

температурно-влажностных воздействий и, следовательно, увеличит долговечность балки. Установка элементов жесткости в нижнем поясе балки с закреплением их между отгибами стенки позволяет снизить касательные напряжения в сечениях с максимальной поперечной силой.

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что разработанные балки имеют меньшую материалоемкость, стоимость "в деле", долговечность и могут конкурировать с типовыми деревянными конструкциями.

### Литература

1. Тезисы докладов всесоюзного научно-практического семинара "Расширение применения деревянных клееных конструкций в строительстве". М. 1982 - 76 с.
2. Вольф - металлические плиты с гвоздевыми соединениями. Проспект фирмы "Wolf".
3. Вольф-система. Техника со знаком качества. Проспект фирмы "Wolf".
4. Линьков В.И. Исследование конструкции составной балки из цельной древесины // Тр. ин-та / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. - Разработка и совершенствование деревянных конструкций. 1989. - с. 53-60.
5. Деревянная балка. А.с. СССР № 1649066. МКИ Е 04 С 3/12.
6. Деревянная балка. А.с. СССР № 1767125. МКИ Е 04 С 3/12.
7. Балка. А.с. СССР № 1716030. МКИ Е 04 В 5/12.

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЕНОПЛАСТОВОГО УТЕПЛИТЕЛЯ СЛОИСТЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.

*Никитин В.И., Афонин А.В.*

Для повышения теплоизолирующей способности ограждающих конструкций реконструируемых и вновь строящихся зданий широко используются различные пенопласты, пористость которых может достигать 98%. В процессе эксплуатации зданий в порах материалов ограждений накапливаются водорастворимые соли. Сорбционная влажность соледержащих материалов может возрастать в несколько раз. Переувлажнение материалов приводит к повышению их коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , что отрицательно сказывается на теплозащитных свойствах ограждающих конструкций.

Теплопроводность пористых материалов есть результат теплопроводности твердого и внутрипорового веществ. В наиболее сложных условиях эксплуатации поровое пространство материала, содержащего соли, может быть заполнено веществом, состоящим из паровоздушной смеси, водного солевого раствора и кристаллов соли. Передача тепла в таком поровом пространстве осуществляется за счет проводимости

воздуха, излучения от стенок пор, конвекции, проводимости воды или раствора, диффузии паров воды в воздухе и проводимости кристаллов солей.

Очевидно, что при изучении этого явления чисто эмпирический подход уводит от понимания фундаментальных процессов переноса тепла, имеющих место в засоленных стеновых материалах, и явно недостаточен. Кроме того для получения опытных данных требуются немалые материальные затраты и время. В такой ситуации более эффективным методом исследования является математическое моделирование, базирующееся на модели, учитывающей реальную структуру материала.

Структуру большинства строительных материалов можно условно разделить на три вида /1/: а) материалы с вкраплениями (или включениями) одного материала в другом; б) материалы с взаимопроникающими компонентами; в) материалы со смешанной структурой.

Широко распространенным и достаточно эффективным методом теоретического исследования теплопроводности пористых материалов является применение для этой цели принципа обобщенной проводимости, базирующегося на аналогии между дифференциальными уравнениями стационарного потока тепла, электрического тока, электрической и магнитной индукции, потока массы. На основе этого принципа Миснаром А., Дульневым Г.Н., Васильевым Л.Л., Оделевским В.И. и др. /1, 2, 3, 4/ получены приближенные выражения для определения эффективной теплопроводности двухкомпонентных систем с замкнутыми включениями и взаимопроникающими компонентами. Это не препятствует рассматривать многокомпонентные системы, так как любая многокомпонентная система может быть последовательно сведена к двухкомпонентной.

С учетом наличия в порах материала насыщенных растворов солей и паровоздушной смеси внутрипоровое вещество можно рассматривать как двухкомпонентную систему с замкнутыми включениями. В зависимости от объемных концентраций компонентов связующим может быть и раствор соли и паровоздушная смесь. Если раствора достаточно и он смачивает всю поверхность пор, а в месте их сужения может образовывать растворные термические мостики /2/, то паровоздушную смесь следует рассматривать как включения. Если раствора недостаточно и он не покрывает всей поверхности пор, а смачивает лишь участки вокруг выходных отверстий капилляров, то паровоздушную смесь можно рассматривать как связующее. Однако установить действительную роль компонентов этой системы с точки зрения теплообмена весьма сложно. В такой ситуации, как и А.Миснар /2/, можно последовательно принимать в качестве связующего раствор и паровоздушную смесь, а коэффициент теплопроводности системы определять как среднее значение двух вычислений.

При образовании в порах материала кристаллов солей из насыщенных растворов теплопроводность внутрипорового вещества нужно определять отдельно. Расчет системы, включающей паровоздушную смесь и раствор, выполняется по изложенной схеме с учетом измененных объемных концентраций компонентов. Кристаллы солей

вместе со скелетом материала следует рассматривать как двухкомпонентную твердую фазу. Такая схема согласуется с методикой /5/ по расчету эффективной теплопроводности твердых капиллярно-пористых тел.

Доля конвективной и лучистой составляющих теплопроводности материалов зависит от размера пор и разницы температур на противоположных стенках этих пор. Уменьшение значений любого из этих двух показателей сокращает долю конвективной и лучистой составляющих теплопередачи. Так, при диаметре пор до 5 мм и перепаде температур 10<sup>0</sup>С конвективный теплообмен практически равен нулю, а лучистая составляющая не превышает 0,75 от теплопроводности сухого воздуха. Отмечается /6/, что в обычных условиях эксплуатации вклад конвективной и лучистой составляющих в теплопроводность материалов с порами до 3 мм не превышает 1–2%. Учитывая, что размер подавляющего числа пор пенопластов не превышает 1мм, а перепад температур на стенках этих пор незначителен, теплопередачей за счет конвекции и излучения можно пренебречь.

В соответствии с результатом работ / 2, 7/ можно записать выражения для определения коэффициента теплопроводности паровоздушной смеси в порах солевого материала

$$\lambda_{рд} = \lambda_0 + d_t \Delta c \cdot \varphi_{рн} \cdot q_t \cdot f / 100, \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  - коэффициент теплопроводности сухого воздуха, Вт/(м·К);  $d_t$  - коэффициент диффузии паров при данной температуре, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta c$  - разность концентраций паров воды в воздухе при перепаде температуры на 1 К, кг/(м<sup>3</sup>·К);  $\varphi_{рн}$  - значение гигроскопической точки насыщенного раствора соли, %;  $q_t$  - теплота испарения воды при данной температуре, Дж/кг;  $f = \Delta H_p / \Delta H_v$ . Здесь  $\Delta H_p$  и  $\Delta H_v$  - теплота испарения одного моля воды из раствора и чистой воды при данной температуре.

Второе слагаемое формулы (1) дает верхнюю оценку диффузной составляющей коэффициента теплопроводности паровоздушной смеси. Вклад диффузии в теплопередачу связан с характером распределения влаги в капиллярах, порах и трещинах материала. Так как теплопередача за счет диффузии происходит в порах и трещинах, то имеет значение их объемная доля в общей пористости, а также количество воды в материале. В связи с этим при расчете коэффициента теплопроводности паровоздушной смеси во второе слагаемое формулы (1) предлагается вводить множитель  $k$ , определяемый из выражения

$$k = 4m_{2p} (1 - m_{2p}) k_m, \quad (2)$$

где  $k_m$  - максимальное значение поправочного коэффициента диффузной составляющей, устанавливаемое с помощью опытных данных ( $0 < k_m \leq 1$ );  $m_{2p}$  - объемная концентрация воды или раствора по отношению к объему пор (за вычетом объема кристаллов соли), определяемая по формуле

$$m_{2p} = 0,01 \rho_0 (\omega + c') / (\rho_p \cdot m_2). \quad (3)$$

Здесь  $\rho_0$  и  $\rho_p$  – плотность материала и раствора (воды) соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c'$  – содержание растворенной соли, %;  $m_2$  – объемная концентрация внутрипорового вещества без кристаллической соли, доли единицы.

В расчетах принято допущение о том, что при влагосодержании  $\omega$ , меньшем сорбционного  $\omega_p$  при относительной влажности воздуха  $\phi_v$ , соответствующей гигроскопической точке  $\phi_r$  исследуемой соли, солевые растворы не образуются и  $c'=0$ . При  $\omega \geq \omega_p$  образуется раствор, концентрация которого  $c_p$ , % равна

$$c_p = 100c / (\omega + c). \quad (4)$$

Формула (4) имеет смысл, если найденное по ней значение  $c_p$  не превышает концентрации насыщенного раствора исследуемой соли  $c_n$ , %. В этом случае  $c'=c$ . Если расчеты по формуле (4) дают соотношение  $c_p \geq c_n$ , то принимается  $c_p = c_n$ . Тогда

$$c_p = \omega c_n / (100 - c_n). \quad (5)$$

Плотность раствора, определяемая при  $\omega > 0$ , находится из выражения

$$\rho_p = \rho_v + 100c' (\rho_p^n - \rho_v) / (c' + \omega) c_n, \quad (6)$$

где  $\rho_v$  и  $\rho_p^n$  – плотность воды и насыщенного раствора соответственно,  $\text{кг/м}^3$ .

Объемная концентрация кристаллической соли в материале

$$m_{2к} = 0,01\rho_0(c - c') / \rho_c, \quad (7)$$

где  $\rho_c$  – плотность соли,  $\text{кг/м}^3$ .

Объемная концентрация внутрипорового вещества (без кристаллов соли)

$$m_2 = 0,01P - m_{2к}, \quad (8)$$

где  $P$  – пористость материала, %.

Объемная концентрация соли в растворе по отношению к объему раствора равна

$$m_{2с} = \rho_p c' / (\omega + c') \rho_c. \quad (9)$$

Объемная концентрация паровоздушной смеси по отношению к объему пор

$$m_{2вд} = (0,01P / m_2) - m_{2р}. \quad (10)$$

Объемная концентрация кристаллической соли в твердой фазе материала

$$m_{2к}^* = m_{2к} / (1 - m_2) \quad (11)$$

Рассмотренное описание процесса теплопередачи в пористых солесодержащих материалах было увязано в единый вычислительный алгоритм, который реализован в виде программы для ЭВМ. С помощью вычислительного эксперимента установлено, что диффузия водяных паров в порах пенопластов может играть заметную роль в процессе теплопередачи. Расчеты показывают, что для пенопласта, имеющего плотность  $200 \text{ кг/м}^3$  и влажность 60% (14,4% объема пор заполнены водой) максимальный ( $k_m=1$ ) вклад диффузии паров воды в теплопередачу составляет 46%, а реальный ( $k_m=0.3$ ) – 16%. С уменьшением плотности (увеличением пористости)

пенопласта вклад диффузии паров в теплопередачу возрастает. Повышение теплопроводности твердой основы материала приводит к уменьшению диффузной составляющей.

Для сухого или относительно сухого пенопласта увеличение солесодержания приводит к заметному росту коэффициента теплопроводности, так как теплопроводность кристаллов солей на порядок выше, чем полимерной основы. При нарастающем увлажнении пенопласта в его порах образуются все новые объемы водных растворов соли, теплопроводность которых не превышает теплопроводности чистой воды, и сокращается количество твердой фазы. В результате эффект повышения теплопроводности, вызываемый кристаллами солей, поглощается эффектом понижения теплопроводности, обусловленным образованием растворов. На это взаимодействие накладывается сложный эффект диффузной составляющей теплопередачи. Соотношение между отмеченными эффектами изменяется с изменением влажности материала и при некотором ее значении коэффициенты теплопроводности засоленного и незасоленного материалов становятся одинаковыми. При дальнейшем увлажнении засоленный материал имеет более низкую теплопроводность.

Следует отметить, что относительный эффект повышения теплопроводности при одинаковом приросте объемной концентрации воды и соли в пенопласте проявляется значительно сильнее, чем в традиционных стеновых материалах и вероятность отказа ограждений по теплоизолирующей способности возрастает. Расчеты показывают, что если рост объемной концентрации воды в незасоленном пенопласте плотностью  $60 \text{ кг/м}^3$  (пористость 95 %) и глиняном кирпиче плотностью  $1300 \text{ кг/м}^3$  (пористость 50 %) происходит от 0 до 10 %, то значение коэффициента теплопроводности пенопласта увеличивается в 2,02 раза, а кирпича лишь в 1,21 раза. При наличии солей это соотношение для пенопласта еще более неблагоприятное. Поэтому проблема защиты материалов ограждений от накопления солей и влаги при использовании слоя пенопластового утеплителя является более острой, чем при использовании традиционных стеновых материалов. Для обеспечения надежности ограждающих конструкций различных зданий при воздействии солей требуется провести специальные мероприятия, которые должны поддерживать степень засоления материалов ограждений на безопасном уровне весь срок службы здания.

Полученные результаты позволяют обоснованно подойти к созданию некоторого запаса теплоизолирующей способности слоистых ограждений к началу эксплуатации. При наличии данных о соле- и влагосодержании материалов ограждений к концу срока эксплуатации и зависимости коэффициента теплопроводности от этих двух факторов запас теплоизолирующей способности ограждений обеспечивается довольно просто. Для этого в слоистой конструкции на основе расчета может предусматриваться либо увеличение толщины слоя утеплителя, либо использовать утеплитель с более низким значением коэффициента теплопроводности.

## Литература

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.
2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / Пер. с франц. - М.: Мир, 1968. - 464 с.
3. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. - 268 с.
4. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. - 1951. - Т.21. - Вып.6. - С.667-685.
5. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
6. Горчаков Г.И., Лифанов И.И. и др. Прогнозирование теплопроводности композиционных материалов различного строения // Строительные материалы. 1992. - N4. - С.27-29.
7. Обьедков В.А., Феофанова А.И., Езерский В.А. Коэффициент теплопроводности соледержащих каменных материалов // Вопросы температурно-влажностного режима памятников истории и культуры. Сб. научн. тр. НМС МК СССР. - М., 1990. С.18-33.

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ОГРАЖДЕНИЙ СТАРИННЫХ ЗДАНИЙ

*Никитин В.И.*

Прогнозирование долговечности материалов ограждений старинных зданий для планирования последующих ремонтов является важной и достаточно сложной проблемой. При ее решении можно использовать экспериментальный подход, основанный на предположениях теории форсированных испытаний /1, 2, 3, 4/.

Пусть  $\varepsilon', \dots, \varepsilon^k$  – параметры внешней среды, влияющие на долговечность материала. Эти параметры изменяются во времени. Функции, описывающие изменение значений параметров во времени, назовем режимом работы материала  $\varepsilon = f(\varepsilon', \dots, \varepsilon^k)$ . Среди множества возможных режимов следует выделить режим нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$  и форсированный режим  $\varepsilon_*$ , который обычно реализуется в эксперименте для сравнительной оценки долговечности материалов. Режим нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$ , как правило, является случайным. Форсированный режим  $\varepsilon_*$  носит детерминированный характер (например, циклические испытания образцов материала). Состояние материала описывается с помощью различных показателей (свойств), которые определяются его структурой, характеризуемой набором внутренних параметров  $\omega = (\omega^1, \dots, \omega^m)$ . В процессе работы или испытания изделия изменяется структура материала, утрачивается уровень первоначальных свойств и запас ресурса. При форсированных испытаниях это происходит быстрее, чем при