

УДК 692.232:691:54-145.2

**ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПРИ НАЛИЧИИ В ИХ СОСТАВЕ СОЛЕЙ**

**CHANGE OF HUMIDITY AND THERMAL CONDUCTIVITY
OF BUILDING MATERIALS FOR TEXTILE ENTERPRISES
WHEN AVAILABLE IN THEIR COMPOSITION OF SALTS**

В.Т. ЕРОФЕЕВ, Т.Ф. ЕЛЬЧИЩЕВА

V.T. EROFEEV, T.F. ELCHISHCHEVA

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Тамбовский государственный технический университет)

(National Research Ogarev Mordovia State University,
Tambov State Technical University)

E-mail: yerofeevvt@mail.ru; elschevat@mail.ru

Энергосбережение в зданиях и сооружениях напрямую зависит от энергоэффективности наружных ограждающих конструкций. Последние, как правило, выполняются многослойными и имеют в своем составе конструкционный и теплоизолирующий слои. Наличие в строительных материалах отдельных гигроскопических солей и их смесей изменяет их физико-химические свойства. Из-за повышения сорбционных свойств строительных материалов и изменения состава внутрипорового вещества повышается влажность и снижаются теплозащитные свойства. В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния солей на изменение влагосодержания и теплопроводность строительных материалов вследствие наличия в поровом пространстве растворов и кристаллов солей.

Energy saving in buildings and structures directly depends on the energy efficiency of external building envelopes. The latter are usually multilayer and incorporate structural and heat-insulating layers. The presence of individual hygroscopic salts and their mixtures in building materials changes their physicochemical properties. Due to the increase in the sorption properties of building materials and changes in the composition of the inter-pore substance. Humidity increases and heat-shielding properties decrease. This paper presents the results of theoretical and experimental studies on the assessment of the effect of salts on the change in moisture content and thermal conductivity of building materials due to the presence of salt solutions and crystals in the pore space.

Ключевые слова: энергосбережение, гигроскопические соли, загрязняющие вещества, строительные материалы, наружные ограждающие конструкции, теплопроводность, влажность.

Keywords: energy saving, hygroscopic salts, pollutants, building materials, exterior walling, thermal conductivity, humidity.

В условиях холодного климата, характерного для большей части территории России, расходы тепла на отопление жилых, общественных и промышленных зданий весьма значительны. Энергоемкость отопления только жилых зданий составляет, по данным Росстата, 19,6 т нефтяного эквивалента (т.н.э.) на 1000 м² площади, что гораздо выше, чем в других странах: Германия – 12,2, Швеция – 12,1, Италия – 11,9, Финляндия – 11,8, Франция – 11,5, Дания – 11,3 т.н.э. Задача снижения этих затрат и повышения энергоэффективности значима для экономики, для ее решения актуальным является энергосбережение в зданиях. В последние 10...15 лет этому вопросу уделяется большое внимание. Курс на энергосбережение был заявлен в Указе Президента РФ №889 от 04.06.2008 г. В соответствии с ним 23.11.2009 г. был принят Федеральный закон №261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации", где были также даны определения понятий "энергосбережение" и "энергетическая эффективность".

Обзору литературных данных, посвященных постановке и реализации задач экономии энергии на отопление зданий и повышения энергетической эффективности за рубежом и в нашей стране, начиная с 1811 г., посвящена работа В.Г. Гагарина и В.В. Козлова [1]. Авторами показано, что в настоящее время требования к теплозащите ограждающих конструкций (ОК) зданий в нашей стране выше дореволюционных более чем в три раза.

Известно, что теплопотери через оболочку здания (наружные стены, покрытие и перекрытие над подвалом) в жилых зданиях составляют около 12,5% [1], [2] от общего количества теплопотерь. В общие теплопотери входят также теплопотери через

окна, за счет воздухообмена, газо- и водоснабжения, потребления тепло- и электроэнергии. Несмотря на низкую долю теплопотерь через оболочку здания по сравнению с другими видами теплопотерь, здесь возможен прозрачный контроль за проведением теплозащитных мероприятий, так как теплозащита ОК рассчитывается на стадии проектирования здания и осуществляется на стадии его строительства, что исключает воздействие случайных факторов, к которым относится расход энергоресурсов потребителями, потери в сетях при работе коммунальных служб и т.д. [1], что влияет на остальные виды теплопотерь.

При проектировании наружных ОК зданий производится выбор типов конструктивных и теплоизоляционных слоев. Здесь следует, наряду с климатическими условиями района строительства, учитывать сырьевую базу строительных материалов, наличие соответствующего производства и рабочих кадров требуемой квалификации для изготовления строительных материалов и устройства наружных ОК зданий с теплозащитным слоем, осуществление контроля качества устройства теплоизоляции методами тепловизионного контроля с устранением выявленных недостатков [1].

В настоящее время, как отмечено в работе, наиболее часто применяемыми решениями наружных стеновых ОК для массового строительства в России являются [3]:

- навесные стены (в зданиях с монолитным каркасом). В них применяются блоки из ячеистого бетона и эффективный утеплитель;

- трехслойные железобетонные панели с эффективным утеплителем (в панельных зданиях);

- стены из ячеистых бетонных блоков или монолитного железобетона с облицовкой из кирпичной кладки и с эффективным утеплителем (или без утеплителя);

- навесные фасадные системы с конструкционным слоем из монолитного железобетона, каменной кладки из кирпича или ячеистобетонных блоков с тонким штукатурным слоем;

- навесные фасадные системы с вентилируемой воздушной прослойкой.

В Своде правил "СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003" нормирование тепловой защиты зданий и расхода тепловой энергии на их отопление и вентиляцию рекомендуется осуществлять выполнением следующих требований [4]: поэлементных, к тепловой защите ОК; к тепловой защите оболочки здания (к совокупности всех наружных ОК); к расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания.

Рассмотрим в статье вопрос, касающийся поэлементных требований к наружным ОК. Здесь нормируется приведенное сопротивление теплопередаче, которое отражает влияние всех теплопроводных включений. В наружных ОК строительные материалы всегда находятся в увлажненном состоянии. Эксплуатационная влажность различна для каждого материала [4].

Проектирование тепловой защиты здания предполагает определение и назначение расчетной влажности и расчетной теплопроводности строительных материалов для условий эксплуатации конструкций А или Б [5]. Величина расчетной влажности напрямую влияет на основной показатель для теплотехнических расчетов – величину расчетной теплопроводности строительного материала [5], [11]. С другой стороны, на расчетную теплопроводность значительное влияние оказывает наличие в материале некоторых компонентов – загрязняющих веществ в виде пыли и газов, которые попадают из атмосферного воздуха [6], [7] и почвы, в том числе гигроскопических неорганических солей, распространенных в природной среде, использующихся в производственной и хозяйственной деятельно-

сти человека [8...10]. Попадая на ограждающие конструкции, соли поглощают влагу и, в виде растворов, проникают в толщу строительного материала ОК и накапливаются.

В капиллярно-пористом пространстве строительных материалов соли могут находиться в следующих агрегатных состояниях: твердом (кристаллы солей) и жидком (соли в растворе). Оба состояния способствуют изменению расчетной теплопроводности строительного материала. Теплопроводностью за счет излучения и конвекции, согласно исследованиям А.Ф. Чудновского [12], [13], можно пренебречь в связи с малым диаметром пор материалов и небольшим градиентом температур.

Исследование зависимости теплопроводности от наличия в материале солей исследовалось в работах [14], [15]. Авторами в работе [14] установлено повышение теплопроводности кирпичной кладки, засоленной хлоридами натрия, калия, магния и кальция (NaCl , KCl , MgCl_2 и CaCl_2), а также фторидом натрия (NaF) и иодидом бария (BaI_2) при влагосодержании материала до 2% по массе на величину, характерную для каждой исследуемой соли.

В работе В.И. Никитина [15] представлены результаты изучения коэффициента теплопроводности фенольных пенопластов марки ФЛ плотностью 60, 100 и 200 кг/м^3 , засоленных хлоридом натрия. Установлено, что для незасоленного пенопласта плотностью 60 кг/м^3 и пористостью $\Pi=95\%$ по сравнению с глиняным кирпичом плотностью 1300 кг/м^3 и $\Pi=50\%$ при одинаковом приращении объемной концентрации влаги от 0 до 10% коэффициент теплопроводности увеличивается в 2,02 раза против 1,21 раза. При наличии растворенных солей в поровой влаге это соотношение является еще более неблагоприятным.

Теплопроводность влажных материалов может рассчитываться по эмпирическим формулам. Для влажных материалов без солей В.М. Ильинским получена формула (1) [16]:

$$\lambda = \lambda_0 + \beta\omega. \quad (1)$$

В.А. Езерским [14] предложен следующий вид формулы (1) при наличии солей:

$$\lambda = \lambda_0 + \beta\omega + \gamma(c - \xi\omega), \quad (2)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии, Вт/(м·°С); β , γ – коэффициенты приращения теплопроводности, соответственно, на 1% влажности и 1% содержания, по массе; ξ – коэффициент смещения начального значения содержания соли на 1% влажности; c , ω – содержание соли и влаги в материале, % по массе. Для засоленных стеновых материалов должно выполняться условие $c \geq \xi \cdot \omega$, в противном случае принимается $c = \xi \cdot \omega$. Для кладки из кирпича, засоленной хлоридом натрия (NaCl), коэффициенты формулы (2) рассчитываются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,143\omega^{(0,007\omega-0,34)}, \\ \gamma &= 0,027 + 0,002\omega; \\ \xi &= \omega^{-0,5}. \end{aligned}$$

Наиболее перспективным и универсальным для изучения теплопроводности стро-

ительных материалов является метод математического моделирования с применением теории протекания и приведения структуры строительных материалов к элементарной ячейке, рассмотрим его применительно к теплопроводности засоленных строительных материалов.

В общем случае наличие гигроскопических солей может с трех позиций изменять расчетные показатели теплопроводности строительных материалов.

1. Повышение теплопроводности строительных материалов за счет выпадения из растворов кристаллической соли в порах материала. Теплопроводность материала определяется теплопроводностью порового пространства и твердого вещества (скелета) материала. Кристаллическая соль, выпавшая из раствора в поровом пространстве, имеет коэффициент теплопроводности более высокий, чем теплопроводность воздуха $\lambda_{в}$, которая при температуре 20°С составляет 0,026 Вт/(м·°С) (табл. 1) и, чаще всего, выше теплопроводности скелета строительного материала $\lambda_{ск}$, Вт/(м·°С). Например, теплопроводность скелета керамического кирпича составляет 2,326, пенобетона – 2,330, минераловатных плит – 1,500 и пенопласта – 0,305 Вт/(м·°С).

Т а б л и ц а 1

Наименование соли	Химическая формула соли	Теплопроводность кристалла соли $\lambda_{к}$, Вт/(м·°С)
Хлорид натрия	NaCl	9,982
Натрия фосфат додекагидрат (натрий фосфорнокислый 3-замещенный 12- водный)	Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	0,229
Хлорид калия	KCl	9,440
Сульфат калия	K ₂ SO ₄	8,287
Хлорид аммония	NH ₄ Cl	2,661
Хлорид кальция	CaCl ₂	0,358

Теплопроводность скелета определяется экспериментально или по эмпирическим формулам. Результаты сравнения экспериментальных данных J.S. Sammerer и W.F. Sammerer со значениями, рассчитанными по формулам, приведены в [17] для некоторых строительных материалов. Разница между значениями составляет 6...16%.

В работе [18] для расчета теплопроводности скелета рекомендуется формула А.Ф. Чудновского (3):

$$\lambda_{ск} \cong 2,5 \cdot 10^{-2} + 9,4 \cdot 10^{-2} \cdot 2,3^{\rho_{ск}} \rho_{ск}^{1/2}, \quad (3)$$

где $\rho_{ск}$ – плотность скелета материала, г/см³.

Теплопроводность кристаллической соли зависит от типа кристаллов соли, образующихся в поровом пространстве строительного материала – это может быть безводная соль либо кристаллогидрат (молекула соли с присоединенными к ней молекулами воды посредством химической или

межмолекулярной связи), и количества атомов соли в ее молекуле.

Теплопроводность кристаллов солей λ_k определяется по справочным данным физической химии или определяется по формулам А. Миснара [17]. Для 2-х атомных молекул λ_k рассчитывается по формуле (4), многоатомных – по формуле (5):

$$\lambda_k = 0,421A_2 \sqrt{\frac{F\rho_k}{M}} \frac{m_1}{m_2} \frac{F}{T}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}. \quad (4)$$

$$\lambda_k = 0,421 \frac{A_N}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{F\rho_k}{M}} \frac{F}{T}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}, \quad (5)$$

где значения параметров A_2 и A_N зависят от системы кристаллической решетки соли: $A_2=1,32$ – для кубической, $A_2=3,00$ – для гексагональной, $A_2=8,70$ – для ромбической, $A_N=1,12$ – для кубической, $A_N=2,5$ – для гексагональной системы; F , T – температура, соответственно, плавления кристалла и среды, K ; ρ_k – плотность кристалла соли, г/см^3 ; M – молекулярная масса соли, а.е.м.; m_1 , m_2 – атомные массы, а.е.м., соответственно, легкого и тяжелого элементов в формуле соли; N – число атомов в химической формуле соли.

2. Изменение теплопроводности строительных материалов за счет изменения их первоначальных химических свойств. Изотермы сорбции строительных материалов, содержащих соли, лежат выше на графиках по сравнению с незасоленными материалами. Сорбционная влага (влага полимолекулярных комплексов или пленочная) способствует дальнейшему привлечению

влаги из воздуха и увлажнению засоленного строительного материала до достижения им равновесной влажности. Это происходит вследствие эффекта гигроскопичности солей и их дополнительного притока из окружающей среды. Растворы солей в строительном материале могут быть в концентрированном либо разбавленном виде. От степени концентрации растворов зависит их коэффициент теплопроводности, который определяется экспериментально или рассчитывается.

В работе [18] растворы электролитов рассматриваются как смеси двух жидкостей – воды и "условного" раствора соли 100%-ной концентрации $\lambda_{y.p.}^c$, $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, то есть соли в "жидком" состоянии. Формула (6) [17] позволяет рассчитать теплопроводность такого раствора:

$$\lambda_{y.p.}^c = 9,3 \cdot 10^{-2} \rho \sqrt{F M}^{-5/6}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}, \quad (6)$$

где M , F – то же, что в формуле (4); ρ – число атомов в молекуле соли; ρ – плотность кристаллов соли, кг/м^3 .

Солевой раствор в порах материала представляет собой упорядоченную модель со структурой с взаимопроникающими компонентами. В ней, в отличие от системы с замкнутыми включениями, порядок сочетания компонентов, в силу их равноправности, не оказывает влияния на теплопроводность системы λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, которую в [18] рекомендуется рассчитывать по формуле (7):

$$\lambda = \lambda_1 \left[C^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1-C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C(1-C) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)^{-1} \right], \quad (7)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности компонентов раствора, $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $\lambda_1=0,628 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ – теплопроводность воды при 20°C ; $\lambda_2=\lambda_{y.p.}^c$. Величина C определяется как положительный корень кубического уравнения:

$$2C^3 - 3C^2 + 1 = m^2,$$

$$C = 0,5 + A \cos(60^\circ + \phi/3).$$

где m_2 – объемная концентрация второго компонента. Когда $0 \leq m_2 \leq 0,5$, то $A=1$ и $\phi = \arccos(1-2m_2)$. Если $0,5 < m_2 \leq 1$, то $A=-1$ и $\phi = \arccos(2m_2 - 1)$.

Как правило, в порах материала находится многокомпонентный раствор, в котором содержатся несколько солей. При расчете теплопроводности таких растворов используется метод, заключающийся в последовательном сведении этой структуры к бинарной с уточнением концентраций компонентов.

Рассмотрим расчет системы, в которой растворены две соли. С учетом растворителя (воды) она является трехкомпонентной с объемными концентрациями компонентов m_1, m_2, m_3 , при этом выполняется условие:

$$m_1 + m_2 + m_3 = 1.$$

При расчете из смеси условно удаляется 3-й компонент. Получившаяся бинарная смесь имеет новое значение концентраций компонентов, которое определяется по формулам (8) и (9).

$$m_1' = m_1 / (m_1 + m_2), \quad (8)$$

$$m_2' = m_2 / (m_1 + m_2), \quad (9)$$

$$m_2' = 1 - m_1'. \quad (10)$$

где m_1' и m_2' – объемные концентрации, соответственно, 1-го и 2-го компонентов в бинарной смеси.

Затем определяется эффективная теплопроводность λ_{12} бинарной смеси по формулам (11) и (12) как для модели с изолированными включениями [18], [19]. В формулы (11) и (12) вместо m_1 и m_2 подставляются значения m_1' и m_2' , то есть $\lambda_{12} = f(\lambda_1, \lambda_2, m_1', m_2')$:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) m_2'^{1/3} (1 - m_2'^{2/3})}{1 - m_2'^{1/3} \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}, \quad (11)$$

$$m_1 = V_1 / V, \quad m_2 = V_2 / V, \quad (12)$$

где V_1, V_2 – объемы включений с объемными концентрациями, соответственно, m_1 и m_2 ; V – объем смеси.

На втором этапе учитывается третий компонент, система рассматривается как бинарная с непрерывным компонентом с теплопроводностью λ_{12} и концентрацией m_{12} , в ней есть включения с теплопроводностью λ_3 и концентрацией m_3 :

$$m_{12} = m_1 + m_2, \quad (13)$$

по формулам (11) и (12) определяется теплопроводность трехкомпонентной смеси:

$$\begin{aligned} \lambda &= f(\lambda_{12}, \lambda_3, m_{12}, m_3) = \\ &= f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, m_1, m_2, m_3). \end{aligned}$$

При наличии сильно разбавленных растворов может, по закону Рауля, наблюдаться снижение теплопроводности раствора по сравнению с теплопроводностью поровой влаги без солей.

3. Изменение теплопроводности паровоздушной смеси над растворами солей за счет диффузии. В порах строительных материалов при 20°C и отсутствии влаги и солей теплопроводность воздуха за счет его молекулярной теплопроводности λ_v составляет 0,026 Вт/(м·°C). Теплопроводность влажной паровоздушной смеси $\lambda_{вп}$, Вт/(м·°C), осуществляется за счет диффузии и определяется по формуле (14) [20]:

$$\lambda_{вп} = \lambda_v + K\lambda_p, \quad (14)$$

где K – коэффициент диффузии паровоздушной смеси; λ_p – теплопроводность пара, Вт/(м·°C).

Диффузия сопровождается испарением и конденсацией влаги на стенках пор и капилляров. В строительных материалах максимальный вклад λ_p в величину $\lambda_{вп}$ возможен, когда происходит конденсация влаги. Например, когда материал не содержит водорастворимых солей, то относительная влажность воздуха $\phi_v = 80\%$ соответствует сорбционной влажности материала ω_{80} , %, что является граничным значением влажности, при котором отсутствует теплопередача за счет диффузии и $\lambda_p = 0$. При увеличении влагосодержания, когда $\omega > \omega_{80}$, то $\lambda_p > 0$.

Диффузная составляющая не является постоянной величиной: увеличение влагосодержания ω до значения $\omega=16\%$ по объему от всего объема пор приводит к увеличению теплопроводности за счет диффузии [19]. При дальнейшем увеличении объемного влагосодержания уменьшается доля порового пространства, и снижается диффузная составляющая. Поэтому в формуле (14) коэффициент K учитывает снижение теплопроводности за счет диффузии по сравнению с максимальной, когда $K_{\max}=1$ и принимает значения $0 \leq K \leq 1$.

В засоленном материале при значениях ω , меньших сорбционного ω_p , %, соответствующего гигроскопической точке ω_g , %, исследуемой соли, солевые растворы не образуются, и теплопроводность за счет диффузии равна нулю. Для различных материалов K принимается в соответствии с опытными данными.

При наличии в порах материала растворов солей в формуле (14) изменяется составляющая теплопередачи за счет диффузии. Вместо теплопроводности за счет диффузии паровоздушной смеси над водой λ_p в формуле (14) будет фигурировать теплопроводность за счет диффузии пара над раствором соли $\lambda_{пр}$. Это связано с тем, что над растворами солей понижается упругость водяного пара (принцип Ле Шателье) и снижается, соответственно, концентрация пара над раствором по сравнению с его концентрацией над чистым растворителем – водой. Величина снижения зависит от вида соли, ее количества и температуры раствора. Теплопроводность паровоздушной смеси над раствором соли за счет диффузии определяется по формуле (15) [20]:

$$\lambda_{пр} = \frac{DM}{RT} \frac{p}{p - p_{пр}} \frac{dp_{пр}}{dT} r_p, \text{ Вт/(м·К)}, \quad (15)$$

где D – коэффициент диффузии пара в воздухе для неограниченного пространства, $\text{м}^2/\text{с}$; M – молекулярная масса пара; R – универсальная газовая постоянная; T – температура пара, К ; p и $p_{пр}$ – соответственно суммарное давление пара и воздуха и давление пара над раствором, Па ; r_p – теплота парообразования раствора, Дж/кг .

Моделью порового пространства, содержащего жидкость и парогазовую смесь, является бинарная система с взаимопроницаемыми компонентами [19].

При значениях ω , меньших критического значения, то есть $\omega < \omega'$, влага сосредотачивается в индивидуальном кластере. При $\omega \geq \omega'$ включения соединяются проводящими связями. При $\omega = \omega'$ индивидуальные кластеры соединяются мостиками, образуется бесконечный кластер. Последующее увеличение количества влаги ведет к переходу системы в структуру с взаимопроницаемыми компонентами.

Дальнейшее увеличение ω ведет к уменьшению паровоздушного компонента. При концентрации влаги $\omega = \omega''$ исчезает бесконечный кластер смеси воздуха и пара, образуются изолированные включения. Для строительных материалов критическими являются значения влагосодержания по объему $\omega' \cong 0,16$ и $\omega'' \cong 0,85$ [19].

Теплопроводность порового пространства λ_{12} , заполненного паровоздушной смесью с теплопроводностью λ_1 и жидкостью с теплопроводностью λ_2 , определяется по формуле (16) [19]:

$$\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} = \bar{S}_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left[\frac{\bar{\Delta S}}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \bar{\ell}_2} + \frac{2\bar{S}_3}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \bar{\ell}_1} + \bar{S}_4 \right], \quad (16)$$

$$\bar{S}_1 = \left(\frac{\omega - \omega_c}{1 - \omega_c} \right)^{1.6} \text{ при } \omega \leq 0,5; \quad \bar{S}_1 = \left(\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} \right)^{1.6} \text{ при } \omega > 0,5; \quad \omega_c = \omega' \text{ при } \omega \leq 0,5; \quad \omega_c = \omega'' \text{ при } \omega > 0,5;$$

$$\bar{l}_1 = \sqrt{S_1}; \quad \bar{l}_2 = \sqrt[3]{\omega_c}; \quad \bar{S}_2 = \bar{l}_2^2; \quad \bar{S}_3 = (1 - \bar{l}_2) \cdot \bar{l}_1; \quad \bar{S}_4 = 1 - \bar{S}_2 - 2\bar{S}_3; \quad \bar{\Delta S} = S_2 - S_1.$$

Расчет теплопроводности засоленного строительного материала отличается для полностью увлажненного материала и для сухого и не полностью увлажненного мате-

риала. В первом случае расчет производится по формуле (11), во втором – по формуле (17) [19]:

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_1 \left[C^2 M + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C (1 - C) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)^{-1} \right]. \quad (17)$$

Это объясняется тем, что в сухих и не полностью увлажненных материалах имеются микротрещины, которые снижают коэффициент теплопроводности материалов, не оказывая влияния на его общую пористость. За счет трещин, заполненных менее теплопроводным компонентом (воздухом), повышается тепловое сопротивление материала. Величина параметра М в формуле (17) зависит от пористости и размера микротрещин в материале, коэффициента теплопроводности компонента в порах. При слабой трещиноватости материалов $M=C$, при сильной – $M=C^2$. Это связано с тем, что при объемном содержании влаги m_w по отношению к объемному содержанию пор в материале m_p (в долях единицы), находящемуся в пределе $0 \leq \frac{m_w}{m_p} \leq 0,4$, теплопровод-

ность системы возрастает в основном за счет увеличения диффузной составляющей теплопередачи. С увеличением этого соотношения, когда $\frac{m_w}{m_p} > 0,4$, поры и ка-

пилляры материала запираются свободной жидкостью, и теплопроводность за счет диффузии снижается. Когда $\frac{m_w}{m_p} = 1$, теплопроводность системы является только функцией теплопроводности скелета материала и поровой влаги.

В Ы В О Д Ы

Проведенные исследования позволяют установить значимость влияния гигроскопических солей в твердой и жидкой фазах на теплопроводность строительных материалов. Учет влияния солей на теплофизические свойства наружных ограждающих конструкций необходим при проведении теплотехнических расчетов.

При назначении расчетной влажности и расчетной теплопроводности строительных материалов следует действовать по такому алгоритму.

1. Определить условия эксплуатации строительных материалов в наружных ограждающих конструкциях.

2. В случае воздействия агрессивной производственной среды (в промышленных зданиях), неблагоприятных условий эксплуатации (морской климат, наличие загрязняющих веществ в почве или окружающей среде, а также в исходном сырье для изготовления строительных материалов) расчетные характеристики строительных материалов следует изменить с учетом содержания гигроскопических солей. Вид и количественное содержание солей и влаги в строительных материалах на объекте определяется опытным путем, а также с помощью исследования строительных материалов наружных ограждающих конструкций зданий-аналогов с соответствующим сроком эксплуатации.

3. Расчет теплопроводности строительных материалов с учетом солевого воздействия для проведения теплотехнических расчетов производится в соответствии со следующей схемой:

- определяются объемные концентрации компонентов в строительном материале;
- определяется теплопроводность скелета материала по формуле (3);
- определяется теплопроводность кристаллов солей по формулам (4), (5);
- определяется теплопроводность твердой фазы материала, состоящей из скелета строительного материала и кристаллической соли, по формуле (11);
- определяется теплопроводность бинарного солевого раствора по формулам (6), (7) и многокомпонентного – по формулам (6), (8), (9), (11)...(13);
- определяется теплопроводность порового пространства за счет диффузии паровоздушной смеси над растворами солей по формуле (15);
- определяется теплопроводность внутрипорового вещества по формуле (16);
- определяется теплопроводность засоленного строительного материала по формулам (11), (17).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Перспективы повышения энергоэффективности жилых зданий в России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012, №5. С. 25...32.
2. Васильев Г.П. Основные задачи городской программы об энергосберегающем домостроении в Москве // Энергосбережение. – 2009, №4. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?id=4329.
3. Гагарин В.Г. Теплофизические свойства стеновых ограждающих конструкций // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2012, №1. С.100...106.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О нормировании теплозащиты и требованиях расхода энергии на отопление и вентиляцию в проекте актуализированной редакции СНиП "Тепловая защита зданий" // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. – 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 468...474.
5. Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительные материалы и технологии. – 2015, №4 (60). С. 152...155.
6. Kuzmichev A.A., Azarov V.N., Kuzmichev A.V. The research of contamination regularities of historical

buildings and architectural monuments by methods of computer modeling // MATEC Web of Conferences. – 2017, Vol. 129. DOI: 10.1051/mateconf/201712905002.

7. Kuzmichev A.A., Loboyko V.F. Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning // Procedia Engineering. – Vol. 150, 2016. P. 2095...2101. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.244.

8. Erofeev V., Bobryshev A., Shafigullin L., Zubarev P., Lakhno A., Darovskikh I., Tretiakov I. Building Heat-insulating Materials Based on the Products of the Transesterification of Polyethylene Terephthalate and Dibutyltin Dilaurate // Procedia Engineering. – 165, 2016. P.1455...1459. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.879.

9. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Влажностный режим помещений зданий при наличии в материале стен гигроскопических солей // Изв. вузов. Строительство. – 2018, №12 (720). С. 62...74. DOI 10.32683/0536-1052-2018-720-12-62-74.

10. Ельчищева Т.Ф. Безопасная эксплуатация наружных ограждающих конструкций зданий при неблагоприятном воздействии среды // Вестник МГСУ. – 2019. Т.14. Вып. 5. С. 570...588. – DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588

11. Пастушков П.П., Гринфельд Г.И., Павленко П.В. и др. Расчетное определение эксплуатационной влажности автоклавного газобетона в различных климатических зонах строительства // Вестник МГСУ. – 2015, №2. С. 60...70.

12. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971.

13. Гурьев В.В., Никитин В.И., Кофанов В.А. Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018, № 9. С. 98...104.

14. Езерский В.А. Физико-технические основы обеспечения эксплуатационной надежности ограждающих конструкций зданий при воздействии гигроскопических солей: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: МГСУ, 1994.

15. Никитин В.И. Повышение эксплуатационных свойств материалов слоистых ограждающих конструкций: Дис. ... докт. техн. наук. – Брест, 1998.

16. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). – М.: Высшая школа, 1974.

17. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968.

18. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974.

19. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.

20. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961.

REFERENCES

Gagarin V.G., Kozlov V.V. Perspektivy povyshe-niya energoeffektivnosti zhilykh zdaniy v Rossii // Ener-giya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. – 2012, №5. S.25...32.

2. Vasil'ev G.P. Osnovnye zadachi gorodskoy pro-grammy ob energosberegayushchem domostroenii v Moskve // Energoberezhenie. – 2009, №4. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4329.

3. Gagarin V.G. Teplofizicheskie svoystva steno-vykh ograzhdayushchikh konstruksiy // Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie. – 2012, №1. S.100...106.

4. Gagarin V.G., Kozlov V.V. O normirovanii tep-lozashchity i trebovaniyakh raskhoda energii na otople-nie i ventilyatsiyu v proekte aktualizirovannoy redaktsii SNIIP "Teplovaya zashchita zdaniy" // Vestnik Vol-gGASU. Ser.: Str-vo i arkhitekt. – 2013. Vyp. 31(50). Ch. 2. Stroitel'nye nauki. S. 468...474.

5. Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Reutova N.A. K voprosu o naznachanii raschetnoy vlazhnosti stroi-tel'nykh materialov po izoterme sorbtsii // Stroitel'nye materialy i tekhnologii. – 2015, №4 (60). S. 152...155.

6. Kuzmichev A.A., Azarov V.N., Kuzmichev A.V. The research of contamination regularities of historical buildings and architectural monuments by methods of computer modeling // MATEC Web of Conferences. – 2017, Vol. 129. DOI: 10.1051/mateconf/201712905002.

7. Kuzmichev A.A., Loboyko V.F. Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Archi-tectural Monuments in the Area of Town Planning // Procedia Engineering. – Vol. 150, 2016. P.2095...2101. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.244.

8. Erofeev V., Bobryshev A., Shafigullin L., Zubarev P., Lakhno A., Darovskikh I., Tretiakov I. Building Heat-insulating Materials Based on the Prod-ucts of the Transesterification of Polyethylene Tereph-thalate and Dibutyltin Dilaurate // Procedia Engineer-ing. – 165, 2016. P. 1455...1459. doi: 10.1016/j.pro-eng.2016.11.879.

9. Erofeev V.T., El'chishcheva T.F. Vlazhnostnyy rezhim pomeshcheniy zdaniy pri nalichii v materiale sten gigroskopicheskikh soley // Izv. vuzov. Stroi-tel'stvo. – 2018, №12 (720). S. 62...74. DOI 10.32683/0536-1052-2018-720-12-62-74.

10. El'chishcheva T.F. Bezopasnaya ekspluatatsiya naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy pri neblagopriyatnom vozdeystvii srede // Vestnik MGSU. – 2019. T.14. Vyp. 5. S. 570...588. – DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588

11. Pastushkov P.P., Grinfel'd G.I., Pavlenko II.V. i dr. Raschetnoe opredelenie ekspluatatsionnoy vla-zhnosti avtoklavnogo gazobetona v razlichnykh klimat-icheskikh zonakh stroitel'stva // Vestnik MGSU. – 2015, №2. S. 60...70.

12. Vasil'ev L.L., Tanaeva S.A. Teplofizicheskie svoystva poristykh materialov. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1971.

13. Gur'ev V.V., Nikitin V.I., Kofanov V.A. Uchet osobennostey yacheistoy struktury pri analize raschetnoy teploprovodnosti gazonapolnennykh po-limernykh materialov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2018, № 9. С. 98...104.

14. Ezerskiy V.A. Fiziko-tekhnicheskie osnovy obespecheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti ograzh-dayushchikh konstruksiy zdaniy pri vozdeystvii gigros-kopicheskikh soley: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. – M.: MGSU, 1994.

15. Nikitin V.I. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv materialov sloistykh ograzhdayushchikh kon-struksiy: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. – Brest, 1998.

16. Il'inskiy V.M. Stroitel'naya teplofizika (ogra-zhdayushchie konstruksii i mikroklimat zdaniy). – M.: Vysshaya shkola, 1974.

17. Misnar A. Teploprovodnost' tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ikh kompozitsiy. – M.: Mir, 1968.

18. Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. Teploprovod-nost' smesey i kompozitsionnykh materialov. – L.: Energiya, 1974.

19. Dul'nev G.N., Novikov V.V. Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh. – L.: Energoatomizdat. Len-ingr. otd-nie, 1991.

20. Krisher O. Nauchnye osnovy tekhniki sushki. – M.: Izd-vo inostrannoy lit-ry, 1961.

Рекомендована кафедрой строительных матери-алов и технологий МГУ им. Н.П. Огарёва. Поступила 25.04.20.