

Сколько пузырьков в шампанском?

А. СТАСЕНКО

В ПРИРОДЕ И В ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ практике известно немало случаев вскипания жидкостей без преднамеренного нагревания. Например: при истечении на поверхность с больших глубин, при разгерметизации трубопроводов с жидким теплоносителем (аварии энергетических установок), при раскупоривании бутылок с шампанским, пивом, содовой, спрайтом... — кто же не наблюдал с радостью искрящуюся пузырьками газированную воду в жаркий день!

При транспортировке таких жидкостей по трубам бывает важно знать, какой объем растворенных в них газов уже выделился в виде пузырьков. Конечно, можно было бы сделать забор пробы, но — пока эту пробу проанализируют, какое отношение она будет иметь к той смеси, что была в момент забора? Поэтому лучше всего воспользоваться электромагнитным полем — ведь информация о его изменениях распространяется со скоростью порядка скорости света, так что реальные технологические процессы будут казаться как бы застывшими (квазистатическими).

Рассмотрим, например, как можно воспользоваться простейшим плоским конденсатором для почти мгновенной регистрации свойств протекающей через него жидкости с диэлектрической проницаемостью ϵ , содержащей газовые пузыри или пузырьки, внутри которых $\epsilon_1 = 1$ (рис.1). Под «пузырями» будем понимать объемы газа, размеры которых сравнимы с характерными размерами конденсатора l и d , а

под «пузырьками» — те объемы, размеры которых существенно меньше d .

Пусть пластины конденсатора, площадью S каждая, подключены к источнику постоянной ЭДС U (батарея). Ясно, что что-то будет неодинаково в двух случаях: когда конденсатор полностью занят жидкостью или когда он содержит только газ. Что же именно?

Если пренебречь сопротивлением проводов и внутренним сопротивлением источника r , то разность потенциалов между пластинами конденсатора будет постоянна и равна U . (Следовательно, электропроводность газожидкостной смеси предполагается пренебрежимо малой.) Значит, и напряженность электрического поля в обоих случаях будет одной и той же и равной $E = U/d$. А вот заряд на пластинах будет различен — ну, хотя бы потому, что емкость пустого плоского конденсатора равна $C_1 = \epsilon_0 S/d$, емкость заполненного диэлектриком в ϵ раз больше: $C_\epsilon = \epsilon C_1$, а заряд равен $q_{1,\epsilon} = C_{1,\epsilon} U$. Иными словами, сам заряд и его поверхностная плотность на пластинах в этих двух крайних случаях будут отличаться в ϵ раз:

$$q_\epsilon = \epsilon q_1, \quad \sigma_\epsilon = \epsilon \sigma_1,$$

где

$$\sigma_1 = \frac{q_1}{S} = \epsilon_0 \frac{U}{d}.$$

Кстати, напряженность поля между пластинами будет одинаковой, даже если диэлектрик лишь частично «вдвинут» в конденсатор, как это показано

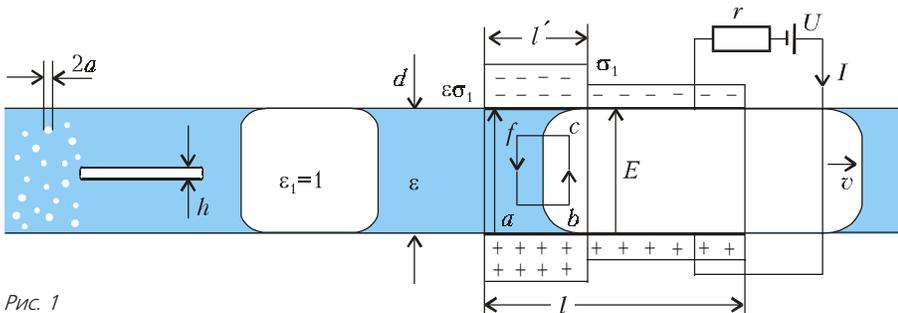


Рис. 1

на рисунке 1. (В противном случае работа по перемещению некоего заряда по пути $abcfa$ не была бы равна нулю, а это строго запрещено в электростатике.)

Легко понять, что если в данный момент времени диэлектрик занимает часть объема конденсатора, равную l'/l , то суммарный заряд на конденсаторе равен

$$q = q_1 \left(1 - \frac{l'}{l}\right) + q_\epsilon \frac{l'}{l} = \frac{\epsilon_0 S U}{d} \left(1 + \frac{l'}{l} (\epsilon - 1)\right). \quad (1)$$

Если диэлектрик будет «вдвигаться» с постоянной скоростью v , то $l' = vt$, так что в цепи потечет постоянный ток

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{\epsilon_0 S U v}{d l} (\epsilon - 1) \quad \text{при } 0 < t < \frac{l}{v}. \quad (2)$$

Когда жидкость заполнит весь конденсатор, заряд достигнет наибольшей величины $q_\epsilon = \epsilon q_1$ и перестанет изменяться, а когда в конденсатор начнет входить следующий газовый пузырь, заряд станет убывать с той же скоростью — ток будет отрицательным (рис.2). Таким образом, даже если наша плоская «труба» будет совершенно непрозрачной, по изменению электрического тока мы сможем «увидеть» перемежающиеся участки движущейся жидкости и газа.

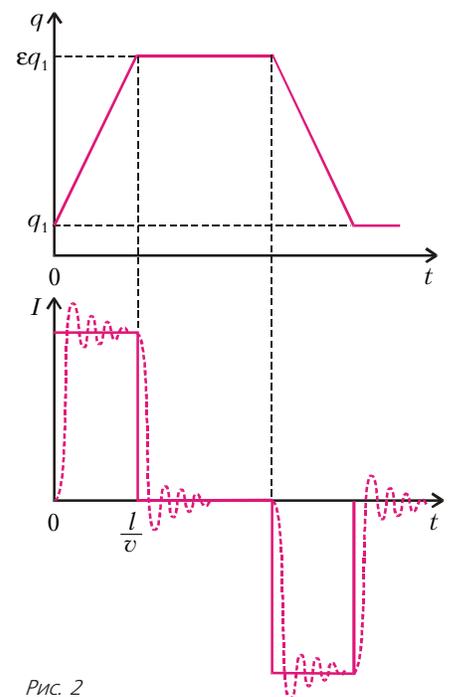


Рис. 2