

Моделирование процессов тепло- и влагопереноса в строительных конструкциях (одномерная задача)

Расчет увлажнения и высыхания строительных конструкций по-прежнему является трудной задачей. Отключение вентиляционных систем, в связи со спадом производства и экономией энергоресурсов, сделало задачу прогноза состояния строительных конструкций еще более актуальной, чем ранее. К сожалению, современные строительные нормы не позволяют в полной мере увидеть, что будет происходить с конструкциями во время периода эксплуатации. В настоящей работе автор хочет показать возможности программы по имитационному моделированию МОДЭН для решения таких задач.

Теоретическое введение

Существует несколько известных теорий влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий. Наиболее известные из них теории К.Ф.Фокина, В.Н.Богословского и А.В.Лыкова. Воспользуемся некой обобщенной теорией, изложенной в работе [1].

Влагоперенос в строительных конструкциях происходит за счет переноса влаги, находящейся в паровой фазе (паропроницаемость) и за счет переноса капельной влаги (влагоперенос или влагопровоность). Полученные ниже зависимости будут верны, как при увлажнении материала (повышении влагосодержания), так и при его высыхании (понижении влагосодержания). Оба эти процесса идут в материале постоянно, поэтому мы не будем, если в этом нет особой необходимости, оговаривать, какой именно процесс происходит. Чаще всего оба эти процесса будем называть одним термином «увлажнение».

Всякий материал при увлажнении проходит несколько стадий. На первой стадии материал вступает в равновесие с окружающей воздушной средой, имеющей определенную влажность. При этом с увеличением влажности воздушной среды увеличивается и влажность материала (сорбция), а при снижении влажности среды – влажность материала понижается (десорбция). Для каждого строительного материала имеется зависимость влажности его влажности от относительной влажности воздуха (при постоянной температуре). Такая зависимость называется изотермой сорбции, а такую влагу называют сорбционной. Графическое представление изотермы сорбции можно увидеть на рис. 1. Заметим, что сорбционная влажность зависит только от относительной влажности воздуха и не зависит от его температуры [3]. Обозначим сорбционную влажность материала W_s . Измеряется она в % от веса сухого материала.

Если относительная влажность воздуха достигла 100%, то дальнейшее увеличение влаги в материале может происходить только за счет капельной влаги.

Эти два вида влаги (паровая и капельная) характеризуются двумя видами ее переноса внутри материала.

Перенос влаги в паровой части происходит по формуле (одномерный перенос по оси x)

$$G_p = \mu * dP/dx, \quad (1)$$

Значение μ приводится в [7]. В некоторых случаях удобнее использовать не коэффициент паропроницаемости, а сопротивление паропроницанию

$$R_p = dx/\mu, \quad (2)$$

Перенос капельной влаги происходит по выражению (одномерный перенос по оси x)

$$G_k = \beta * dW_s/dx, \quad (3)$$

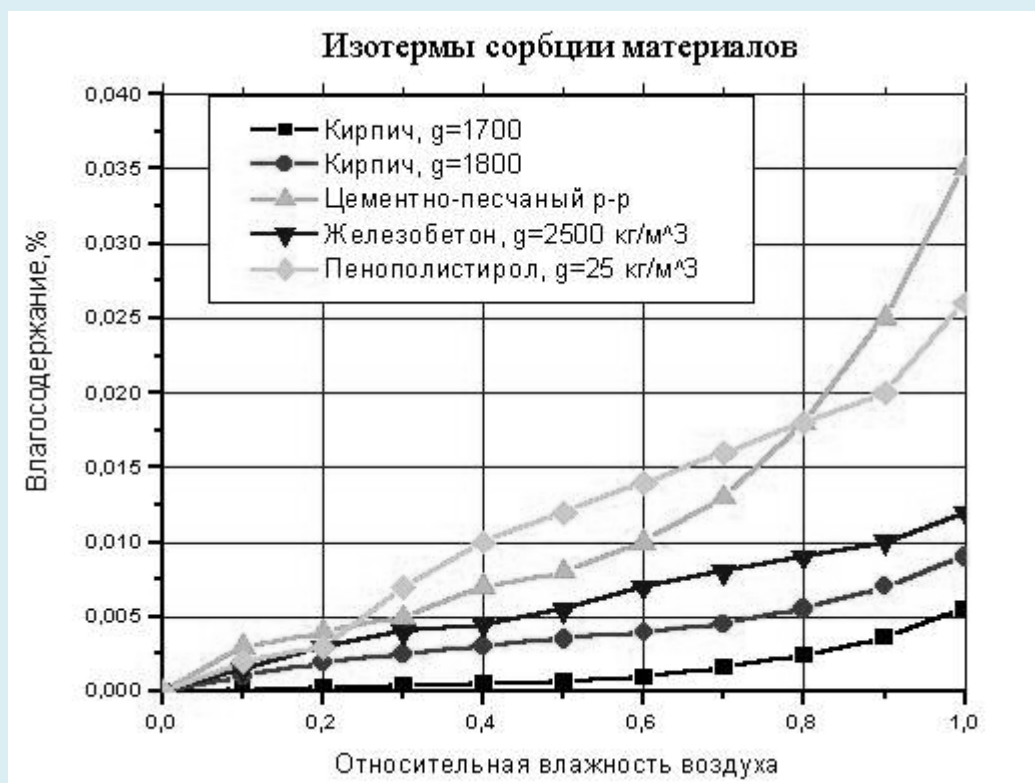


Рис.1.Изотермы сорбции материалов

Значение коэффициента влагопроводности приводится, например, в руководстве [2]. Коэффициент влагопроводности зависит не только от вида материала, но и от весовой капельной влажности (см. ниже).

Рассмотрим обычное трехслойное ограждение (одномерная задача). Основные характеристики материала (теплопроводность, коэффициент паропроницаемости, коэффициент влагопроводности) постоянны внутри слоя. Будем считать, основные параметры материала (температура, парциальное давление, влагосодержание) принадлежат оси слоя. Для большей наглядности изложения мы не будем разбивать каждый слой на более мелкие слои.

Каждый слой материала, как объект программы МОДЭН, имеет шесть портов:

Порт 1. Тепло.

Порт 2. Тепло.

Порт 3. Сорбционная влага.

Порт 4. Сорбционная влага.

Порт 5. Капельная влага.

Порт 6. Капельная влага.

Поскольку в программе мы не различаем вход от выхода, то обычно считаем, что первый из двух портов для каждого потока получает (передает) энергию (массу) изнутри помещения, а второй отдает (получает) ее наружу.

Запишем уравнение теплопереноса для порта 1 слоя 1

$$Q_1 = (1 / (1 / \alpha_{in} + \delta_1 / (2 * \lambda_1))) * (T_{in} - T_1), \quad (4)$$

Запишем уравнение теплопереноса для порта 2 слоя 1

$$Q_2 = (1 / (\delta_1 / (2 * \lambda_1) + \delta_2 / (2 * \lambda_2))) * (T_1 - T_2). \quad (5)$$

Коэффициент теплопроводности λ зависит от влажности материала. Эту зависимость можно представить в виде [4]

$$\lambda_w = \lambda * (1 + W * Z / 100), \quad (5-1)$$

Запишем уравнение паропроницаемости для порта 3 слоя 1

$$G_3 = (1 / (R_{\min} + \delta_1 / (2 * \mu_1))) * (P_{in} - P_1). \quad (6)$$

Запишем уравнение паропроницаемости для порта 4 слоя 1

$$G_4 = (1 / (\delta_1 / (2 * \mu_1) + \delta_2 / (2 * \mu_2))) * (P_1 - P_2). \quad (7)$$

Запишем уравнение влагопроводности для порта 5 слоя 1

$$G_5 = (1 / (R_{\text{кин}} + \delta_1 / (2 * \beta_1))) * (W_{\text{sin}} - W_{s1}). \quad (8)$$

Запишем уравнение влагопроводности для порта 6 слоя 1

$$G_6 = (1 / (\delta_1 / (2 * \beta_1) + \delta_2 / (2 * \beta_2))) * (W_{s1} - W_{s2}). \quad (9)$$

В слое 1 во время теплопереноса происходит аккумуляция тепловой энергии, которая характеризуется уравнением

$$dQ_{ak1} = c_{p1} * \delta_1 * \rho_1 * dT_1, \quad (10)$$

Сорбционная влажность материала зависит от относительной влажности воздуха, т.е. $W_s = W_s(\varphi)$, тогда

$$dW_s / d\tau = (\delta W_s / \delta \varphi) * d\varphi / d\tau. \quad (11)$$

Найдем из уравнения (11) $d\varphi$, т.е. определим, как меняется относительная влажность воздуха при увлажнении материала на dW_s

$$d\varphi = dW_s / (\delta W_s / \delta \varphi). \quad (12)$$

S-образную кривую сорбцию (см. рис.1) можно представить в виде полинома

$$W_s = A_1 * \varphi^1 + A_2 * \varphi^2 + A_3 * \varphi^3. \quad (13)$$

Если $\varphi = 1$, то сорбционная влажность материала достигает своего максимального значения

$$W_{s\max} = A_1 + A_2 + A_3. \quad (14)$$

Подставим значение из (13) в уравнение (12)

$$d\varphi = dW_s / (A_1 + 2 * A_2 * \varphi + 3 * A_3 * \varphi^2). \quad (15)$$

Как уже ранее было сказано, влагосодержание материала состоит из двух слагаемых – сорбционной и капельной влаги. Иногда второе слагаемое называют переувлажнением материала (W_f). Общий приток влаги в материал равен

$$G = G_3 + G_4 + G_5 + G_6. \quad (16)$$

Если относительная влажность воздуха меньше 1, то вся эта влага идет на изменение сорбционной влажности материала (W_s). Если же относительная влажность достигла 1, то эта влага идет на изменение переувлажнения материала (W_f).

Общее содержание влаги материала равно

$$W = W_s + W_f. \quad (17)$$

В руководстве [2] приведены значения коэффициента влагопроводности при двух значениях влажности материала, поэтому мы смогли представить значение β только в виде линейного полинома

$$\beta = B_0 + B_1 * W_s. \quad (18)$$

Если величина максимальной сорбционной влажности нам известна, то максимальное значение капельной влаги, которое может впитать материал (влагопоглощение), в литературе нами не обнаружен. Обычно считается, что влагопоглощение равно пористости материала [5]. Если после конденсации объем капельной влаги достигнет значения влагопоглощения и конденсация будет продолжаться, мы примем, что весь избыточный объем влаги должен будет на внешнюю или внутреннюю поверхность ограждения.

Пример моделирования трехслойного ограждения

Рассмотрим обычную трехслойную стеновую панель с теплоизоляцией из пенополистирола (см. рис.2). В качестве ограждающей конструкции использовано ограждение, рассчитанное в работе [7]. Все константы материалов приведены в таблице 1, они совпадают и с константами принятыми в работе [7], за исключением констант по сорбционной влажности и влагопроводности, которые в упомянутой работе не используются. В настоящем примере нами не использовалась зависимость влагопроводности от влажности, которая рекомендуется для пенополистирола в работе [7]. Расчет ведется на 1 м² площади ограждающей конструкции.

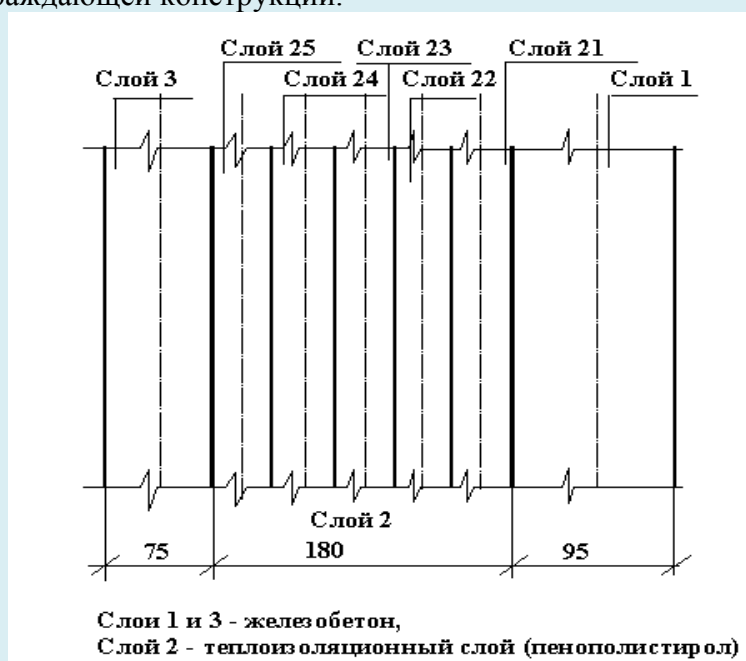


Рис. 2. Схема ограждающей конструкции

Слой 2 (пенополистирол) был разбит на 5 подслоев. Таким образом, конструкция состояла как бы из 7 слоев материалов. Эти подслои мы будем именовать 21...25 (см. рис.2).

Таблица 1.

№ пп	Параметр	Обозначение	Размерность	Слой 1, 3	Слой 2
1	Материал			Железобетон	Пенополистирол
2	Толщина слоя	δ	м	0,095/0,075	0,180
3	Плотность	ρ	кг/м ³	2500	25
4	Теплоемкость	c_p	Дж/(кг*°С)	840	1340
5	Теплопроводность	λ	Вт/(м*°С)	1,86	0,042
6	Влагопоглощение		%	12	50 ^{*)}
7	Коэффициент паропроницаемости	μ	кг/(м*Па*с)	6.076E-9	1,388E-8
8	Константа А1	А1		0,0159	0,03009
9	Константа А2	А2		0,01381	-0,019854
10	Константа А3	А3		0,00971	0,01535
11	Константа В0	В0		0,019	0,00436
12	Константа В1	В1		0,0228	0,00326

^{*)} При проведении компьютерного эксперимента выяснилось, что реально конденсируется значительно больше влаги.

Обычно строительная конструкция имеет начальную (строительную влагу), которая в процессе эксплуатации высыхает. Сейчас мы рассмотрим другую, на наш взгляд, более актуальную задачу. Строительная конструкция изначально была сухой, а лишь в процессе эксплуатации подверглась увлажнению из-за слишком высокой влажности внутри помещения. После такого увлажнения конструкцию необходимо высушить.

Компьютерный эксперимент проводился по следующей программе:

1. Время проведения эксперимента с 1.01.2001 по 1.01.2002. Шаг счета 5 минут.
2. Абсолютно сухой материал ограждения подвергался воздействию с одной (внутренней) стороны воздуха с влажностью 55% и температурой 20°С, а с другой (наружной) стороны наружным воздухом (климат Минска).

Значения переувлажнения слоев ограждения течение года, приведены на рис.3.

Из анализа рис.3 видно, что уже через несколько часов после начала эксперимента слой 25 достиг максимальной сорбционной влажности и стал переувлажняться. Менее чем через сутки слой 25 достиг влагонасыщения (50% от веса материала слоя, хотя в работе [8] была достигнута влажность и 70%). К началу вторых суток влажность материала слоя достигла своего максимального значения (влажность около 70%), затем упала и сравнительно долго продолжала оставаться неизменной (влажность около 40-30%, т.е. менее чем при насыщении). К началу апреля слой 25 высох.

В слое 3 переувлажнения наступило к началу вторых суток. Далее материал слоя 3 продолжал интенсивно увлажняться. К началу февраля слой достиг максимального переувлажнения и далее стал осушаться. Полное высыхание слоя произошло к началу апреля.

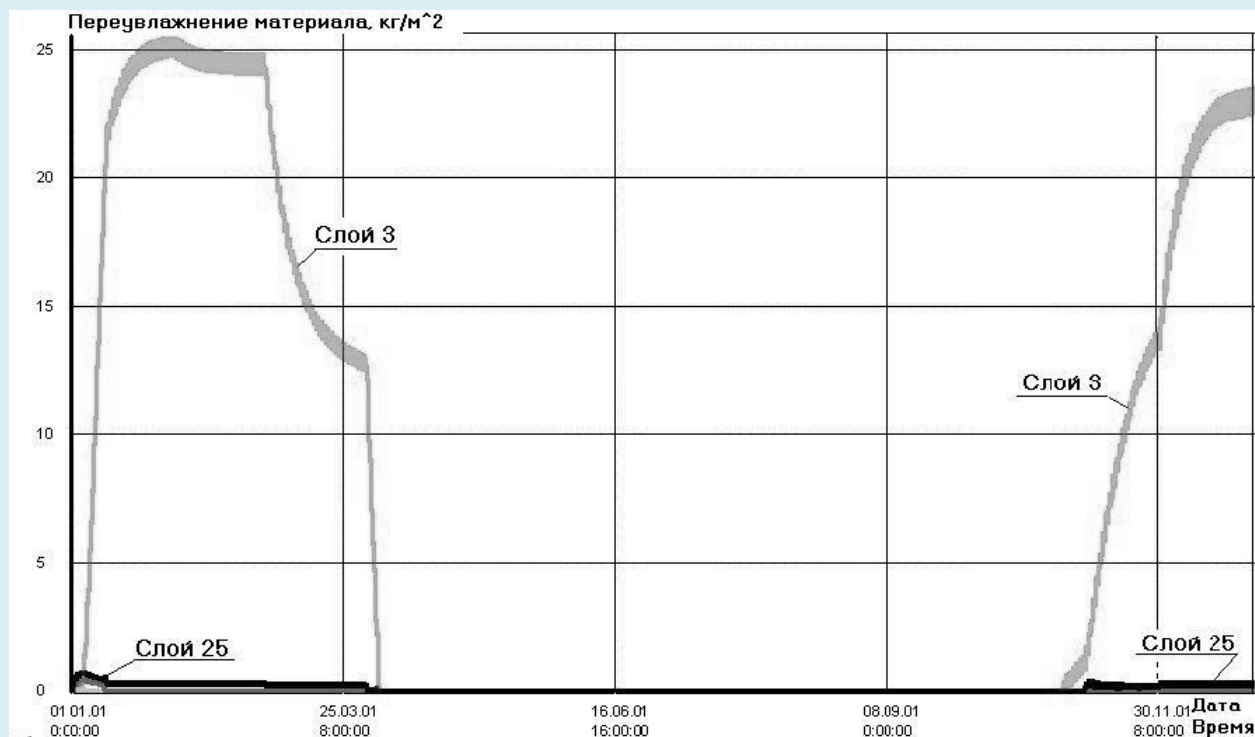


Рис. 3. Изменение переувлажнений по слоям

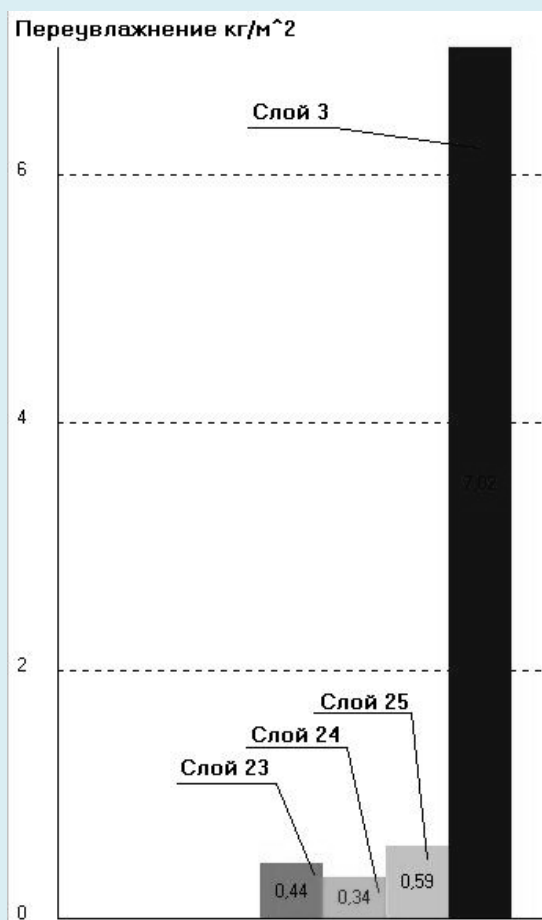


Рис. 4. Диаграмма переувлажнений слоев на начало 7-х суток

Слой 25 и 3 начали увлажняться с наступлением холодного периода и переувлажнение наступило в начале ноября. Значение переувлажнений по слоям на начало 7-х суток приведено на рис. 4 (если слой на рисунке не указан, то переувлажнение равно 0).

Рисунки 3 и 4 сняты с экрана монитора при работе программы МОДЭН.

Условные обозначения

μ - коэффициент паропроницаемости, кг*м/Па,
 dP/dx -градиент парциальных давлений водяного пара, Па/м,
 P -парциальное давление водяного пара, Па.
 dx – толщина слоя материала.
 β - коэффициент влагопроводности, кг/(м*с*%),
 dW/dx -градиент влагосодержания (по капельной влаге) материала, %/м,
 W -влагосодержание материала, %.
 α_{in} – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к ограждению, Вт/(м²*°С),
 λ_1 -коэффициент теплопроводности сухого материала слоя 1, Вт/(м*°С),
 λ_{w1} -коэффициент теплопроводности влажного материала слоя 1, Вт/(м*°С),
 T_1 - температура на оси слоя 1, °С,
 T_{in} - температура внутреннего воздуха, °С,
 δ_1 - толщина слоя 1, м,
 R_{min} – сопротивление паропроницанию от внутреннего воздуха к ограждению,
 μ_1 - коэффициент паропроницаемости слоя 1, кг*м/Па,
 P_1 - парциальное давление водяных паров на оси слоя 1, Па,
 P_{in} - парциальное давление водяных паров внутреннего воздуха, Па,
 R_{kin} - сопротивление влагопроводности от внутреннего воздуха к ограждению,
 β_1 - коэффициент влагопроводности слоя 1, кг/(м*с*%),
 W_1 -влагосодержание материала слоя 1, %,
 W_{in} - влагосодержание внутреннего воздуха, $W_{in}=0$, %,
 dQ_{ak1} - тепловая энергия, аккумулированная в слое 1 за шаг счета dt ,
 c_{p1} - массовая теплоемкость материала слоя 1, Дж/(кг*°С)
 ρ_1 - плотность материала слоя 1, кг/м³,
 dT_1 - изменение температуры слоя 1 за один шаг счета dt , °С,
 dt - шаг счета модели, с,
 W_s – весовая сорбционная влажность, %,
 W_f – переувлажнение или весовая капельная влажность материала, %,

ϕ - относительная влажность воздуха, (от 0 до 1),
 A_1, A_2, A_3 – константы, зависящие от материала слоя, в уравнении (13),
 G_3, G_4, G_5, G_6 - перенос влаги через порт 3, 4, 5, 6, кг/(с*м²),
 Q_1, Q_2 – перенос тепловой энергии через порт 1, 2, Дж/(с*м²)
 B_0, B_1 – константы, зависящие от материала слоя, в уравнении (18).

Условные обозначения показаны только для параметров слоя 1, аналогично, изменив только номер, можно получить параметры для других слоев.

Литература

1. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1974. –320 с.
2. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. - М.: Стройиздат, 1984. – 168 с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1972. –560 с.
4. Шильд Е. И др. Строительная физика. – М.: Стройиздат, 1982. – 294 с.
5. Решетин О.Л., Орлов С.Ю. Теория переноса тепла и влаги в капиллярно-пористом теле. – ЖТФ, 1998, 68, 2, 140-142.
6. БНБ 2.01.01-93. Строительная теплотехника.
7. Хлевчук В.Р. и др. Определение теплопроводности эффективной теплоизоляции в конструкции с учетом влажности. – Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сборник докладов. - М., НИИСФ, 2001, с. 319-328.
8. Курилюк И.С. Экспериментальные исследования влажности в стеновых панелях Краснопресненского завода ДСК-1. - Там же, с.301-307.