

## Электронная бумага

Рассмотрим силы, действующие на микрочастицы «электронной бумаги». Чтобы переключение происходило в любом случае, необходимо, чтобы электростатические силы, действующие на частицу, превышали силу тяжести и температурные флуктуации. Будем считать, что частица находится в однородном электрическом поле электродов, взаимодействием частиц друг с другом пренебрегаем. Электростатическая сила, действующая на частицу равна:

$$F_E = Eq = \frac{\Delta U}{d} q.$$

Равнодействующая силы тяжести и силы Архимеда, которая должна быть гарантированно скомпенсирована управляющей электростатической силой, равна:

$$F_g = (\rho_1 - \rho_0) V g = \frac{4\pi R^3 (\rho_1 - \rho_0) g}{3}.$$

Характерную энергию заряженной частицы в электрическом поле оценим как  $W = \Delta U q$ , а характерную энергию тепловых флуктуаций - как  $kT$ . Таким образом, для нормальной работы должны выполняться условия

$$F_E \gg F_g \text{ и } W \gg kT.$$

Отсюда получаем оценки для минимального напряжения:

$$\Delta U \gg F_g d / q = \frac{4\pi R^3 (\rho_1 - \rho_0) g d}{3q} \sim 0.3 \div 3B$$

$$\Delta U = kT / q \sim 3 \cdot 10^{-3} B$$

Таким образом, температурные флуктуации в этом случае пренебрежимо малы. Минимальное напряжение определяется гравитационными силами.

При рассмотрении динамических характеристик, таких, как, например, время отклика дисплея, необходимо учесть силу вязкого трения, действующую на частицу -  $F_{\text{вязк}} = 6\pi R \eta v$  - формула Стокса для силы вязкого трения, действующей на шар, движущийся в вязкой среде со скоростью  $v$ . Время отклика можно оценить из следующего соотношения:

$$\tau = \frac{d}{v_{\text{уст}}}, \text{ где установившаяся скорость равна: } v_{\text{уст}} = \frac{F_E}{6\pi R \eta} = \frac{\Delta U q}{6\pi R \eta d}.$$

$$\text{отклика получаем оценку: } \tau = \frac{6\pi R \eta d^2}{\Delta U q}.$$

Однако, в случае тонкого зазора между электродами скорость частицы может не успеть установиться: необходимо рассмотреть ускоренное движение частицы при включении управляющего потенциала. Рассмотрев движение сферической частицы в вязкой среде, можно получить зависимость скорости от времени:

$$v(t) = v_{\text{уст}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma t}{m}\right) \right), \gamma = 6\pi R \eta v.$$

Чтобы определить время отклика, нужно определить время, необходимое частице, чтобы преодолеть расстояние между электродами:

$$S(\tau) = \int_0^{\tau} v(t) dt = v_{\text{уст}} \left[ \tau - \frac{m}{\gamma} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma \tau}{m}\right) \right) \right].$$

Для точного определения времени отклика нужно решить трансцендентное уравнение  $S(\tau) = d$

относительно  $\tau$ . Это можно сделать только численно. Однако можно аналитически рассмотреть два крайних случая. Случай толстого зазора был рассмотрен выше. В случае тонкого зазора, когда скорость частицы мала, и, соответственно, выполняется условие  $F_E \gg F_{\text{вязк}} \Rightarrow m\dot{v} \gg F_{\text{вязк}}$ . Получим зависимость скорости на начальных этапах и время отклика для тонкого зазора:

$$v = \frac{F_E}{m} t \Rightarrow \tau = \sqrt{\frac{2dm}{F_E}}.$$

Определим, какой зазор можно считать тонким, а какой – толстым. Будем считать, что если на толщине зазора частица набирает скорость, сравнимую с максимальной установившейся, то зазор толстый. Другими словами:

$$v_{\text{уст}} = \frac{\Delta U q}{6\pi R \eta d} \sim \frac{F_E}{m} \sqrt{\frac{2dm}{F_E}} = \sqrt{\frac{2dF_E}{m}} = \sqrt{\frac{2d\Delta U q}{m}}, \text{ откуда:}$$

$$d^2 \sim \frac{\Delta U q m}{2(6\pi R \eta)^2} (*)$$

Критической частотой, которую еще воспринимает человеческий глаз принято считать 25 Гц (25 кадров в секунду). Таким образом, для критического времени отклика получим 0.04 с. Оценим напряжение, исходя из предположения, что зазор «толстый» для случая  $d=100$  мкм:

$$\tau = \frac{6\pi R \eta d^2}{\Delta U q} \Rightarrow \Delta U = \frac{6\pi R \eta d^2}{\tau q} \sim 3 \cdot 10^4 \text{ В}.$$

Проверим теперь, как соотносится полученный результат с оценкой (\*). Получается, что зазор является толстым и оценка произведена правильно. Такая большая величина напряжения указывает на недостаток «электронной бумаги» - ее инерционность. Поэтому она, как правило, используется лишь для отображения более-менее статических изображений, например, текста. Возможный путь улучшения временных характеристик лежит в уменьшении зазора.

Проведем те же вычисления для  $d=10$  мкм. Аналогичная оценка для напряжения дает: 300 В. Проверив критерий «толщины», можно убедиться, что зазор также является «толстым», следовательно, сделанная оценка верна.

Другими технологиями создания «электронной бумаги» является использование двухцветных магнитных частиц, электрохромных материалов, жидких кристаллов и светоизлучающих диодов.