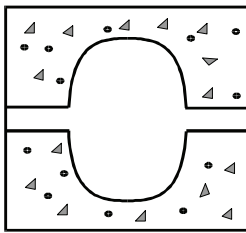
Теплота испарения воды из раствора соли определяется умножением теплоты испарения воды на поправочный коэффициент  $f$

$$f = r_p / r_{\text{вод}} = r_p / (2,48 \cdot 10^6),$$

тогда

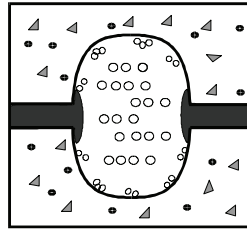
$$\lambda_{\text{пр}} = 47,1082 \cdot \frac{dp_{\text{пр}}}{dT} \cdot \frac{f}{99975 - p_{\text{пр}}} = \frac{78,153 \cdot \varphi_r^{\text{н}} \cdot f}{99975 - p_{\text{пр}}}. \quad (9)$$

При расчете с использованием модели рассматривали 11 возможных состояний внутрипорового вещества (рис. 4). Алгоритм расчета коэффициента теплопроводности представлен в виде блок-схемы (рис. 5) и реализован в виде программы для персонального компьютера на языке C++. Алгоритм расчета состоял из двух частей. В первой части вычислялись объемные концентрации компонентов, коэффициент теплопроводности внутрипорового вещества  $\lambda_{\text{впв}}$ , а также коэффициент теплопроводности твердой фазы материала  $\lambda_{\text{тф}}$ ; во второй части – объ-



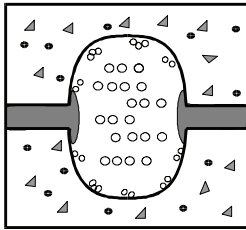
**ВАРИАНТ 1**

$\omega = 0,$   
 $c = 0$   
 $\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}}$



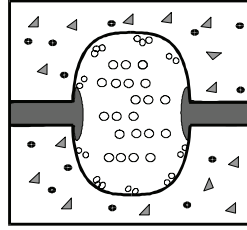
**ВАРИАНТ 6**

$\omega_p \leq \omega < 7,5 \%$ ;  
 $c > 0$ ;  
 $c_p = c_{\text{н}}$



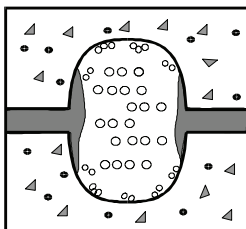
**ВАРИАНТ 2**

$0 < \omega < 7,5 \%$ ;  
 $c = 0$ ;  
 $\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}}$



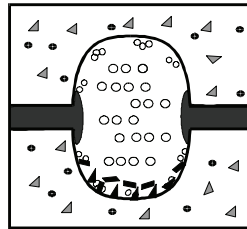
**ВАРИАНТ 7**

$\omega_p < \omega < 7,5 \%$ ;  
 $c > 0$ ;  
 $c_p < c_{\text{н}}$



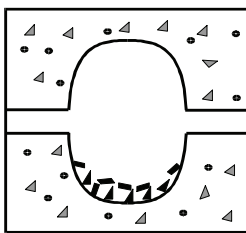
**ВАРИАНТ 3**

$\omega > 7,5 \%$ ;  
 $c = 0$



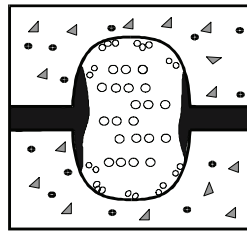
**ВАРИАНТ 8**

$\omega_p < \omega < 7,5 \%$ ;  
 $c > 0$ ;  
 $c_p > c_{\text{н}}$   
 $\lambda_{\text{впв}}$  – по формуле (3)



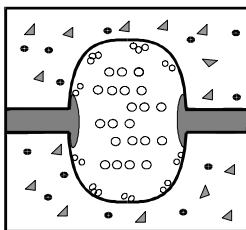
**ВАРИАНТ 4**

$\omega = 0,$   
 $c > 0$   
 $\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}}$



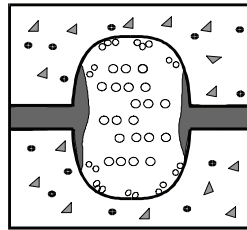
**ВАРИАНТ 9**

$\omega > 7,5 \%$ ;  
 $c > 0$ ;  
 $c_p = c_{\text{н}}$   
 $\lambda_{\text{впв}}$  – по формуле (3);



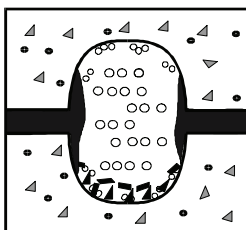
**ВАРИАНТ 5**

$\omega < \omega_p,$   
 $c > 0$   
 $\lambda_{\text{впв}} = \lambda_{\text{в}}$



**ВАРИАНТ 10**

$\omega > 7,5 \%$ ;  
 $c > 0$ ;  
 $c_p < c_{\text{н}}$   
 $\lambda_{\text{впв}}$  – по формуле (3)



**ВАРИАНТ 11**

$\omega > 7,5 \%$ ;  
 $c > 0, c_p > c_{\text{н}}$   
 $\lambda_{\text{впв}}$  – по формуле (3)

**Рис. 4 Состав внутрипорового вещества пеносиликата**

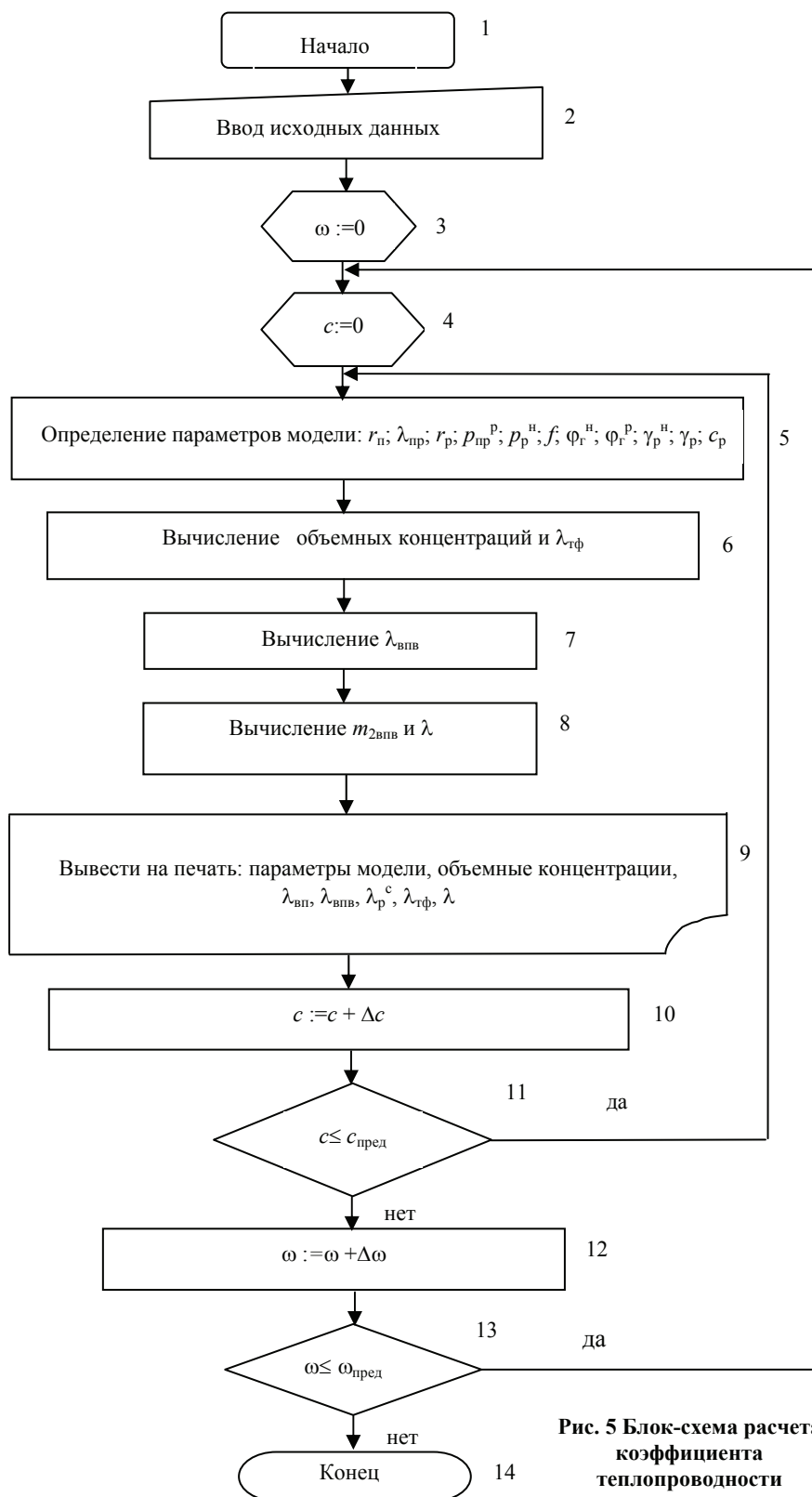


Рис. 5 Блок-схема расчета коэффициента теплопроводности

емная концентрация внутривещного вещества в целом  $m_{2впв}$  и коэффициент теплопроводности засоленного пеносиликата  $\lambda$ .

Коэффициент теплопроводности пеносиликата исследовали при массовом содержании влаги ( $\omega$ ) 0...18 % (масс.) и соли 0...18 % (масс.), что соответствует удельному содержанию соли 0...81 г/дм<sup>3</sup>.

### 3 Результаты исследования коэффициента теплопроводности с использованием математической модели

Результаты расчетов коэффициента теплопроводности пеносиликата, содержащего влагу и некоторые соли, представлены как функция от двух аргументов  $\lambda = f(\omega, c)$  на рис. 6 – 9 в виде изолиний уровней отклика.

Для сухого пеносиликата соли повышают  $\lambda$  во всем диапазоне изменения солесодержания. Увеличение влагосодержания незасоленного материала также ведет к повышению его коэффициента теплопроводности.

При наличии в пеносиликате одновременно влаги и соли картина значительно усложняется. Вид соли, содержащейся в поровом пространстве пеносиликата, оказывает определяющее влияние на изменение коэффициента теплопроводности материала. Однако затруднительно выявить связь изменения коэффициента теплопроводности с отдельными свойствами солей (плотностью, коэффициентом теплопроводности кристаллов, растворимостью и гигроскопичностью). Это вызвано тем, что для рассматриваемых солей указанные и другие свойства изменялись без какого-либо определенного интервала, а лишь случайным образом. Установить же закономерности возможно было лишь при варьировании одного свойства соли и стабилизации значений остальных свойств. Предварительный анализ физико-химических свойств 44-х изучаемых солей показал, что из них невозможно отобрать соли, отвечающие выше названным требованиям для проведения вычислительного эксперимента.

Исходя из этого нами было принято решение произвести расчет коэффициента теплопроводности для гипотетических солей, для которых стабилизировались на среднем уровне три фактора и варьировались значения четвертого (табл. 1).

Изучение характера влияния плотности кристаллов солей ( $\gamma_c$ ) на  $\lambda$  (рис. 6) показало, что  $\lambda$  пеносиликата, содержащего соли с низким значением плотности кристаллов, выше, чем  $\lambda$  пеносиликата, содержащего соли с высоким  $\gamma_c$  (табл. 1). Увеличение количества влаги снижает влияние плотности кристаллической соли на проводимость материала в целом (рис. 6). При солесодержании 81 г/дм<sup>3</sup> и  $\omega = 0$ , в сравнении с  $\lambda_0$  незасоленного материала, соль 1 повышает  $\lambda$  на 27 %, а соль 3 – на 11 %. Увеличение влаги в материале до значений, соответствующих условиям эксплуатации А ( $\omega_A = 8$  % (масс.)) и Б ( $\omega_B = 12$  % (масс.)) приводит к снижению эффекта повышения  $\lambda$ . Коэффициент теплопроводности пеносиликата, содержащего соль 1 при  $\omega = \omega_A$  и  $\omega = \omega_B$ , увеличивается, соответственно, на 66,6 и 47,7 %, а пеносиликата, содержащего соль 3 – лишь на 7,2 % при  $\omega = \omega_A$  и на 1,7 % при  $\omega = \omega_B$ .

Засоление пеносиликата солями с отличающимися коэффициентами теплопроводности кристаллов ( $\lambda_c$ ) приводит к более быстрому росту  $\lambda$  при больших значениях  $\lambda_c$  (рис. 7). В случае засоления солями 4 и 6 (при удельном содержании солей 81 г/дм<sup>3</sup>) коэффициент теплопроводности сухого пеносиликата повышается, соответственно, на 4,4 и 23,8 %. Увеличение влаги снижает влияние  $\lambda_c$  на теплопроводность материала. Для пеносиликата, содержащего соли с низким  $\lambda_c$ , эффект повышения  $\lambda$  вследствие наличия твердой фазы снижается для одних солей

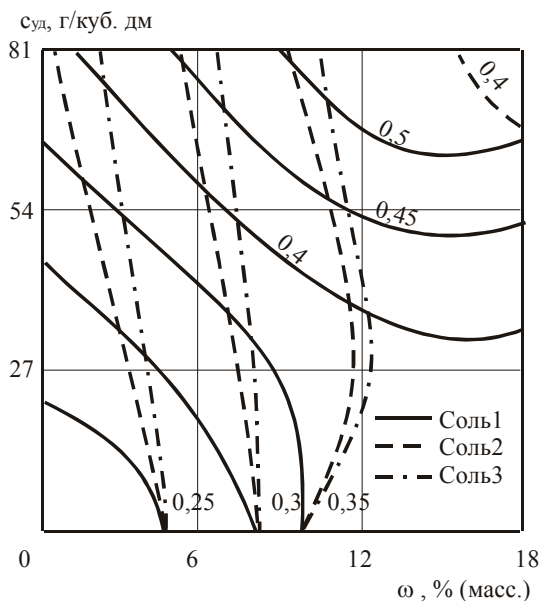


Рис. 6 Изолинии коэффициента теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от удельного солевого содержания  $c_{уд}$  и влагосодержания  $\omega$  при различной плотности исследуемых солей  $\gamma_c$ , г/см<sup>3</sup>:

соль 1 ( $\gamma_c = 1$ );  
 соль 2 ( $\gamma_c = 4$ );  
 соль 3 ( $\gamma_c = 7$ )

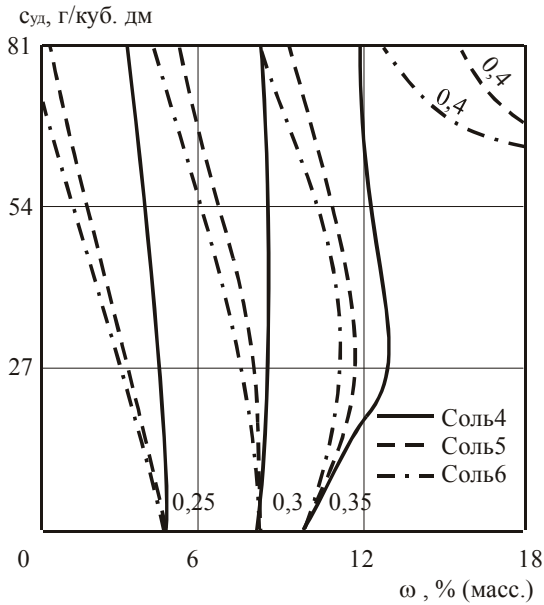
Таблица 1

**Физико-химические свойства солей, выбранных для изучения влияния отдельных факторов на коэффициент теплопроводности пеносиликата**

Фактор, влияющий на $\lambda$	Название соли	Физико-химические свойства солей			
		$\gamma_c$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda_c$ , Вт/(м·°С)	$c_{н}$ , % (масс.)	$\phi_r$ , %
Плотность кристалла	Соль 1	<b>1</b>	9	14	75
	Соль 2	<b>4</b>	9	14	75
	Соль 3	<b>7</b>	9	14	75
Коэффициент теплопроводности кристалла	Соль 4	4	<b>1</b>	14	75
	Соль 5	4	<b>9</b>	14	75
	Соль 6	4	<b>17</b>	14	75
Растворимость соли	Соль 7	4	9	<b>1</b>	75
	Соль 8	4	9	<b>14</b>	75
	Соль 9	4	9	<b>27</b>	75
Гигроскопичность соли	Соль 10	4	9	14	<b>60</b>
	Соль 11	4	9	14	<b>75</b>
	Соль 12	4	9	14	<b>90</b>

или полностью поглощается для других эффектом снижения  $\lambda$  из-за образования солевых растворов и уменьшения величины теплопередачи за счет диффузии паро-воздушной смеси. Величина снижения  $\lambda$  больше, соответственно, при малом количестве соли и большом количестве влаги и составляет для пеносиликата, содержащего соль 4, (при изменении  $c_{уд}$  от 27 до 54 г/дм<sup>3</sup>) 1,1...0,1 % для условий эксплуатации А и 5,0...4,1 % – для условий эксплуатации Б. Наличие в пеносили-





**Рис. 7** Изолинии коэффициента теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от удельного соледержания  $c_{уд}$  и влагосодержания  $\omega$  при различном коэффициенте теплопроводности кристаллов исследуемых солей  $\lambda_c$ :

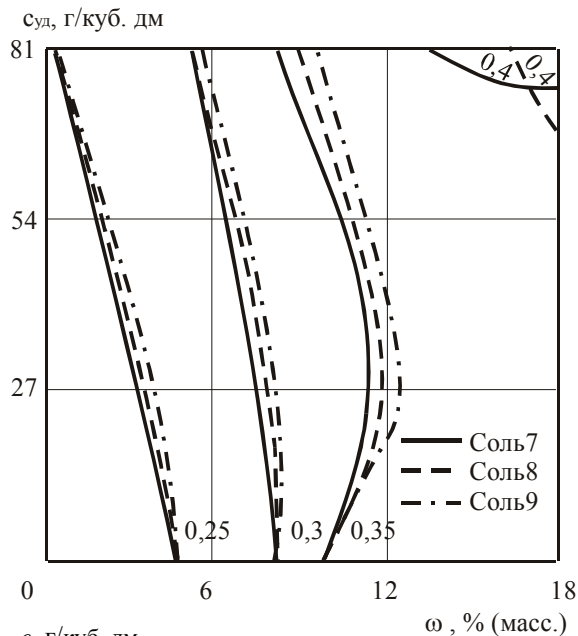
соль 4 ( $\lambda_c = 1$ );  
 соль 5 ( $\lambda_c = 9$ );  
 соль 6 ( $\lambda_c = 17$ )

коте соли 5 не снижает коэффициент теплопроводности при  $\omega = \omega_A$ , а при  $c_{уд} = 27$  г/дм<sup>3</sup> и  $\omega = \omega_B$  коэффициент теплопроводности снижается на 2,8 %. Однако, вследствие того, что коэффициент теплопроводности кристалла соли 5 выше, чем  $\lambda_c$  соли 4, эффект снижения  $\lambda$ , вызванный образованием растворов, перекрывается эффектом повышения  $\lambda$  вследствие наличия в порах материала кристаллической соли. При увеличении  $c_{уд}$  до 81 г/дм<sup>3</sup>  $\lambda$  пеносиликата повышается на 14 % (при  $\omega = \omega_A$ ) и на 6,9 % (при  $\omega = \omega_B$ ). Содержание в пеносиликате соли 6 в количестве 27...81 г/дм<sup>3</sup> увеличивает теплопроводность материала, соответственно, на 3,3...17,4 % (при  $\omega = \omega_A$ ) и на 3,6...9,6 % (при  $\omega = \omega_B$ ) и  $c_{уд} = 54...81$  г/дм<sup>3</sup>. В том случае, когда  $c_{уд} = 27$  г/дм<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности пеносиликата, содержащего соль 6, при  $\omega = \omega_B$ , снижается на 2,5 % (отн.).

Растворимость соли оказывает существенное влияние на  $\lambda$  пеносиликата в том случае, когда влаги в материале достаточно для образования растворов. Чем выше растворимость соли, тем больше ее переходит в раствор и медленнее повышается  $\lambda$  с увеличением влагосодержания. Для пеносиликата с внесенными хорошо растворимыми солями  $\lambda$  с увеличением содержания влаги возрастает менее интенсивно, чем для пеносиликата со слабо растворимыми солями (рис. 8). Например, по сравнению с сухим засоленным материалом при содержании соли 27 г/дм<sup>3</sup> и условиях эксплуатации Б для пеносиликата  $\lambda$  снижается, соответственно, на 1,4 % при содержании соли 7; 2,8 % – при наличии соли 8 и 4,1 % – соли 9. С увеличением количества соли в материале усиливается тенденция к снижению роста  $\lambda$  при увлажнении. Содержание соли 81 г/дм<sup>3</sup> в условиях эксплуатации Б снижает рост коэффициента теплопроводности на 11,4 % при засолении солью 7, 13 % – при засолении солью 8 и 15,5 % – при наличии соли 9 (по сравнению с сухим засоленным пеносиликатом).

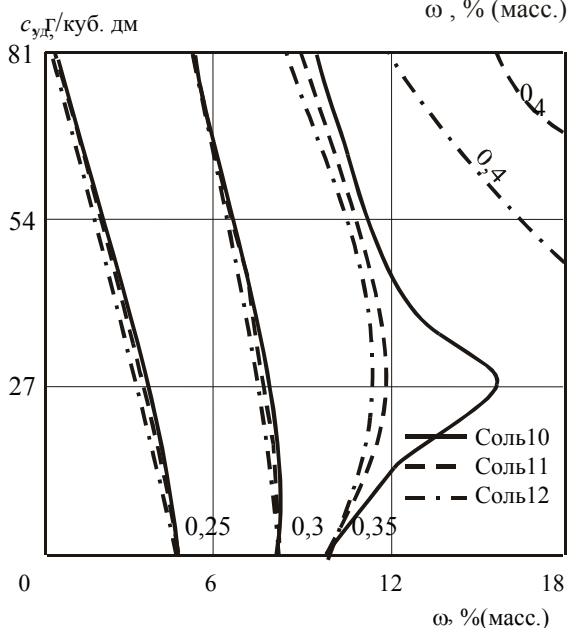
Влияние на  $\lambda$  пеносиликата гигроскопичности солей (рис. 9) проявляется следующим образом. Эффект повышения  $\lambda$  наблюдается на всех уровнях  $\omega$  только для практически негигроскопичной соли 12, хотя видна тенденция к снижению эффекта при увеличении влаги. При содержании соли 81 г/дм<sup>3</sup> с увеличением количества влаги до  $\omega = \omega_B$  эффект повышения  $\lambda$  для соли 12 снижается на 7,3 %. Для соли 11 эффект снижения возрастает на 10,6 %. Теплопроводность засоленно-

го солью 11 пеносиликата (при  $\omega = \omega_B$  и  $c_{уд} = 27 \text{ г/дм}^3$ ) ниже на 6,3 %, чем материала, не содержащего соль. Эффект снижения  $\lambda$  возрастает для соли 10, имеющей самую низкую гигроскопическую точку из сравниваемых солей. Величина снижения коэффициента теплопроводности составляет 6,3 % при  $c_{уд} = 27 \text{ г/дм}^3$  и 1,4 % при  $c_{уд} = 54 \text{ г/дм}^3$  для условий Б.



**Рис. 8** Изолинии коэффициента теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от удельного соледержания  $c_{уд}$  и влагосодержания  $\omega$  при различной растворимости исследуемых солей  $c_n$ , % (масс.):

соль 7 ( $c_n = 1$ );  
соль 8 ( $c_n = 14$ );  
соль 9 ( $c_n = 27$ )



**Рис. 9** Изолинии коэффициента теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от удельного соледержания  $c_{уд}$  и влагосодержания  $\omega$  при различной гигроскопичности исследуемых солей  $\varphi_r$ , %:

соль 10 ( $\varphi_r = 60$ );  
соль 11 ( $\varphi_r = 75$ );  
соль 12 ( $\varphi_r = 90$ )

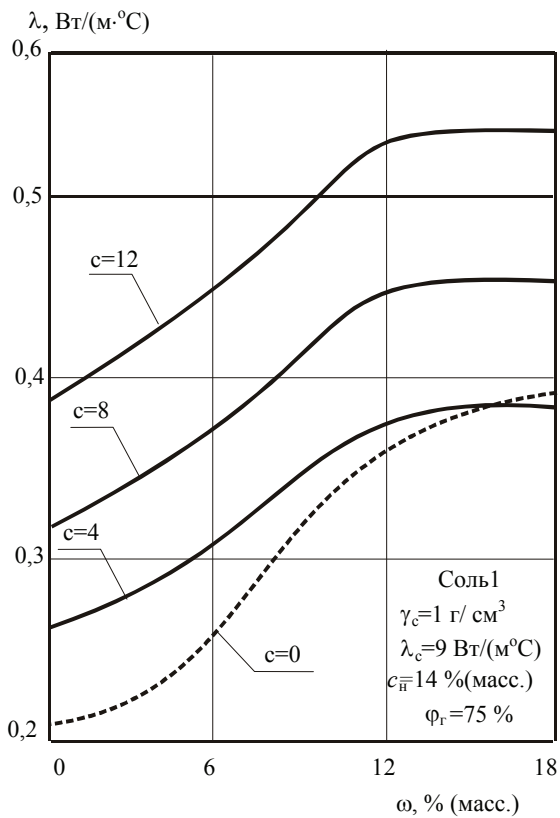


Рис. 10 Коэффициент теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от массового влагосодержания  $\omega$  при плотности соли 1  $\gamma_c=1$  г/см<sup>3</sup> и  $c = \text{const}$

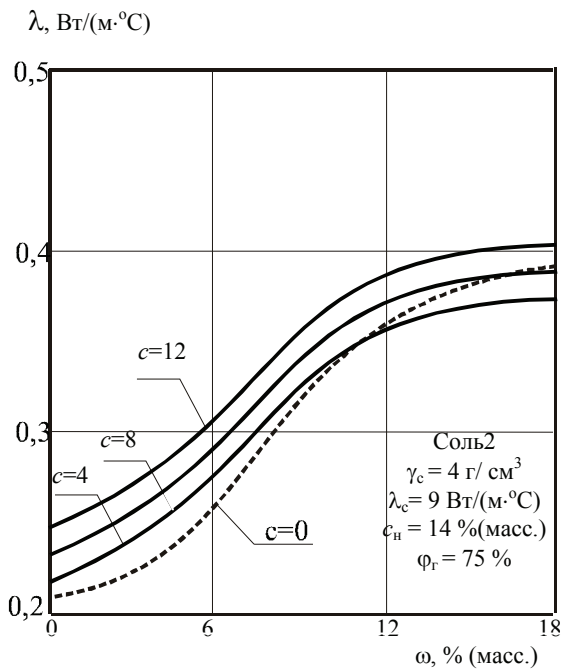


Рис. 11 Коэффициент теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) в зависимости от массового влагосодержания  $\omega$  при плотности соли 2  $\gamma_c=4$  г/см<sup>3</sup> и  $c = \text{const}$

На рис. 10 и 11 в качестве примера представлены графики зависимости коэффициента теплопроводности пеносиликата  $\lambda$ , Вт/(м·°С) от влагосодержания  $\omega$ , % (масс.) при массовом солесодержании  $c$ , равном 0; 4; 8 и 12 % (масс.) и различных значениях плотности (для соли 1  $\gamma_c = 1$  г/см<sup>3</sup>; для соли 2  $\gamma_c = 4$  г/см<sup>3</sup>) при постоянных значениях остальных исследуемых факторов.

#### 4 Выводы

1. Установлено, что коэффициент теплопроводности  $\lambda$  сухого пеносиликата повышается с увеличением содержания солей в капиллярно-пористом пространстве. В исследованном диапазоне изменения солесодержания теплопроводность пеносиликата оказалась выше  $\lambda$  незасоленного материала на 88 % (отн.).

2. При увлажнении пеносиликата до 6...12 % (масс.) и содержании соли до 81 г/дм<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности возрастает на 1...76 % (отн.) в зависимости от физико-химических свойств солей. Наибольшее повышение коэффициента теплопроводности пеносиликата наблюдается при наличии в порах солей с низкой плотностью и высоким коэффициентом теплопроводности кристаллов.

3. При высокой влажности (свыше 12...15 % (масс.)) коэффициент теплопроводности пеносиликата, содержащего соли с низкой плотностью, превышает  $\lambda$  незасоленного материала на величину до 48 % (отн.). Остальные соли снижают коэффициент теплопроводности из-за растворения кристаллической соли и заполнения пор растворами солей. При этом соли с высокой гигроскопичностью снижают коэффициент теплопроводности на 9 %, а наличие высоко растворимых солей снижает  $\lambda$  на 5 % по сравнению с незасоленным материалом.

4. Предложенная математическая модель для расчета коэффициента теплопроводности пеносиликата, содержащего влагу и соли, может быть использована для проведения вычислительного эксперимента по установлению влияния водорастворимых солей на коэффициент теплопроводности пеносиликата.

#### Список литературы

1. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
2. Езерский В.А., Ельчищева Т.Ф. Определение теплоты испарения воды из насыщенных растворов солей // Проблемы научно-технического прогресса в строительстве в преддверии нового тысячелетия: Материалы Международной научно-технической конференции. – Пенза, 1999. – С. 54 – 56.
3. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961. – 539 с.
4. Николаев Л.А. Физическая химия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1979. – 371 с.

---

### Investigation of Salts Influence on Heat Conductivity of Cell Concrete

V.A. Ezersky<sup>1</sup>, T.F. Elchishcheva<sup>2</sup>

Departments: "Fundamentals of Construction and Construction Physics",  
Belostock Polytechnic Institution (Poland) (1),  
"Architecture and Buildings Construction", TSTU (2)

**Key words and phrases:** cellular silicate; combined structure; crystalline hydrate; heat conductivity coefficient; hygroscopic salts; interpenetrating materials; intrapore substance; structure with embedment.

**Abstract:** Heat conductivity coefficient of cellular silicate, containing moisture and salts is investigated with the help of mathematics modeling method. Basic mechanisms of influence of physical chemical properties of salts on heat conductivity coefficient are found out.

---

### **Untersuchung des Einflusses der Salze auf die Wärmeleitfähigkeit des Zellenbetons**

**Zusammenfassung:** Es ist der Koeffizient der Wärmeleitfähigkeit des die Feuchtigkeit und die Salze enthaltenden Schaumsilikats mit Hilfe der Methode der mathematischen Modellierung untersucht. Es sind die Hauptgesetzmäßigkeiten des Einflusses der physikal-chemischen Eigenschaften der Salze auf den Koeffizienten der Wärmeleitfähigkeit gezeigt.

---

### **Etude de l'influence des sels sur le transfert de chaleur du béton cellulaire**

**Résumé:** Est examiné le coefficient du transfert de chaleur de la mousse du silicate contenant l'humidité et les sels à l'aide de la méthode du modélage mathématique. Sont reçues les régularités de l'influence des propriétés physiques et thermiques des sels sur le coefficient du transfert de chaleur.

---