

## Влияние степени уплотнения на показания высокочастотного измерителя влажности сыпучего сырья

В.С. КОРКО, доцент, канд. техн. наук, М.И. БУЛКО, аспирант (БАТУ)

**Р**азвитие автоматизации производственных процессов в АПК во многом зависит от совершенства приборов контроля различных технологических параметров.

Одним из важнейших параметров, от которого зависит качество выпускаемой продукции, является влажность. Поэтому влажность подлежит контролю и регулированию на всех этапах производства продукции: заготовка сырья, хранение, транспортировка, переработка, использование готовой продукции.

На точность измерения влияют ряд возмущающих воздействий, следовательно, точность высокочастотного измерителя влажности будет во многом зависеть от наличия устройств компенсации влияния этих воздействий.

Измерительная ячейка емкостного типа для сыпучего сырья представляет собой сосуд с металлическими электродами, заполненный контролируемым сырьем.

Конструкция и размеры ячеек, формы электродов могут быть разнообразны и зависят от вида материала и условий измерения. В общем случае устройство ячейки, являющейся первичным измерительным преобразователем влажности, должно способствовать получению максимальной чувствительности к изменению контролируемого параметра и минимальной чувствительности к изменениям неконтролируемых (возмущающих) воздействий.

Для первичного измерительного преобразователя (ПИП) емкостного типа главным выходным параметром является емкость, ко-

торая является сложной функцией многих параметров. [1]

$$C = F(W; T; S; X_i \dots), \quad (1)$$

где  $C$  - емкость ячейки;  
 $W, T, S, X_i$  - соответственно, влажность, температура, гранулометрический, химический состав и другие параметры контролируемого материала.

Значит емкостный измеритель влажности должен обеспечить выполнение условий:

$$C \rightarrow \max \text{ и } \sum(T; S; X_i) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Минимизация возмущающих воздействий является основной задачей при разработке любой влагометрической системы. Емкость измерительной ячейки  $C$  является функцией диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Диэлектрическая проницаемость показывает кратность превышения напряженности электрического поля в вакууме  $E$  без диэлектрика над  $E_{cp}$  того же поля в диэлектрике. [2]

$$\epsilon = \frac{E}{E_{cp}}. \quad (3)$$

При этом [2]

$$E_{cp} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \vec{I}}{\epsilon - 1}, \quad (4)$$

где  $\vec{I}$  - электрический или дипольный момент.

$$\vec{I} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i, \quad (5)$$

где  $m_i$  - элементарные дипольные моменты в единице объема диэлектрика;

$N$  - число диполей в единице объема диэлектрика, участву-

ющих в процессах поляризации.

Связь между  $\epsilon$ ,  $N$  и  $E$  определяется уравнением Клаузиуса-Моссотти [3,4].

$$P = N \cdot \alpha \cdot E \cdot \frac{\epsilon + 2}{3};$$

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N \cdot \alpha}{3 \cdot \epsilon_0}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  - коэффициент поляризуемости;

$P$  - величина поляризованности диэлектрика;

$\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для химически однородных веществ уравнение (6) может быть представлено в виде

$$\Pi = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho}, \quad (7)$$

где  $\Pi$  - молярная поляризация диэлектрика;

$M$  - величина, измеряемая в моль<sup>-1</sup>;

$\rho$  - плотность вещества.

Для диэлектриков с малой удельной проводимостью в соответствии с уравнением Дебая [5], связь между  $\epsilon_s$  и  $N$  выражается уравнением.

$$\epsilon_s - \epsilon_\infty = \frac{4 \cdot \pi \cdot \vec{I}^2 \cdot N}{3 \cdot k \cdot T} \cdot \left( \frac{\epsilon + 2}{3} \right)^2, \quad (8)$$

где  $\epsilon_s$  - статическая диэлектрическая проницаемость;

$\vec{I}$  - дипольный момент;

$T$  - температура диэлектрика;

$k$  - постоянная Больцмана;

$\epsilon_\infty$  - диэлектрическая проницаемость при абсолютно больших частотах.

Если связать число молекул  $N$  в единице объема образца с влажосодержанием  $W$  и представить  $N$  как

$$N = \frac{m_c \cdot W \cdot N_A}{m_b \cdot V},$$

то уравнение (8) примет вид:

$$\varepsilon_m - \varepsilon_\infty = \frac{4 \cdot \pi \cdot \vec{I}^2 \cdot m_c \cdot W \cdot N_A}{m_b \cdot V \cdot 3 \cdot k \cdot T \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau^2)} \cdot \left( \frac{\varepsilon + 2}{3} \right)^2, \quad (9)$$

где  $N_A$  - число Авогадро;  
 $V$  - объем образца;  
 $\tau$  - время релаксации;  
 $m_c$  - масса сухого вещества;  
 $\omega$  - круговая частота внешнего электрического поля;  
 $m_b$  - масса воды

$$\varepsilon_\omega = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega \cdot \tau)^2} - \text{диз-}$$

лектрическая проницаемость образца при круговой частоте  $\omega$  [3].

Согласно уравнению Михлина [7], связь между  $\varepsilon$ , плотностью  $\rho$  и влажностью  $W$  контролируемых образцов может быть выражена уравнением

$$\varepsilon_{CM} = \varepsilon \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon_b - \varepsilon}{a \cdot \varepsilon_b - b \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\rho}{\rho_b} \cdot \frac{W}{100} \right), \quad (10)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_b$  - относительная диэлектрическая проницаемость сухого сырья и воды;

$\rho_b$  - плотность воды;

$a, b$  - постоянные коэффициенты.

Как видно из вышеприведенных уравнений, потеря напряженности электрического поля в диэлектрике  $\Delta E = E - E_{cp}$  пропорциональна суммарному дипольному моменту полярных молекул  $N$  в рабочем объеме ПИП. В свою очередь, статическая диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_s$  пропорциональна  $N$  и  $\vec{I}$ , а молярная поляризация диэлектрика обратно пропорциональна плотности образца.

Связь этих параметров с влажностью сырья в поле высокой частоты отображена уравнениями (9,10), т.е.  $\varepsilon$  образца пропорцио-

нальна плотности и влажности.

Следовательно, зависимость выходного параметра ПИП от плотности является вытекающей из самого принципа емкостного метода, для устранения влияния которой необходимы специальные приемы. При проектировании ПИП определяющим оказывается выбор рационального метода компенсации влияния плотности материала. Сыпучую среду можно рассматривать в виде трехфазной системы: твердая фаза (сухое вещество), жидкая фаза (влага), газообразная фаза (воздух). В такой среде в постоянном объеме и в локальной зоне соотношение фаз переменено и зависит не только от влажосодержания, но и от способа формирования пробы. Во влагометрии такие явления определяются неравномерностью плотности пробы и учитываются как мешающий фактор.

Так, при изменении влажности муки пшеничной высшего сорта насыпной плотности в диапазоне 10...15% абсолютная погрешность измерений может составить 1...1.5%, измельченных сухарей 1,5...2%.

В практике влагометрии сложилось два основных направления компенсации таких погрешностей:

1) стабилизацией плотности различными механическими приемами.

2) измерением плотности и введением коррекции в результаты измерения (взвешивание ПИП с материалом, многочастотная

коррекция, постоянство навески и т.д.)

Для таких сыпучих материалов, как зерно, семена и др. различия в насыпной плотности не превышают 20...30% и поэтому приемлемо первое направление. Здесь применяют такие приемы обеспечения постоянной плотности упаковки материала в ячейке ПИП, как свободная засыпка, виброуплотнение, фиксированное сжатие и т.д. На рис. 1а приведена зависимость показаний измерителя влажности от усилия уплотнения муки в ячейке ПИП (при постоянном начальном объеме насыпной массы). Результаты экспериментов с насыпной массой и зависимость подтверждают приведенные выше теоретические предпосылки и показывают, что стабилизация плотности муки, следовательно, стабилизация показаний прибора достигаются при определенном усилии уплотнения. При усилии на уплотнительной крышке больше 60-70 Н показания прибора практически не изменяются.

Вместе с тем такая методика уплотнения имеет существенные недостатки: непостоянство массы материала при свободной засыпке, изменение высоты слоя материала с изменением усилия уплотнения. Кроме того, некоторые сыпучие материалы имеют различную степень уплотнения при одном и том же усилии в зависимости от влажности. Это свойство характерно для гидро-

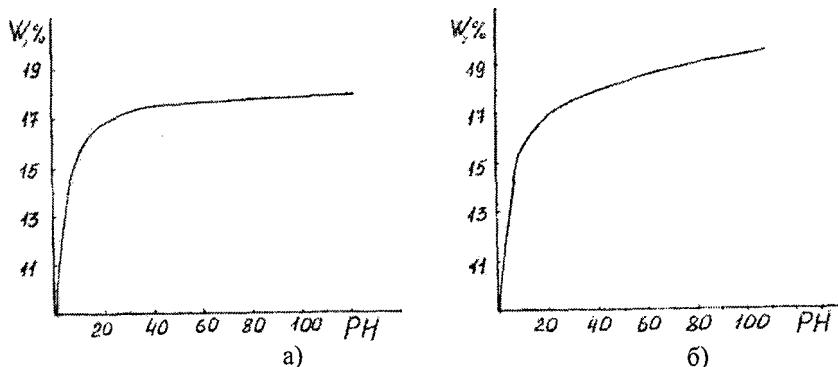


Рис. 1 Зависимость показаний измерителя влажности от усилия уплотнения при: а) постоянстве массы; б) постоянстве объема.

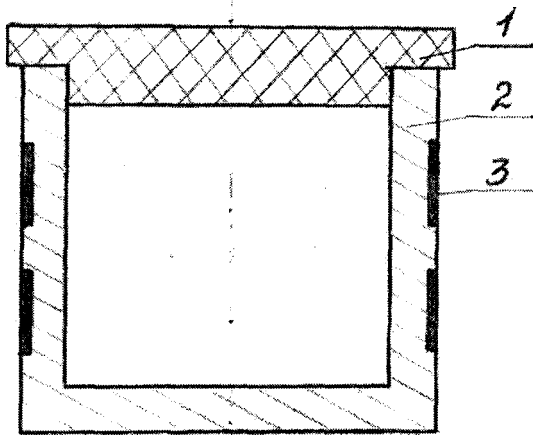


Рис.2. Общий вид рабочей камеры ПИП  
1 - крышка; 2 - стакан, 3 - электроды.

фильных и мелкодисперсных материалов, например, муки различных видов и сортов. На рис.1б приведена зависимость  $W_{(p)}$  при обеспечении постоянства объема контролируемого материала в ячейке в уплотненном состоянии. При этом масса муки в ячейке возрастала с увеличением усилия уплотнения, что является недостатком этого метода.

Анализ зависимости (рис.1а) показывает, что на участке от 40 до 120Н  $\frac{\Delta W}{\Delta p} = 0.003$ , а на таком же участке (рис.1б)  $\frac{\Delta W}{\Delta p} = 0.019$ .

Следовательно, при постоянстве объема не обеспечивается столь заметной стабилизации показаний влагомера, что не позволяет выбрать рабочую точку или зону характеристики  $W_{(p)}$ .

Вместе с тем следует обратить внимание на то, что разброс показаний прибора при фиксированном усилии уплотнения и, следовательно, абсолютная погрешность измерений несколько меньше, чем в предыдущем опыте.

В практике влагометрии нередко предлагают прием виброуплотнения. В сравнении с методом свободной засыпки муки и измельченных сухарей даже небольшие встряхивания ячейки ПИП с материалом приводят к увеличе-

нию показаний прибора на 1...2% и более, причем существенней это влияние для измельченных сухарей. Это можно объяснить явлением вибросегрегации - разделением в процессе вибрации сыпучей среды на классы, отличающиеся по размеру частиц и удельному весу.

Отрицательное влияние этого явления на параметры ПИП объясняется тем, что при тряске и вибрации изменяется естественная структура среды, нарушается ее однородность и, следовательно, изменяются такие ее параметры, как коэффициент пористости, форма включений влаги, размер частиц и диэлектрическая проницаемость материала в локальных зонах ПИП. Для продуктов неорганического происхождения в приэлектродной зоне ПИП может происходить изменение химического состава сыпучего материала. Вибросегрегация отчетливо наблюдается при колебаниях частотой 20...500 Гц и ускорениях  $a > 9,8$  м/с<sup>2</sup> [7]. На эффект вибросегрегации значительное влияние оказывает влажность среды, так как с ростом влажности степень и скорость вибросегрегации затухают.

Таким образом, рассмотренное явление вибросегрегации и неудовлетворительная воспроизводимость результатов, характерные для ПИП с виброуплотнением, вынуждают предпочесть силовой способ уплотнения. Этот способ обеспечивает достаточную воспроизводимость результатов измерений за счет уменьшения влияния неоднородности фракционного состава сырья и улучшения контактов между частицами электродами ПИП.

На основе проведенных ис-

следований можно предложить методику исключения влияния плотности материала на показания прибора при измерении, а точнее сказать, обеспечения стабильности показаний при вариации усилий уплотнения. Конструктивно это достигается применением ступенчатой крышки (рис.2).

Выступ в крышке позволяет создать необходимую плотность материала (например, муки) с помощью усилия руки. Степень уплотнения определяется длиной выступа, которая, в свою очередь, определяется экспериментально в зависимости от материала. Предпочтительнее также заполнение ячейки не по величине ее объема, а по определенной массе пробы. Применение такой методики при измерении влажности муки позволяет обеспечить абсолютную погрешность измерения в пределах 0,3...0,4%.

#### Литература

1. Кричевский Е.С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. - М.: Энергия, 1980. - 240 с.

2. Черняк Г.Я. Диэлектрические методы исследования влажных грунтов. - М.: Недра, 1964. - 128 с.

3. Богородицкий Н.А. Теория диэлектриков. - М.: Энергия, 1965. - 344 с.

4. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. - М.: Энергия, 1973. - 320 с.

5. Дебай П. Полярные молекулы. (Пер. с нем. - М.; Л.; 1931 - 247 с.)

6. Блехман И.И., Чортинский В.В., Птушкина Г.Е. Движение частицы в колеблющей среде при наличии сопротивления типа сухого трения. - Известия АН ССР. Отд.техн.наук "Механика и машиностроение", N 4, 1963, с.31-41.

7. Кричевский Е.С., Голушкин С.С. О методе оптимального уплотнения контролируемого материала в датчиках влажности. - Инженерно-физический журнал, 1974, т. XXVI, N 5, с.849-855.