

УДК 620.1:536.24:690.86

Н.М. Стоянов, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***УТОЧНЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Представлены эмпирические зависимости, пригодные для определения коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов с плотностями в сухом состоянии от 20 до 500 кг/м³ при различном влагосодержании.

Настоящая работа является продолжением исследований, выполненных с целью получения обобщенных зависимостей, пригодных для приближенных вычислений коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов [1, 2].

Материалы с плотностями в сухом состоянии от 20 до 500 кг/м³ охватывают разнообразные теплоизоляционные материалы от мипоры ($\rho_c = 20$ кг/м³), кизельгура поршкового и пенопласта ($\rho_c = 35$ кг/м³), хлопковой и стеклянной ваты ($\rho_c = 50$ кг/м³), пластмассы полихлорвиниловой и пробковой крошки ($\rho_c = 60$ кг/м³), минеральной и шлаковой ваты ($\rho_c = 100$ кг/м³) до асбоцементных плит и диатомовых изделий ($\rho_c = 500$ кг/м³).

Коэффициенты теплопроводности капиллярно-пористых материалов с увеличением влажности возрастают. При полном насыщении материала влагой его коэффициент теплопроводности может увеличиваться по сравнению с теплопроводностью сухого материала в 15...20 раз. Так, согласно экспериментальным данным источника [3], теплопроводность торфа плотностью в сухом состоянии $\rho_c = 100$ кг/м³ возрастает от $\lambda_c = 0,04$ Вт/(м·К) до $\lambda_c^{\max} = 0,81$ Вт/(м·К) при полном влагонасыщении, т.е. более чем в 20 раз. Проектирование и эксплуатация жилых и промышленных зданий, подземных и подводных газонефтепроводов и других технических объектов без учета сильного, по сравнению с проектным, изменения теплопотерь строительных и конструкционных материалов не только нежелательны, но и опасны.

Рассматриваемый вопрос имел особую актуальность в середине XX столетия, что диктовалось бурным развитием энергетики, строительной индустрии, холодильной, криогенной, авиационной и космической техники, металлургии, сельскохозяйственного производства и других отраслей народного хозяйства, науки и техники. В этот период времени был проведен большой объем теоретических и экспериментальных работ по определению коэффициентов теплопроводности многих веществ, в том числе и влажных капиллярно-пористых материалов [4, 5] и др.

Исследователями были предприняты попытки получить обобщенные расчетные зависимости вида $\lambda_w = f(W)$. Теоретические решения вопросов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов не увенчались успехом из-за исключительной сложности процессов тепломассообмена во влажных капиллярно-пористых телах, поэтому предложенные расчетные уравнения были чисто эмпирическими. Эти зависимости, чаще всего, имели вид линейных уравнений с подобранными по экспериментальным данным численными коэффициентами в постоянной и переменной частях. Главными недостатками этих уравнений было то, что они носили частный характер и были пригодны для расчетов только конкретных материалов в очень узких пределах изменения их влажностей.

Отсутствие обобщенных расчетных зависимостей компенсировалось многочисленными экспериментами с каждым конкретным материалом в заданных пределах изменения влажностей. С течением времени, ввиду безуспешности решения проблемы, расчетное определение значений коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов потеряло свою актуальность. Вопрос этот, по нашему мнению, до сих пор остается нерешенным, хотя нужда в этом есть, особенно в связи с настоятельными требованиями повсеместного энергосбережения.

Основной целью настоящей работы является желание привлечь внимание научных и практических работников к необходимости дальнейших исследований с целью более глубокого изучения закономерностей процессов передачи тепла во влажных капиллярно-пористых материалах, получения обобщенных расчетных зависимостей, что поможет предсказывать значения коэффициентов теплопроводности неисследованных или малоисследованных материалов в сухом и влажном состоянии, упростить расчетные методики, компьютеризировать расчетные процедуры.

Предлагаемое исследование основано на экспериментальных данных источников [3-5], особенно [3], в котором представлены экспериментальные данные по влажным капиллярно-пористым материалам с плотностями в сухом состоянии от 100 до 2000 кг/м³ и влажностями их от нуля до максимальной. Важнейшим достоинством [3] является то, что значения коэффициентов теплопроводности

исследованных материалов получены при температуре таяния льда, т.е. при нулевом влиянии температурного фактора.

Достаточно подробный анализ экспериментальных данных, указанных выше источников, приведен в [2]; рисунок 1 взят из этой работы.

А В

С

Е

Рисунок 1 – Зависимость теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов от плотности в сухом состоянии ρ_c и влагосодержания W по [3]

Д

$W, \% \text{ мас.}$

Из рисунка 1 видно, что экспериментальные точки для влажных капиллярно-пористых материалов с исходной плотностью $\rho_c = 100; 200; 300; 400 \text{ кг/м}^3$ укладываются на вполне закономерные кривые. С ростом влагосодержания капиллярно-пористых материалов коэффициенты теплопроводности их возрастают и достигают максимальных значений $\lambda_v^{\max}$ при предельных влагосодержаниях $W_{\text{пред}}$. Величина предельного влагонасыщения определяется плотностью материала в сухом состоянии $W_{\text{пред}} = f(\rho_c)$. С увеличением плотности капиллярно-пористого материала в сухом состоянии предельное влагонасыщение снижается, а при снижении плотности ρ_c – возрастает. На основе экспериментальных данных построены графики зависимостей $W_{\text{пред}} = f(\rho_c)$ и $\lambda_v^{\max} = f(\rho_c, W_{\text{пред}})$.

Установленные связи между основными параметрами процесса теплопереноса позволили предложить УНИВЕРСАЛЬНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ, пригодную для приближенных вычислений значений коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов с плотностями в сухом состоянии от 50 до 400 кг/м^3 и влагосодержанием их от 0 до максимального (предельного), т.е.

$$\lambda_v = \lambda_c + k_\lambda \cdot W, \quad (1)$$

где λ_v и λ_c – значения коэффициентов теплопроводности во влажном и сухом состоянии капиллярно-пористых материалов, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; W – влагосодержание капиллярно-пористого материала, % массовых $\left[\frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сухого матер.}} \times 100 \right]$; k_λ – угловой коэффициент линейного уравнения (1), $\text{Вт/(м}\cdot\text{К}\cdot\%\text{мас.})$.

Значения k_λ определялись расчетами по экспериментальным данным для $\rho_c = \text{const}$ по зависимости

$$k_\lambda = \frac{\lambda_v^{\max} - \lambda_c}{W_{\text{пред}}}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов теплопроводности сухих расчетных капиллярно-пористых материалов λ_c принимаются по таблицам теплофизических свойств материалов из теплотехнических справочников. При отсутствии таблиц λ_c может быть приближенно определено выражением [1]

$$\lambda_c = 0,024 + 1,6 \cdot 10^{-4} \rho_c \quad (3)$$

или подсчитано по формулам Б.Н. Кауфмана [4].

Главным недостатком предложенного в [2] и приведенного выше уравнения (1) являются завышенные значения расчетных величин коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов по сравнению с действительными, особенно при $W \approx 0,5W_{\text{пред}}$ (отклонения до +75 и даже +100%). Промежуточные от λ_c до $\lambda_{\text{в}}^{\text{max}}$ значения коэффициентов теплопроводности находятся в пределах этих величин (экспериментальная кривая ДЕС и расчетная прямая ДС на рисунке 1).

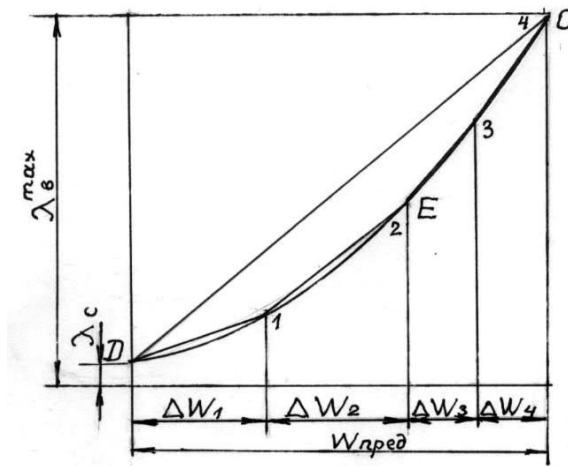
Попытка автора найти универсальную зависимость, описывающую экспериментальные кривые рисунка 1, не увенчалась успехом. Наиболее продуктивным оказался линейный полином вида

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_c + k_1 W + k_2 (W - \Delta W_1) + k_3 (W - \Delta W_1 - \Delta W_2) + k_4 (W - \Delta W_1 - \Delta W_2 - \Delta W_3) \quad (4)$$

или в свернутом виде

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_c + \sum_1^n k_i (W - \sum_0^{i-1} \Delta W_i), \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – угловые коэффициенты линейных уравнений участков 1, 2, 3, 4 (рисунок 2).



Уравнение (4) обеспечивает максимальные отклонения расчетных величин по сравнению с действительными не более +4%, которые находятся в пределах погрешностей теплотехнического эксперимента. В узловых точках расчетной ломаной линии отклонения расчетных величин от действительных равны нулю.

Рисунок 2 – Расчетная схема для определения значений коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов малой плотности

$$k \cdot 10^4, \\ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К} \cdot \% \text{ мас.})$$

$$k_4$$

$$k_3$$

$$k_2$$

$$k_1$$

$$\rho_c, \text{ кг/м}^3$$

Рисунок 4 – Зависимости угловых коэффициентов расчетного линейного полинома (4) от плотности капиллярно-пористого материала в сухом состоянии

Угловые коэффициенты k_1 – k_4 определялись расчетами по экспериментальным данным следующим образом:

$$k_i = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{\Delta W_i}. \quad (6)$$

По результатам расчетов построены графики рисунков 3 и 4.

Область использования уравнения (4) можно расширить от $\rho_c = 50$ до 20 кг/м^3 и от $\rho_c = 400$ до 500 кг/м^3 . Экстраполяция кривых $k_i = f(\rho_c)$ вполне оправдана их характером и их физической сущностью.

Использование уравнения (4) при проведении расчетов требует знания численных значений $W_{\text{пред}}$. Указанная величина, как это отмечалось выше, является функцией плотности капиллярно-пористого материала в сухом состоянии $W_{\text{пред}} = f(\rho_c)$. Согласно экспериментальным данным (рисунок 5), зависимость эта имеет вид равнобокой гиперболы

$$\rho_c \cdot W_{\text{пред}} = \text{const}, \quad (7)$$

$$k \cdot 10^4, \\ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К} \cdot \% \text{ мас.})$$

$$k_4$$

$$k_3$$

$$k_2$$

$$k_1$$

$$\rho_c, \text{ кг/м}^3$$

Рисунок 3 – Зависимости угловых коэффициентов расчетного линейного полинома (4) от плотности капиллярно-пористого материала в сухом состоянии

$$\text{или} \quad \rho_c \cdot W_{\text{пред}} = 90000, \quad (8)$$

если ρ_c имеет размерность кг/м^3 , а $W_{\text{пред}}$ % массовых, т.е. $\left[\frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сухого матер.}} \times 100 \right]$.

При проведении расчетов по уравнению (4) $\Delta W_1 = \Delta W_2 = 1/3 \cdot W_{\text{пред}}$; $\Delta W_3 = \Delta W_4 = 1/6 \cdot W_{\text{пред}}$ (рисунок 2). Такое требование расчетной процедуры обусловлено малой кривизной экспериментальных кривых на начальном участке (1-й и 2-й участки) и резко возрастающей кривизной экспериментальных кривых на последующих участках (3 и 4).

Предложенные в данной работе уравнения (4) и (8), а также графики рисунков 3, 4 являются УНИВЕРСАЛЬНЫМИ и позволяют определять значения коэффициентов теплопроводности любых влажных капиллярно-пористых материалов в диапазоне плотностей их в сухом состоянии от $\rho_c = 20$ до 500 кг/м^3 при влагосодержании их от 0 до предельного $W_{\text{пред}}$. Расчетные процедуры легко реализуются с помощью ЭВМ, поскольку графики рисунков 3, 4 могут быть затабулированы. Расчетные данные соответствуют нормальным физическим условиям, т.е. температуре 0°C и давлению $0,1013 \text{ МПа}$.

Температурный фактор при определении значений коэффициентов теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов не учитывался. Его учет требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, что в перспективе послужит задачей дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Стоянов Н.М. Определение коэффициентов теплопроводности сухих капиллярно-пористых материалов с учетом их плотности и пористости / Н.М. Стоянов // 36. наук. праць СВМІ ім. Нахімова. — Севастополь, 2003. — Вип. 3. — С. 5–8.
2. Стоянов Н.М. Определение коэффициентов теплопроводности влажных теплоизоляционных материалов малой плотности / Н.М. Стоянов // Вестник СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2004. — Вып. 55. — С. 113–120.
3. Телегин Л.Г. Охрана окружающей среды при сооружении и эксплуатации газонефтепроводов / Л.Г. Телегин, Б.М. Ким, В.И. Зоненко. — М.: Недра, 1988. — 188 с.
4. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов / Б.Н. Кауфман. — М.: Госстройиздат, 1955. — 216 с.
5. Чиркин В.С. Теплопроводность строительных материалов / В.С. Чиркин. — М.: Машгиз, 1962. — 247 с.

Поступила в редакцию 6.04.2006 г.

