Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XXXУП, 1978 г.

ОБ ОДНОЙ РАЗНОВИДНОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Е.С.КРИЧЕВСКИЙ, В.П.ТЕРЕХОВ, С.С.ГАЛУШКИН

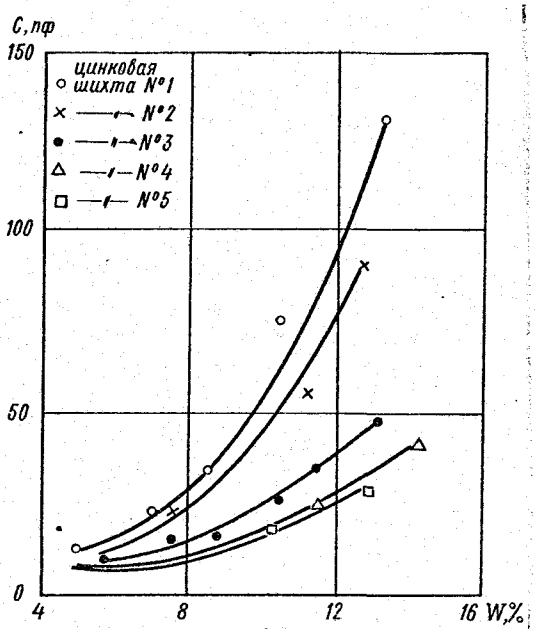


Рис.1. Частотно-влажностные характеристики цинковой шихты (C - емкость первичного преобразователя с шихтой, W - влажность)

Электрофизические характеристики продуктов обогащения, поступающих на горно-обогатительные предприятия с разных месторождений, как правило, разнороднь. Примером могут служить приведенные на рис.I частотно-влажностные характеристики концентратов, перерабатываемых в цинковом производстве Усть-Каменногорского свинцово-цинкового комбината. Очевидно, что при таком различии в диалектрической проницаемости и электропроводности влажных шихт высокочастотный контроль влажности исключается.

Для измерения влажности дисперсных материалов А.Ф.Чудновский предложил теплофизический метод, который положен в основу ряда зондовых измерителей влажности почв [3]. Рассмотрим разновидность этого метода, имеющую существенные особенности по сравнению с известными решениями. Проанализируем тепловые процессы в системе, которую будем рассматривать как идеализированную модель соответствующего первичного преобразователя.

Такая модель (рис.2) состоит из металлической пластины с массой m и площадью S $(d \ll S)$, которая нижней плоскостью наложена на слой сыпучего материала высотой h с температурой t_0, к ее верхней плоскости прикреплен термочувствительный элемент в виде конденсатора с массой $m_1 \ll m$. Вся система окружена адиабатической оболочкой. В начальный момент $\tau = 0$, предшествующий контакту пластины со слоем сыпучего материала, пластина на-

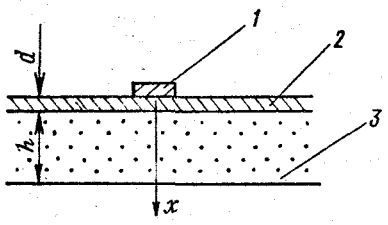


Рис.2. Модель емкостно-теплового первичного преобразователя влажности:
1 - термочувствительный конденсатор; 2 - металлическая пластина; 3 - сыпучий материал

грета до температуры t_1. Найдем изменение температуры пластины во времени (а следовательно, и величины электрической емкости закрепленного на ней конденсатора) при следующих допущениях:

1) пренебрегаем распространением тепла в направлении, перпендикулярном оси x, краевыми эффектами у границы пластины, а также теплообменом на нижней границе слоя сыпучего материала;

2) температуру пластины в силу ее малой толщины и большой теплопроводности считаем зависящей только от времени $t_1 = t_1(\tau)$;

3) пренебрегаем перераспределением влаги под действием градиента температуры по сравнению с ее абсолютным значением, а также испарением влаги;

4) предполагаем массу закрепленного на металлической пластине термочувствительного конденсатора много меньше массы самой пластины $(m_1 \ll m)$ и в силу этого считаем температуру пластины и термочувствительного конденсатора одинаковыми.

Обозначим температуру материала $t(\tau, x)$ и положим $\theta(\tau, x) = t(\tau, x) - t_0$, $\theta_1(\tau) = t_1(\tau) - t_0$. В этом случае математическая модель процесса при сделанных допущениях имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \qquad (1)$$

при $\theta\big|_{\tau=0} = 0$, $\theta\big|_{x=0} = \theta_1(\tau)$, $\left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=h} = 0$;

$$cm \frac{d\theta_1}{d\tau} = S\lambda \left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} \qquad (2)$$

при $\theta_1\big|_{\tau=0} = t_1 - t_0$,

где a – температуропроводность материала, $a = \lambda / c_m \rho$; λ, c_m, ρ – соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала; c – удельная теплоемкость пластины.

Произведя преобразования Лапласа по времени τ и решая полученную систему, приходим к выражению для преобразования искомой величины $t_1(\tau)$

$$\bar{\theta}(p) = \frac{t_1 - t_0}{p + \frac{1}{b}\sqrt{\frac{p}{a}}\,\mathrm{th}\sqrt{\frac{p}{a}}\,h}, \qquad (3)$$

где $b = \frac{cm}{S\lambda}$.

Обратное преобразование дает выражение для $t_1(\tau)$ в виде ряда

$$t_1(\tau) = t_0 + \frac{t_1 - t_0}{1 + \frac{c_m \rho h S}{cm}} + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \exp\left(-\mu_i^2 \frac{a}{h^2}\tau\right), \qquad (4)$$

где c_i – коэффициенты, имеющие размерность температуры; μ_i – положительные корни уравнения

$$\frac{bd}{h}\mu_i + \operatorname{tg}\mu_i = 0. \qquad (5)$$

Из выражения (4) видно, что при $\tau \longrightarrow \infty$ температура $t_1(\tau)$ стремится к постоянной величине

$$t_0 + \frac{t_1 - t_0}{1 + \frac{c_m \rho h S}{cm}},$$

которая определяется высотой слоя влажного материала h и его теплоемкостью c_m, т.е. в конечном счете влажностью сыпучего материала.

При конечных значениях τ температура $t_1(\tau)$ определяется в общем случае двумя тепловыми характеристиками сыпучего материала: теплоемкостью c_m и теплопроводностью λ.

Для получения высокой точности измерения первичным преобразователем, выполненным по принятой модели, необходим термочувствительный конденсатор с малой инерционностью и высоким температурным коэффициентом емкости. С учетом этих требований предпочтение следует отдать сегнетоэлектрическим конденсаторам – варикондам типа К-10-21А с массой в несколько миллиграмм и линейной крутизной преобразования (около 3 пФ/°С) в диапазоне температур от 20 до 80°С. Этот диапазон температур следует считать наиболее приемлемым для разработки тепловых первичных преобразователей влажности, так как при исходных температурах нагрева первичного преобразователя, превышающих 80°С, начинают сказываться процессы переноса и испарения влаги, а при температурах остывания первичного преобразователя ниже 20°С будет значительным влияние температуры окружающего воздуха. На основании принятых допущений величина емкости термочувствительного конденсатора во времени может быть записана выражением

$$C(\tau) = C_0\left\{1 + \text{ТКЕ}\left[(t_1 - t_1(\tau)\right]\right\}, \qquad (6)$$

где C_0 – емкость конденсатора при исходной температуре нагрева первичного преобразователя t_1; ТКЕ – температурный коэффициент емкости термочувствительного конденсатора.

Так как в принятой модели первичного преобразователя выходным параметром, отражающим влажность сыпучего материала, является электрическая емкость, то такого рода тепловой влагомер может быть реализован как при-

ставка к высокочастотному влагомеру, позволяющая измерять влажность по регистрируемому через фиксированный промежуток времени с момента начала охлаждения первичного преобразователя (при приведении его в контакт с сыпучим материалом) значению электрической емкости термозависимого конденсатора.

При построении экспериментальных кривых охлаждения первичного преобразователя, реализованного по описанной модели, на железорудном концентрате, на воздухе и в воде по оси ординат откладывали время охлаждения от исходной температуры, равной 75°С, а по оси абсцисс - величину постоянного напряжения, являющуюся результатом преобразования величины емкости термочувствительного конденсатора (рис.3). Наиболее быстрый темп охлаждения первичного преобразователя наблюдается при его контакте с водной средой, наиболее медленный - с воздухом. Экспериментальные кривые охлаждения первичного преобразователя на железорудном концентрате однозначно отражают связь с влажностью сыпучей среды: чем больше влажность, тем значительней крутизна охлаждения первичного преобразователя. Следовательно, отсчеты величины емкости термочувствительного конденсатора через фиксированный промежуток времени будут тем больше, чем выше влажность. Это обстоятельство согласуется с теоретическим выражением (3) и положено авторами в основу описанной разновидности теплофизического метода измерения влажности сыпучих продуктов обогащения [1, 2].

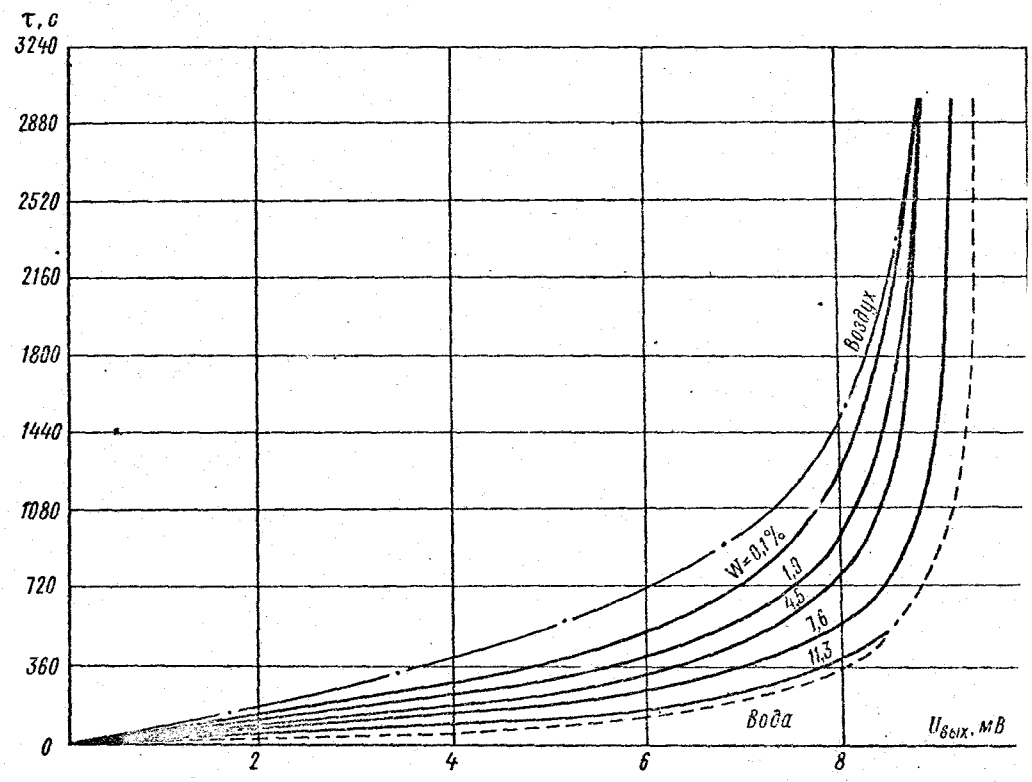


Рис.3. Кривые охлаждения емкостно-теплового первичного преобразователя влажности

ЛИТЕРАТУРА

1. Кричевский Е.С., Галушкин С.С., Терехов В.П. Устройство для дискретных измерений влажности. А.с. 521509 (СССР). Б.И., 1976, № 26.

2. Кричевский Е.С., Галушкин С.С., Терехов В.П., Майоров А.В. Датчик для измерения влажности. А.с. 516952 (СССР). Б.И., 1976, № 21.

3. Чудновский А.Ф. Теплофизический метод определения влажности капиллярно-пористых материалов. Журнал технической физики 1954, № 12.