

УДК 691.327.32

И.Я. КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук,
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Москва)

Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий

Учет зависимости сорбционной влажности и теплопроводности строительных материалов от температуры при расчете процессов тепло- и массопереноса через наружные ограждающие конструкции и их приведенного сопротивления теплопередаче обеспечивает повышение точности этих расчетов.

Ключевые слова: строительные материалы, ограждающие конструкции, температура, равновесная сорбционная влажность, сопротивление теплопередаче.

Уменьшение расхода строительных материалов при возведении зданий без нарушения требований к теплотехническим показателям наружных ограждающих конструкций является частью научной проблемы энерго- и ресурсосбережения в строительстве.

Метод расчета зависимости равновесной сорбционной влажности w (далее – сорбционной влажности) строительных материалов от относительной влажности воздуха и температуры в диапазоне изменения относительной влажности воздуха φ от 0,2 (20%) до 0,99 (99%) и температуры T от 262,75 К (-10,4°C) до 308,15 К (+35°C) описан в [1]. С практической точки зрения представляет интерес эмпирическая зависимость (1) сорбционной влажности строительных материалов, полученная путем обработки результатов расчетов сорбционной влажности w в вышеуказанных диапазонах изменения относительной влажности воздуха и температуры:

$$w(\varphi, T) = (a_m T + b_m) \left[\frac{a_a \exp(b_a T)}{RT(-\ln \varphi)} \right]^{a_r \exp(b_r T)}, \quad (1)$$

где w – сорбционная влажность, кг/кг; φ – относительная влажность воздуха, Па/Па; T – температура, К; $a_m, b_m, a_a, b_a, a_r, b_r$ – эмпирические константы.

Численные значения эмпирических констант, входящих в эту формулу, определены методом регрессивного анали-

за для ряда широко применяемых строительных материалов [1] и представлены в таблице.

Уравнение (1) и численные значения эмпирических констант, приведенные в таблице, применены при расчете температурных и влажностных полей, а также приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен общественных зданий из ячеисто-бетонных блоков (коэффициент теплотехнической однородности 0,9) и однослойных стеновых панелей из легкого бетона (коэффициент теплотехнической однородности 0,9), возведенных в Краснодаре. При изготовлении этих блоков и панелей применены следующие материалы:

- пенобетон: плотность $\gamma_0=750$ кг/м³; теплопроводность при температуре +25°C $\lambda_{25}=0,19$ Вт/(м·°C); расчетное значение теплопроводности $\lambda_A=0,28$ Вт/(м·°C); коэффициент пересчета теплопроводности по температуре $f_{\theta}=0,0018$ 1/°C; коэффициент пересчета теплопроводности по влажности $f_w=0,04$ 1/%; паропроницаемость $\mu=0,15$ мг/(м·ч·Па) = $0,42 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па);
- керамзитобетон на керамзитовом песке: плотность $\gamma_0=1200$ кг/м³; теплопроводность при температуре +25°C $\lambda_{25}=0,36$ Вт/(м·°C); расчетное значение теплопроводности $\lambda_A=0,44$ Вт/(м·°C); коэффициент пересчета теплопроводности по температуре $f_{\theta}=0,0012$ 1/°C, коэффициент пересчета теплопроводности по влажности

Материал	Плотность γ_0 , кг/м ³	Эмпирические константы					
		$a_m, 10^{-5} \times \text{кг}/(\text{кгК})$	$b_m, \text{кг}/\text{кг}$	$a_a, 10^7 \times \text{Дж}/\text{кмоль}$	$b_a, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$	a_r	$b_r, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$
Керамзитоперлитобетон	850	-1,27	0,0203	1,55	-3,69	0,326	1,08
Арболит	650	-9,05	0,0627	4,99	-8,21	0,181	3,98
Шунгизитобетон	1100	-0,593	0,0128	25,8	-12,2	0,162	2,42
Пенобетон	750	-6,01	0,0337	28,9	-14,3	0,145	4,67
Керамзитобетон	1200	-4,18	0,0198	5,81	-7,66	0,158	3,67
Газобетон	400	-9,41	0,0413	23,1	-12,9	0,792	6,11
Газобетон	700	-13,6	0,0584	2,26	-4,91	0,24	3,03
Фильтровальная бумага	–	-24	0,105	44,3	-14,9	0,0581	6,73

$f_w=0,04$ 1%; паропроницаемость $\mu=0,11$ мг/(м·ч·Па) = $0,31 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па);

- керамзитоперлитобетон: плотность $\gamma_0=850$ кг/м³; теплопроводность при температуре +25°C $\lambda_{25}=0,24$ Вт/(м·°C); расчетное значение теплопроводности $\lambda_s=0,31$ Вт/(м·°C); коэффициент пересчета теплопроводности по температуре $f_{\theta}=0,0017$ 1/°C; коэффициент пересчета теплопроводности по влажности $f_w=0,04$ 1%; паропроницаемость $\mu=0,17$ мг/(м·ч·Па) = $0,47 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па).

Для реально возведенных зданий: толщина стен из пенобетонных блоков $d=0,3$ м; толщина панелей из керамзитобетона $d=0,5$ м; толщина панелей из керамзитоперлитобетона $d=0,35$ м.

Расчет температурных и влажностных полей этих наружных стен выполнен при условиях стационарной диффузии водяного пара по методу К.Ф. Фокина [2].

Согласно СП 23-101–2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» и методу К.Ф. Фокина [2] при расчете температурных и влажностных полей наружных стен общественных зданий в Краснодаре: расчетная температура внутреннего воздуха $T_{in}=293,15$ К (+20°C); расчетная относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{in}=55\%$; расчетная зимняя температура наружного воздуха равна среднемесячной температуре наиболее холодного месяца $T_{ex}=271,35$ К (-1,8°C); расчетная относительная влажность наружного воздуха равна среднемесячной относительной влажности наружного воздуха наиболее холодного месяца $\phi_{ex}=83\%$; градусо-сутки отопительного периода $D_f=2682$ °C·сут.

Расчеты температурных и влажностных полей вышеописанных наружных стен, выполненные с применением формулы (1) и численных значений эмпирических констант, представленных в таблице, показывают, что приведенное сопротивление теплопередаче стен из ячеисто-бетонных блоков $R_0=1,4$ м²·°C/Вт, из керамзитобетона $R_0=1,31$ м²·°C/Вт и из керамзитоперлитобетона $R_0=1,32$ м²·°C/Вт, что соответственно на 26, 15 и 16% больше, чем значения этого показателя, вычисленные по СП 23-101–2004, т. е. вычисленные без учета зависимости сорбционной влажности и теплопроводности материалов от температуры.

Уравнение (1) и численные значения эмпирических констант, приведенные в таблице, были применены при расчете температурного и влажностного полей, а также приведенного сопротивления теплопередаче трехслойной стеновой панели на гибких связях (коэффициент теплотехнической однородности 0,89), примененной при строительстве жилых зданий в Москве. При изготовлении этой панели использованы следующие материалы:

- внутренний слой толщиной 0,12 м и наружный слой толщиной 0,07 м из керамзитобетона на керамзитовом песке (плотность $\gamma_0=1200$ кг/м³; теплопроводность при температуре +25°C $\lambda_{25}=0,36$ Вт/(м·°C); расчетное значение теплопроводности $\lambda_s=0,52$ Вт/(м·°C); коэффициент пересчета теплопроводности по температуре $f_{\theta}=0,0012$ 1/°C; коэффициент пересчета теплопроводности по влажности $f_w=0,04$ 1%; паропроницаемость $\mu=0,11$ мг/(м·ч·Па) = $0,31 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па);
- средний слой из экструдированного пенополистирола ПС-4А-40 (плотность $\gamma_0=45$ кг/м³; теплопроводность при температуре +25°C $\lambda_{25}=0,034$ Вт/(м·°C); расчетное значение теплопроводности $\lambda_s=0,039$ Вт/(м·°C); коэффициент пересчета теплопроводности по температуре

$f_{\theta}=0,0045$ 1/°C; коэффициент пересчета теплопроводности по влажности $f_w=0,0010$ 1%; паропроницаемость $\mu=0,004$ мг/(м·ч·Па) ($0,011 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па)).

Расчет температурного и влажностного полей данной трехслойной наружной стеновой панели выполнен при условиях стационарной диффузии водяного пара по методу Фокина [2].

Согласно СП 23-101–2004 и методу Фокина [2] при расчете температурного и влажностного полей данной трехслойной наружной стеновой панели, примененной при строительстве жилых зданий в Москве: расчетная температура внутреннего воздуха $T_{in}=293,15$ К (+20°C); расчетная относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{in}=55\%$; расчетная зимняя температура наружного воздуха равна среднемесячной температуре наиболее холодного месяца $T_{ex}=262,95$ К (-10,2°C); расчетная относительная влажность наружного воздуха равна среднемесячной относительной влажности наружного воздуха наиболее холодного месяца $\phi_{ex}=84\%$; градусо-сутки отопительного периода $D_f=4943$ °C·сут; толщина среднего слоя из пенополистирола $d=0,12$ м.

Расчеты температурного и влажностного полей вышеописанной трехслойной наружной стеновой панели, выполненные с учетом зависимости теплопроводности и сорбционной влажности материалов стены от температуры, показывают, что приведенное сопротивление теплопередаче стены $R_0=4,06$ м²·°C/Вт, что на 29% больше, чем значение этого показателя, вычисленное по СП 23-101–2004, т. е. вычисленное без учета зависимости сорбционной влажности и теплопроводности материалов от температуры.

В данной работе приведены примеры применения результатов выполненных исследований зависимости теплопроводности и сорбционной влажности строительных материалов от температуры при расчете процессов тепло- и массопереноса через различные наружные ограждающие конструкции зданий, как ранее традиционно используемые в отечественном строительстве, так и современные в различных условиях их эксплуатации.

Из анализа проведенных расчетов следует, что применение результатов выполненных исследований при расчете процессов тепло- и массопереноса через наружные ограждающие конструкции зданий и их приведенного сопротивления теплопередаче обеспечивает:

- повышение точности расчета теплозащитных свойств ограждающих конструкций и зданий в целом;
- уменьшение расхода строительных материалов при возведении зданий без нарушения требований к теплотехническим показателям наружных ограждающих конструкций, что, в свою очередь, обеспечивает решение научной проблемы энерго- и ресурсосбережения в строительстве, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Список литературы

1. Киселев И.Я. Эмпирические формулы, описывающие изотермы сорбции строительных материалов при положительных и отрицательных температурах // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2010. Вып. 14. Т. 2. С. 87–93.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табунщикова и В.Г. Гагарина. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.