

УДК 536.2.022

## **Влияние термовлагопроводности на термическое сопротивление пористых материалов**

**С.С. Ефимов, Е.Г. Старостин, Н.И. Таппырова**

*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск*

E-mail: e.g.starostin@iptpn.ysn.ru

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости термоградиентного коэффициента от влажности пористых материалов. Полученные экспериментальные данные использованы для оценки влияния термовлагопроводности на перенос тепла.

**Ключевые слова:** пористый материал, термовлагопроводность, влажность, термическое сопротивление, термоградиентный коэффициент.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Под воздействием градиента температуры в пористых телах наблюдается термовлагопроводность, т. е. происходит передвижение влаги. Это явление находит практическое применение, например, при термообработке, сушке материалов [1]. Термовлагопроводность играет существенную роль также в процессах миграции влаги в грунтах, строительных материалах. Механизмы ее возникновения в зависимости от форм связи влаги и поровой структуры материала очень сложны и разнообразны. Термовлагопроводность обычно учитывается в уравнениях тепло-массообмена через термоградиентный коэффициент.

Противоречивость литературных данных по термоградиентному коэффициенту не позволяет достоверно оценить вклад термовлагопроводности в общий поток влаги и энергии. Недостаточно обоснованно сложилось мнение о его незначительности, в результате чего в расчетах теплообмена этим коэффициентом пренебрегают.

Термоградиентный коэффициент в общем случае зависит от влагосодержания и температуры тела. Наиболее сильна его зависимость от влагосодержания, которая часто имеет остро выраженный максимум [2–4]. Температура влияет на значение коэффициента незначительно, поэтому этой зависимостью для небольших диапазонов ее изменения можно пренебречь.

В настоящей работе проведены экспериментальные измерения термоградиентного коэффициента в пористых материалах в зависимости от влагосодержания. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы экспоненциальной функцией, которая использована при оценке влияния термовлагопроводности на термическое сопротивление пластины из влажного пористого материала.

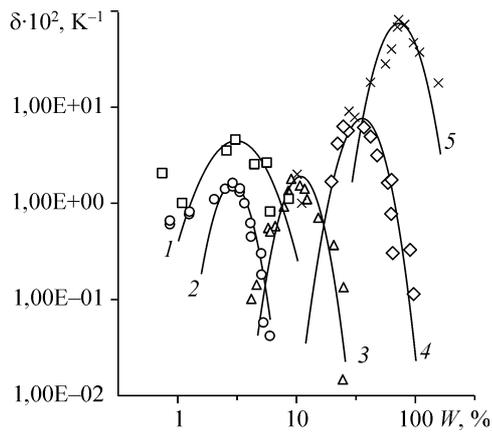


Рис. 1. Зависимость термоградиентного коэффициента от влажности.

Экспериментальные данные и аппроксимирующие кривые: 1 — кирпич красный, 2 — песок речной, 3 — суглинок покровский, 4 — бумага фильтровальная, 5 — опилки сосновые.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание экспериментальной установки и методика проведения измерений приведены в работе [3]. Для экспериментального определения термоградиентного коэффициента

во влагоизолированном образце поддерживается постоянный перепад температуры до наступления влажностного равновесия, т. е. до прекращения процесса внутреннего перераспределения влаги. Перепад температуры создается с помощью электронагревателя и измеряется медь–константановой термопарой. Установившиеся к концу опыта градиенты температуры и влагосодержания тела, как правило, противоположны по направлению (знаку). Термоградиентный коэффициент рассчитывается по формуле  $\delta = -(\Delta W / \Delta T)_{J_m=0}$ , где индекс  $J_m = 0$  показывает наступление стационарного состояния.

Проведены экспериментальные исследования зависимости термоградиентного коэффициента от влажности в красном кирпиче, речном песке, покровском суглинке, фильтровальной бумаге и сосновых опилках. Результаты измерений и их обработка показаны на рис. 1. Кривые зависимости термоградиентного коэффициента от влажности для всех исследованных материалов имеют идентичную форму с острым максимумом.

В таблице приведены значения максимальной сорбционной влажности исследованных материалов. Сравнительный анализ этих данных и результатов измерения термоградиентного коэффициента показывает, что во всех исследованных материалах термовлагопроводность существенно проявляется в диапазоне выше максимальной сорбционной влажности. Например, в сосновых опилках термовлагопроводность ощутимо проявляется в диапазоне влажности от 20 до 160 %. Максимальное значение термоградиентного коэффициента  $0,8 \text{ K}^{-1}$  достигается при влажности 72 %. Максимальная сорбционная влажность сосновых опилок приблизительно равна 27 %. Видно, что термовлагопроводность в основном проявляется при более высоких влажностях.

В диапазоне сорбционной влажности, особенно в его верхней части, термовлагопроводность также наблюдается, хотя значения термоградиентного коэффициента в этом случае значительно ниже, чем при более высоких влажностях.

Таблица

Характеристики исследованных материалов

Материал	Максимальная сорбционная влажность $W_{s^*}, \%$	Коэффициенты уравнений (5)		
		$W_m, \%$	$A_\delta \text{ K}^{-1}$	$B_\delta$
Песок речной	0,5	2,9	0,016	0,16
Суглинок покровский	8,3	10	0,02	0,16
Бумага фильтровальная	26	34	0,077	0,2
Кирпич красный	0,6	3	0,045	0,5
Опилки сосновые	27	72	0,8	0,2

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полученные экспериментальные значения термоградиентного коэффициента в исследованных материалах позволяют оценить вклад термовлагопроводности в перенос как влаги, так и теплоты. Анализ показывает, что влияние термовлагопроводности на теплоперенос может быть значительным. В простейшем случае это проявляется в изменении термического сопротивления при перераспределении влаги под влиянием градиента температуры.

Одним из основных показателей теплоизоляционных материалов является термическое сопротивление образца, определяемое как отношение разности температур лицевых поверхностей образца к плотности теплового потока в условиях стационарного теплового режима [5]. В настоящей работе полученные экспериментальные данные использованы для оценки влияния перераспределения влаги на термическое сопротивление влажного дисперсного материала.

Рассматривается задача о стационарном линейном тепловом потоке в пластине из влажного дисперсного материала, ограниченной двумя параллельными плоскостями, с учетом перераспределения влаги под воздействием термовлагопроводности. Система дифференциальных уравнений состоит из уравнений теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \lambda(W) \frac{dT}{dx} = 0 \quad (1)$$

и термовлагопроводности

$$\delta(W) \frac{dT}{dx} + \frac{dW}{dx} = 0, \quad (2)$$

где  $T$  — температура,  $W$  — влажность,  $\lambda(W)$  — теплопроводность,  $\delta(W)$  — термоградиентный коэффициент ( $K^{-1}$ ).

На поверхностях пластины поддерживаются постоянные температуры

$$T(x_1) = T_1 \text{ и } T(x_2) = T_2, \quad (3)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты поверхностей пластины.

Пластина гидроизолирована, т. е. выполняется условие

$$\int_{x_1}^{x_2} W dx = W_0 (x_2 - x_1), \quad (4)$$

где  $W_0$  — начальная (средняя) влажность материала.

Количественные выкладки проведены с использованием экспериментальных значений термоградиентного коэффициента и теплопроводности сосновых опилок.

Зависимость термоградиентного коэффициента от влажности для исследованных материалов аппроксимирована функцией (см. рис. 1)

$$\delta(W) = A_\delta \exp \left( - \frac{(\ln W - \ln W_m)^2}{B_\delta} \right), \quad (5)$$

где  $W_m$  — влажность, при которой достигается максимальное значение термоградиентного коэффициента,  $A_\delta$  и  $B_\delta$  — постоянные.

Коэффициенты функции (5) для исследованных материалов, полученные обработкой экспериментальных данных, представлены в таблице.

Экспериментальные данные, приведенные в работе [6], показывают, что зависимость теплопроводности опилок от влажности является значительной. Данная зависимость достаточно хорошо описывается линейной функцией

$$\lambda(W) = A + BW, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные.

В расчетах, результаты которых приведены ниже, приняты следующие значения постоянных:  $A = 0,139$ ,  $B = 0,00163$ .

Используя значение теплового потока, полученное в результате решения данной задачи, определяем термическое сопротивление пластины с учетом перераспределения влаги

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q}, \quad (7)$$

где  $q$  — тепловой поток через пластину.

Для сравнения рассчитывается термическое сопротивление пластины без учета перераспределения влаги

$$R_1 = \frac{x_2 - x_1}{A + BW_0}. \quad (8)$$

С использованием (7) и (8), рассчитывается относительное изменение термического сопротивления в результате перераспределения влаги

$$K = \frac{R - R_1}{R_1} 100 \%. \quad (9)$$

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Решение задачи проведено при варьировании перепада температуры в пластине  $T_1 - T_2$  от 10 до 100 °С, начальной влажности  $W_0$  от 10 до 150 %, толщины пластины  $x_2 - x_1$  от 0,1 до 1 м. Результаты расчета относятся только к положительному диапазону температур. Это связано, во-первых, с тем, что уравнение термо-влажносто-проводности (2) описывает перераспределение влаги без ее замерзания и оттаивания. Достижение стационарного режима при перераспределении влаги, сопровождаемого льдовыделением, не может быть описано в рамках рассматриваемой модели.

Во-вторых, экспериментальные значения термоградиентных коэффициентов получены также при положительной температуре. Возможность их использования в области отрицательных температур требует дополнительного обоснования.

Результаты вычислений при принятых в задаче условиях показывают, что термо-влажносто-проводность вызывает значительное перераспределение влажности по толщине пластины. При этом распределение влаги по толщине пластины является нелинейным и при определенных условиях образуется узкий участок, внутри которой влажность изменяется очень резко (рис. 2).

Такое перераспределение влаги отражается и в характере изменения температуры по толщине пластины. Температура в пластине изменяется не по линейному закону (рис. 3). Характер температурной кривой определяется не только тепло-влажносто-проводностью и термоградиентным коэффициентом, но и начальной влажностью и перепадом температуры между поверхностями пластины.

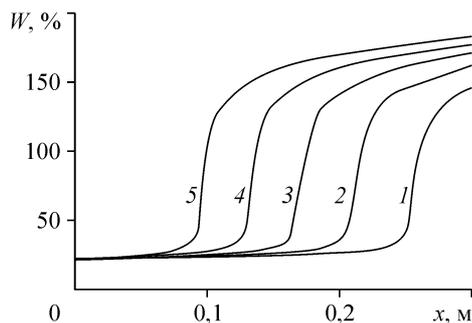


Рис. 2. Распределение влажности по толщине пластины.

Толщина пластины 0,3 м, перепад температуры в пластине 40 °С, начальная влажность (масс. %): 40 (1), 60 (2), 80 (3), 100 (4), 120 (5) %.

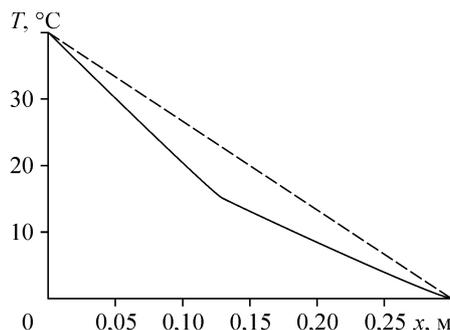


Рис. 3. Изменение температуры по толщине пластины.

Начальная влажность 100 %, перепад температуры 40 °С.

Очевидно, что в результате перераспределения влаги теплопроводность материала, которая является функцией влажности, также изменяется в пластине от точки к точке. Характер кривой теплопроводности по толщине пластины является подобным распределению влажности (рис. 4).

Расчеты показывают, что в результате всего этого происходит значительное изменение термического сопротивления пластины. Результаты расчета относительного изменения термического сопротивления в результате перераспределения влаги приведены на рис. 5 и 6.

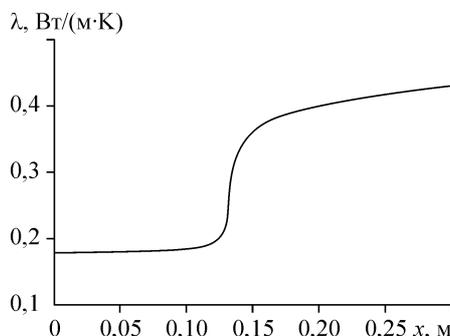
Относительное изменение термического сопротивления зависит от начальной влажности материала пластины и перепада температуры. Кривая относительного изменения термического сопротивления при превышении начальной влажности сосновых опилок значения 20–30 % резко возрастает и при определенном ее значении (в рассматриваемом случае около 100 %) достигает максимума (рис. 5). Дальнейшее повышение начальной влажности ведет к его понижению. Это связано с характером зависимости термоградиентного коэффициента от влажности. Повышение начальной влажности выше 100 % приводит к тому, что распределение влажности в пластине определяется значениями термоградиентного коэффициента, лежащими в интервале правее пика в его зависимости от влажности (см. рис. 1). В этом интервале термоградиентный коэффициент резко понижается, и именно это проявляется уменьшением относительного изменения термического сопротивления при превышении значения начальной влажности 100 % (см. рис. 5).

Увеличение перепада температуры ведет к повышению термического сопротивления (см. рис. 6). Относительное изменение термического сопротивления резко возрастает с ростом перепада температуры при его малых значениях. Последующее увеличение перепада температуры вызывает более медленный рост относительного изменения термического сопротивления.

Как показывают результаты расчета (см. рис. 5, 6), перераспределение влаги вызывает повышение термического сопротивления пористого материала.

Рис. 4. Изменение теплопроводности по толщине пластины.

Начальная влажность 100 %, перепад температуры 40 °С.



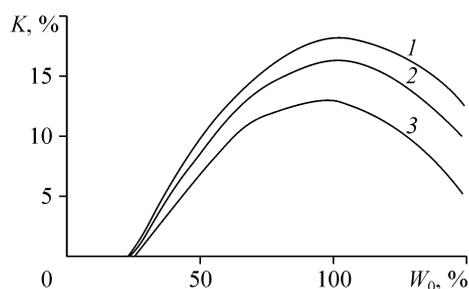


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $K$  от начальной влажности.

Толщина пластины 0,3 м, перепад температуры: 60 (1), 40 (2), 20 (3) °С.

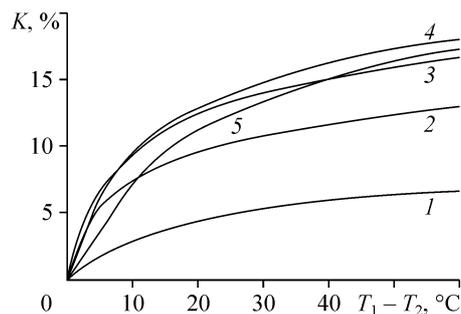


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $K$  от перепада температуры.

Толщина пластины 0,3 м, начальная влажность: 40 (1), 60 (2), 80 (3), 100 (4), 120 (5) %.

Относительное изменение термического сопротивления в результате перераспределения влаги в случае пластины из сосновых опилок является значительным и в определенных условиях достигает 15–18 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1967. 471 с.
2. Hansen M.H. Estimation of transfer coefficients in models for coupled heat and transfer in porous media // Technical Report 283-1993. Building Materials Laboratory. Techn. University of Denmark. Lyngby, 1993. 135 p.
3. Ефимов С.С. Экспериментальное исследование термодиффузионного переноса поровой влаги // Тр. I Евразийского симп. Часть IV. Якутск, 2002. С. 76–83.
4. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н., Миронов В.А. Осмотический массоперенос. Тверь: Изд-во ТГТУ, 2007. 228 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
6. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Научно-исслед. ин-т строит. физики Госстроя СССР, 1969. С. 21–27.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2010 г.