Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова.
1985, т. 106

УДК 543.275.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УТОЧНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОВАКУУМНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

И.А.ЯКОБИШВИЛИ

Термовакуумный метод измерения влажности основан на следующем: если тонкий, равномерный по толщине слой материала поместить в герметизированный объем и вакуумировать его, то вследствие интенсивного поглощения энергии при фазовом переходе воды в парообразное состояние температура материала начнет понижаться. По мере испарения воды интенсивность парообразования снижается и температура материала в результате теплообмена с окружающей средой начнет повышаться до температуры стенок камеры. Изменение температуры будет иметь экстремум, величина которого зависит от влажности. Эти выводы могут быть обоснованы анализом явлений тепло- и массопереноса внутри влажного материала при сбросе давления.

Тепло- и массоперенос в вакууме имеет сложный характер и поэтому точное решение задачи связано с большими трудностями. Авторам метода удалось получить основные закономерности процесса из анализа уравнения баланса тепла, содержащего отрицательный источник, связанный с испарением влаги [I].

Уравнение баланса тепла при пренебрежении плотностью лучевого теплообмена и теплопроводностью имеет вид:

$$\alpha_t(t_c - t) = c\gamma R\frac{dt}{d\tau} - r\gamma R\frac{dW}{d\tau}, \qquad (I)$$

где α_t – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(К·м^2); t_c – температура среды, К; t – мгновенная температура материала, К; c – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); γ – плотность, кг/м^3; R – толщина слоя материала, м; r – энергия фазового перехода связанной воды, Дж/кг; W – влажность мгновенная, кг/кг; τ – время, с.

Экспериментально найдено [I], что при малых влажностях изменение влагосодержания в образце происходит по закону:

$$\frac{dW}{d\tau} = W\alpha_p b\exp(-\alpha_p\tau), \qquad (2)$$

где b – коэффициент, показывающий степень удаления влаги при десорбции; α_p – экспериментальный коэффициент, характеризующий скорость десорбции, с$^{-I}$.

С учетом закона (2) уравнение (I) можно записать:

$$\frac{dt}{d\tau} - \frac{\alpha_t}{c\gamma R}(t_c - t) + \frac{\alpha_p b r W_0}{c} \exp(-\alpha_p \tau), \qquad (3)$$

где W_0 – начальная влажность, кг/кг.

При начальных условиях $t(0) = t_0 \neq t_c$ уравнение (3) имеет решение [3]:

$$\Delta t(\tau) = (t_0 - t_c) e^{-\frac{\tau}{T_1}} + \frac{T_1 b r W_0}{c(T_2 - T_1)} \left(e^{-\frac{\tau}{T_1}} - e^{-\frac{\tau}{T_2}} \right), \qquad (4)$$

где $\Delta t(\tau) = t(\tau) - t_c$ – изменение температуры материала в процессе вакуумирования; $T_1 = c\gamma R/\alpha_t$ – комплекс, характеризующий процесс конвективного теплообмена, с; $T_2 = 1/\alpha_p$ – постоянная времени десорбции, с.

Согласно выражению (4), для минимизации температурной погрешности, вызванной переменным начальным температурным напором $t_0 - t_c$, достаточно из информационного сигнала вычесть сигнал, равный $(t_0 - t_c)\exp(-\tau/T_1)$.

Для синтеза схем компенсации необходимо знать закон изменения комплекса T_1, связанного с другими физическими параметрами соотношением $T_1 = c\gamma R/\alpha_t$. Так как перепад температур в процессе измерения невелик, нелинейными эффектами, связанными с зависимостью удельной теплоемкости материала от температуры, можно пренебречь. То же самое будем иметь в виду относительно плотности γ и геометрического параметра R.

Коэффициент конвективного теплообмена α_t характеризует интенсивность передачи тепловой энергии от стенок вакуум-камеры к термоприемнику, если температура стенок камеры выше температуры термоприемника, и от термоприемника к среде, если температура последней ниже температуры термоприемника.

Значение коэффициента конвективного теплообмена зависит от многих физических факторов, таких как закон изменения температуры среды, интенсивность теплообмена между термоприемником и средой, физические свойства среды, характер изменения движения среды. Причем зависимость эта настолько сложна, что невозможно вывести аналитическое выражение, связывающее эти факторы между собой. Поэтому единственными надежными данными здесь являются эмпирические результаты [2].

Исследование параметра T_1 производилось на основе уравнения баланса тепла:

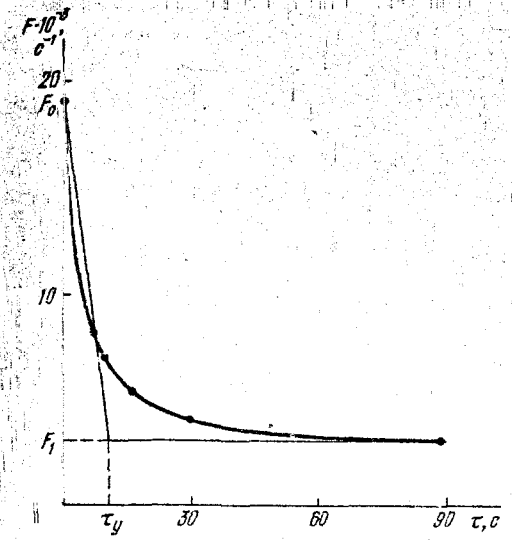
$$\frac{d\Delta t}{d\tau} + F\Delta t(\tau) = \frac{r}{c}\frac{dW}{d\tau}, \qquad (5)$$

где $F = 1/T_1 = \alpha_t/c\gamma R$.

Из выражения (5) имеем:

$$F = \frac{\frac{r}{c}\frac{dW}{d\tau} - \frac{d\Delta t}{d\tau}}{\Delta t(\tau)}. \qquad (6)$$

Таким образом, для определения F необходимо знать законы изменения температуры материала в процессе измерения $\Delta t(\tau)$ и ее производной



Нормированная кривая изменения параметра F по времени и ее линейная аппроксимация

$d\Delta t/d\tau$, а также закон изменения температуры материала, вызванный испарением воды из нее. Будем исходить из того, что параметр F не зависит от начальной влажности материала. Тогда исследование удобно производить для сухого материала, когда член $\frac{r}{c}\frac{dW}{d\tau}$ в уравнении (6) равен нулю.

При этом

$$F=\frac{\frac{d\Delta t}{d\tau}}{\Delta t(\tau)}. \qquad (7)$$

Эксперименты по определению параметра F производились по следующей методике: предварительно высушенный сыпучий материал нагревался до температуры, отличной от температуры среды и помещался в вакуум-камеру. С помощью специально созданной экспериментальной установки снимались кривые изменения температуры материала в процессе вакуумирования $t(\tau)$, температура стенок камеры t_c, а также кривая производной $d\Delta t/d\tau$. Как показали эксперименты, температура стенок камеры почти не менялась, поэтому можно считать $t_c = const$.

Подставляя значения $\Delta t(\tau) = t(\tau) - t_c$ и $d\Delta t/d\tau$ в уравнение (7), определим закон изменения F по времени (см. таблицу).

Результаты расчета параметра F

τ, с	Номер кривой и значение t_0, °С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	31,2	33,5	35,3	36,5	36,7	37	46,2	49,4	51,3	55,2
0	20	32	20,4	18,5	14,7	14,1	16,1	22,7	21,7	22,2
5	5,8	8,92	7,69	10,3	9,61	7,57	12,6	14,9	15,8	13,8
10	4,04	6,02	5,8	6,99	7,04	5,65	10,2	10	11,9	10,1
15	3,61	4,27	4,78	5,55	5,65	4,97	8,4	7,19	9,17	8,26
30	3,13	3,62	4,0	4,11	4,0	4,23	5,0	4,13	5,31	5,78
60	2,94	3,24	3,03	3,07	3,30	3,58	3,58	3,52	3,36	3,90
90	2,91	3,03	3,0	2,61	3,21	3,32	3,13	3,49	3,01	3,32
120	2,90	2,94	2,98	2,45	3,20	3,22	3,04	3,48	2,94	3,14
150	2,90	2,90	2,97	2,41	3,20	3,21	3,02	3,48	2,93	3,09

Как видно из рисунка, построенного по данным таблицы, параметр F не является величиной постоянной, как это предполагалось при решении дифференциального уравнения баланса тепла, а меняется во времени довольно в широких пределах. Это требует уточнения математической модели термовакуумного метода с учетом зависимости $F = f(\tau)$.

Полученную экспериментальную зависимость $F(\tau)$ можно аппроксимировать следующим образом (см. рисунок):

$$F(\tau) = \begin{cases} F_0 - k\tau & \text{при } \tau \leq \tau_y \\ F_1 & \text{при } \tau \geq \tau_y \end{cases}, \qquad (8)$$

где τ_y – время установившегося режима теплообмена; $F_1 = F_0 - k\tau_y$ – установившееся значение параметра; k – скорость изменения параметра F в переходном режиме.

Таким образом, процесс теплообмена можно разбить на два режима: переходный, при котором параметр F изменяется по линейному закону, и установившийся или стационарный режим теплообмена. Каждой области будет соответствовать свое уравнение теплового баланса:

при $\tau \leq \tau_y$

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} + (F_0 - k\tau)\Delta t = \frac{r}{c}\frac{dW}{d\tau}; \qquad (9)$$

при $\tau \geq \tau_y$

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} + F_1 \Delta t = \frac{r}{c}\frac{dW}{d\tau}. \qquad (10)$$

Уравнение (10) для переходного режима представляет собой линейное дифференциальное уравнение с переменными параметрами, решение которого при начальных условиях $\Delta t(0) = \Delta t_0 = 0$ имеет вид:

$$\Delta t(\tau) = brW_0 \frac{\left(e^{-\frac{\tau}{T_2}} - e^{-\tau F_0}\right)}{c(1 - T_2 F_0)} - \frac{brW_0 k}{c(1 - T_2 F_0)}\left[\frac{T_2^2}{(1 - T_2 F_0)^2} \times \right.$$

$$\left. \times \left(e^{-\frac{\tau}{T_2}} - e^{-\tau F_0}\right) + \frac{\tau T_2}{1 - T_2 F_0} e^{-\frac{\tau}{T_2}} + \frac{\tau^2}{2} e^{-\tau F_0}\right]. \qquad (11)$$

Как видно из выражения (11), при $k = 0$, $F_0 = F_1 = 1/T_1$ изменение температуры $\Delta t(\tau)$ аналогично изменению температуры по уравнению (4).

Выше рассматривалось решение дифференциального уравнения баланса тепла при нулевых начальных условиях. Для синтеза схем компенсации влияния начальной температуры пробы решающее значение имеет выявление закономерностей влияния начальных условий на вакуумную величину. Для выяснения этих закономерностей составим однородные уравнения, соответствующие дифференциальным уравнениям (9) и (10),

при $\tau \leq \tau_y$

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} + (F_0 - k\tau)\Delta t = 0; \qquad (12)$$

при $\tau \geq \tau_y$

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} + F_1 \Delta t = 0. \qquad (13)$$

Уравнение (12) легко решается в квадратурах и при начальных условиях $\Delta t(0) = \Delta t_0 \neq 0$ имеет вид:

$$\Delta t(\tau) = \Delta t_0 \exp(-F_0\tau + k\tau_y^2/2). \qquad (14)$$

Для установившегося режима теплообмена частное решение найдем из уравнения (13):

$$\Delta t'(\tau) = c \exp(-\tau F_1) = c \exp\left[\tau(F_0 - k\tau_y^2)\right]. \qquad (15)$$

Свободный член c находится из уравнения для переходного режима теплообмена и имеет вид:

$$c = \Delta t_0 \exp(-k\tau_y^2/2). \qquad (16)$$

Подставив выражение (16) в (15), окончательно получим частное решение дифференциального уравнения баланса тепла для установившегося процесса теплообмена:

$$\Delta t'(\tau) = \Delta t_0 \exp\left(-\frac{\tau}{T_1} - \frac{k\tau_y^2}{2}\right). \qquad (17)$$

Выражения (14) и (17) показывают влияние начального температурного напора Δt_0 на выходную величину влагомера при переходном и установившемся процессах теплообмена соответственно, и могут быть использованы для синтеза практических схем температурной компенсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венедиктов М.В., Согин А.Е., Татиевский В.Л. Колориметрический метод определения малых влагосодержаний. – ИФЖ, 1971, т. 20, № 1.

2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., Энергия, 1977.

3. Теория и практика реализации массопереносных методов определения влагосодержания / Венедиктов М.В., Татиевский В.Л., Согин А.Е., Издебский Э.А. – Приборы и системы управления, 1974, № 10.