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

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ВЛАГОМЕРОВ

А.Г.ВОЛЧЕНКО

Термовакуумный метод измерения влажности [4] основан на изменении температуры тонкого слоя пробы в процессе десорбции влаги в вакууме. Проба мелкодисперсного материала тонким слоем насыпается в кювету, дном которой служит плоский термочувствительный элемент (ТЧЭ). Затем кювета помещается в камеру, из которой откачивается воздух. Изменение температуры пробы относительно начальной служит информационным параметром, максимум модуля этого изменения является линейной или почти линейной функцией влажности [I]. Рассмотрим автоматический термовакуумный влагомер, в котором ТЧЭ включен в измерительный мост [5]. Балансировка моста осуществляется следящим приводом. Перед началом вакуумирования обмотка возбуждения двигателя следящего привода обесточивается и величина изменения температуры определяется по напряжению разбаланса измерительного моста цепью, состоящей из масштабного усилителя и устройства для регистрации экстремума. Применяя в качестве масштабного усилителя твердотельные операционные усилители, получили точность передаточной функции не менее 0,5%, при смещении нуля за время измерения не более 50-I00 мкВ. Такое малое смещение достигается коррекцией нуля перед каждым измерением. Основной задачей статьи является оценка влияния следящего привода на общую погрешность измерения.

Погрешность следящего привода имеет распределение, весьма близкое к двухмодальному дискретному, характеризующемуся парой значений $\pm c$. Величина c определялась с помощью магазина сопротивлений, имитирующего ТЧЭ для двух влагомеров ТВВ-5. Для первого прибора $c = \pm 0{,}06\% H_2O$, для второго $c = \pm 0{,}05\% H_2O$ по градуировке для аммофоса. Погрешность метода имеет как аддитивный, так и мультипликативный характер; распределение погрешности близко к нормальному. Для аммофоса среднеквадратичная погрешность $\sigma_н = 0{,}05I\% H_2O$ в диапазоне до I,5% H_2O , для нитроаммофоски $\sigma_н = 0{,}030\% H_2O$ в диапазоне до I,0% H_2O .

Для оценки общей погрешности влагомера [5] найдем второй σ и четвертый μ_4 моменты композиции распределений [2]

1170

$$\sigma^2 = \sigma_н^2\left[1+\left(\frac{c}{\sigma_н}\right)^2\right],$$

$$\mu_4 = \sigma_н^4\left[\left(\frac{c}{\sigma_н}\right)^4 + 6\left(\frac{c}{\sigma_н}\right)^2 + 3\right].$$

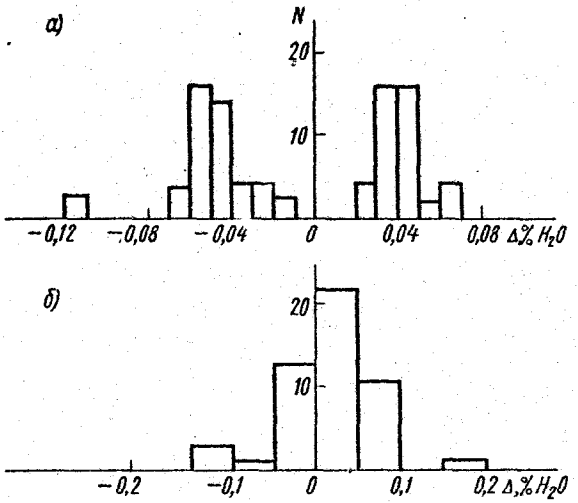


Рис.1. Гистограммы распределения ошибки влагомера ТВВ-5 для удобрений нитроаммофоска (а) и аммофос (б) с частотностью N

Для нитроаммофоски $c/\sigma_н = 2,0$; $\sigma = 0,067\%\ H_2O$; $\sqrt{\sigma^4/\mu_4} = 0,834$; для аммофоса $c/\sigma_н = 0,84$; $\sigma = 0,072\%\ H_2O$; $\sqrt{\sigma^4/\mu_4} = 0,631$.

Энтропийный коэффициент $K = \sigma/\Delta$ определялся графически [6] и равен 2 для аммофоса и 1,5 для нитроаммофоски (Δ – энтропийная погрешность). Погрешность оценивалась как разность между линией наименьших квадратов [3] и единичным измерением (рис.1). Гистограммы хорошо согласуются с распределениями погрешностей для различных $c/\sigma_н$ [2, 6] и значениями энтропийного коэффициента. Суммарная погрешность для аммофоса $\Delta = 0,15$ при доверительной вероятности

$$P(|x| \leqslant \Delta_д) = \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{\Delta_д + c}{\sqrt{2}\sigma_н}\right) + \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{\Delta_д - c}{\sqrt{2}\sigma_н}\right) = 0,957$$

и $\Delta = 0,10$ при $P(|x| \leqslant 0,10) = 0,960$. (Здесь $\Phi(t)$ – интеграл вероятности; $\Delta_д$ – доверительный интервал).

Если считать погрешность чисто аддитивной, то разрешающая способность прибора

$$R = \frac{W_в - W_н}{2\Delta},$$

где $W_н$, $W_в$ – соответственно нижнее и верхнее значения измеряемой влажности.

Для аммофоса $W_в = 1,5\%\ H_2O$; $W_н = 0,35\%\ H_2O$; $R = 4,2$; для нитроаммофоски $W_в = 1,0\%\ H_2O$; $W_н = 0,17\%\ H_2O$; $R = 4,35$.

Таким образом, пренебрежение погрешностью следящего привода может привести к завышению точности по сравнению с истинной. Единственной мерой,

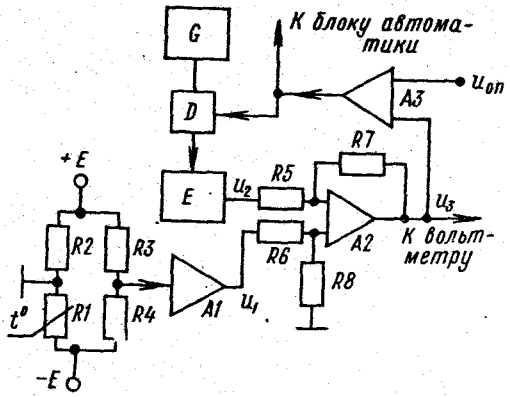


Рис.2. Функциональная схема прибора с программным уравновешиванием:
$R1$ - термочувствительный элемент; $A1$ - масштабный усилитель; $A2$ - схема аналогового вычитания; $A3$ - компаратор; G - генератор монотонно меняющегося напряжения; D - ключ; E - аналоговый элемент памяти; $U_{оп}$ - опорное напряжение компаратора

позволяющей повысить точность, является переход к программному уравновешиванию. Такой переход более прогрессивен также и со стороны схемотехники.

Измерительный преобразователь с программным уравновешиванием (рис.2) состоит из измерительного моста, образованного резисторами $R1-R4$, масштабного усилителя $A1$, вычитающего усилителя $A2$, компаратора нулевого уровня $A3$, источника монотонно увеличивающего напряжения G, аналогового ключа D и элемента аналоговой памяти E. Измерительный мост балансируется на минимальной или максимальной температуре пробы (граничная температура). При любой другой температуре пробы, лежащей в рабочем диапазоне, напряжение u_1 на выходе $A1$ линейно зависит от ее температуры. Линейность достигается также включением $A1$ в неинвертирующем режиме. До начала измерения напряжение на выходе $G = 0$. При измерении ключ D открыт и на вход аналоговой памяти E поступает монотонно увеличивающее напряжение u_2. С выхода $A2$ разность $u_2 - u_1$ подается на вход $A3$. В момент равенства $u_2 - u_1$ нулю компаратор $A3$ срабатывает и отключает G от E. На выходе E напряжение u_2 будет соответствовать начальной температуре прибора, а напряжение $u_3 = u_2 - u_1$ - приращению температуры θ.

Погрешность измерительного преобразователя с аналоговой памятью на конденсаторе с полистироловым диалектриком и усилителе К I40УД8 не превышает 0,01÷0,02% H_2O по градуировке для аммофоса, а закон распределения близок к нормальному. Так как погрешности измерительного и первичного преобразователей независимы, то суммарную погрешность можно найти из формулы

$$\sigma = \sqrt{\sigma_н^2 + \sigma_{изм}^2},$$

где $\sigma_{изм}$ - среднеквадратичная погрешность измерительного преобразователя.

Энтропийный коэффициент для нормального распределения $K = 2,07$, откуда энтропийная погрешность для аммофоса $\Delta = 0,106\%$ H_2O, для нитроаммофоски $\Delta = 0,075\%$ H_2O, что весьма близко к погрешности первичного преобразователя. Разрешающая способность для аммофоса 5,42, для нитроаммофоски - 5,53.

Таким образом, применение программного уравновешивания наряду со снижением стоимости и увеличением надежности позволяет на 30-40% повысить точность измерений, что особенно важно при измерении малых влагосодержаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калориметрический метод измерения малых влагосодержаний порошкообразных водорастворимых материалов / А.Е.Согин, В.Л.Татиевский, М.В.Венедиктов, Н.М.Рудный. Инженерно-физический журнал, 1971, т. 20.

2. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., Энергия, 1968.

3. Румшиский Л.З. Элементы теории вероятностей. М., Наука, 1970.

4. Теория и практическая реализация методов определения влагосодержания / М.В.Венедиктов, В.Л.Татиевский, А.Е.Согин, Э.А.Издебский. Приборы и системы управления, 1974, № 10.

5. Термовакуумная влагометрия – новый метод измерения влажности / Е.С.Кричевский, А.Г.Волченко, Ю.В.Подгорный, Р.М.Проскуряков. Измерительная техника, 1976, № 7.

6. Электрические измерения неэлектрических величин. Под ред. П.В.Новицкого. Л., Энергия, 1975.