УДК 681.785

О. С. Городецкая, к. т. н.; А. В. Стальченко

ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛЕЖАЩЕЙ КАПЛИ

Проанализировано неустойчивость и длительность перехода капли в стационарное состояние при измерении поверхностного натяжения усовершенствованным методом лежащей капли с использованием пошагово растущего напряжения электрического поля.

***Ключевые слова**: поверхностное натяжение, метод лежащей капли в электрическом поле, устойчивость капли, капиллярные колебания.*

Введение

Сегодня для многих технологических процессов необходима полнота и точность знаний о различных жидких средах и поверхностных явлениях, возникающих на границе раздела фаз. Фундаментальное свойство границы раздела жидкость-газ – это поверхностное натяжение, которое определяет удельную свободную поверхностную энергию жидкости и является тем параметром, значение которого во многих случаях (газодобыча, химическая промышленность, фармацевтическая, пищевая и другие отрасли народного хозяйства) является определяющим для оценки качественных и количественных параметров жидкости [1]. Особенно важную роль играет поверхностное натяжение в таких технологических процессах, где используются растворы поверхностно-активных веществ, например, при интенсификации добычи газа, при производстве моющих средств, при разработке и производстве поверхностно-активных веществ различных функциональных назначений.

Постановка задачи

В результате анализа существующих методик и средств измерения поверхностного натяжения жидкостей установлено, что средства измерения поверхностного натяжения, функционирование которых базируется на фотографировании менисков и их проектировании или печати в увеличенном масштабе не обеспечивают высокой точности измерения. То же касается использования микроскопа, поскольку использование его не позволяет автоматизировать процесс измерения поверхностного натяжения жидкостей и делает его утомительным для исследователя. Кроме того, большинство методов базируется на эмпирических и приближенных зависимостях, что существенно увеличивает погрешности измерений. В связи с вышесказанным, необходимо совершенствование метода, который бы обеспечивал высокую чувствительность измерений. Одним из путей совершенствования метода лежащей капли является воздействие электрического поля, в результате которого происходит изменение формы мениска и переход одного из параметров мениска, который варьируется, через экстремум. Поэтому целью работы является исследование капиллярных колебаний и устойчивости заряженной капли при измерении поверхностного натяжения жидкостей.

Основная часть

В работе предлагается применить метод лежащей капли в электрическом поле. Суть метода заключается в том, что лежащую каплю формируют в кювете. Количество жидкости, которая может удержаться в кювете, превышает объем ее внутренней части. Избыток жидкости образует каплю, возвышающуюся над кромкой кюветы. Установлено, что под воздействием электрического поля энергия мениска, меняется и лежащая капля

деформируется, превращаясь из сферической в вытянутую сфероидальную. При росте напряженности внешнего электрического поля согласно [2] происходит локальное усиление напряженности электрического поля у вершины сфероидальной капли, которое определяется диэлектрической проницаемостью жидкости, поверхностным натяжением, размером капли и напряженностью внешнего поля. Усиление напряженности электрического поля у вершины капли приводит к ее разрыву или резкому уменьшению кривизны. Экстремальные геометрические параметры соответствуют моменту, предшествующему наступлению неустойчивого состояния. Капля жидкости в электрическом поле становится неустойчивой из-за доминирования электрических сил над силами поверхностного натяжения. Исследование неустойчивости капли проводится на основе модового подхода, согласно которому бесконечный набор капиллярных волн бесконечно малой амплитуды (которые всегда существуют из-за теплового движения молекул) рассматривается как колебательная система с бесконечным числом степеней свободы. Амплитуда m-ой моды капиллярных колебаний мениска изменяется со временем по закону [3]

$$A_k(t) = A_{k0} \cdot \exp(-t \cdot \omega_m - x_m \cdot t), \tag{1}$$

где A_{k0} – максимальное значение амплитуды колебания в начальный момент времени; m – номер моды; ω_m – частота колебания; x_m – декремент вязкого затухания.

Частоты разных мод капиллярных колебаний заряженной поверхности определяются формулой [3]

$$\omega_m^2 = (m-1) \cdot m \cdot (m+2) \cdot \frac{\sigma \cdot (1-W)}{\rho \cdot a^3}, \tag{2}$$

где ρ – плотность жидкости; W – параметр Рэлея, который согласно [4]

$$W = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_c \cdot U^2}{16 \cdot \sigma \cdot a}, \tag{3}$$

где ε_c – диэлектрическая проницаемость окружающей среды; U – напряжение, подаваемое на электроды.

Декремент вязкого затухания капиллярных волн [3]

$$x_m = (m-1) \cdot (2m+1) \cdot \frac{\nu}{a^2}, \tag{4}$$

где ν – кинематическая вязкость.

Наименьшая из возможных мод имеет наименьшую частоту колебания и, соответственно, наибольший период. Более высокие моды капиллярных колебаний успевают развиться на фоне одного колебания наименьшей из возможных – основной моды, поэтому именно период основной моды необходимо принять за характерное время капиллярных колебаний мениска. Чем выше мода капиллярных колебаний, тем быстрее она затухает. Следовательно, медленнее всего затухает минимальная из возможных мод капиллярных колебаний: за время уменьшения ее амплитуды в e раз, амплитуды более высоких мод уменьшатся в значительно большей степени. Именно поэтому в качестве характерного времени вязкого затухания капиллярных колебаний мениска жидкости необходимо выбрать время вязкого затухания основной – второй моды [4].

В зависимости от величины напряжения, подаваемого на электроды, которая характеризуется значением параметра Рэлея W, выделяют две ситуации: 1) $W < 1$, 2) $W > 1$.

1) $W < 1$ – в этом случае поверхность мениска осуществляет затухающие колебания с частотами ω_m и декрементами затухания x_m. Каждая мода капиллярных колебаний характеризуется двумя часами:

– временем затухания капиллярных колебаний [3]

$$\tau_\sigma^m = \frac{2\pi}{\omega_m}, \tag{5}$$

– временем вязкого затухания – временем, за которое амплитуда соответствующей моды капиллярного колебания уменьшается в *e* раз [3]

$$\tau_\nu^m = \frac{1}{x_m}. \tag{6}$$

Поскольку в качестве характерного времени капиллярных колебаний мениска жидкости принято период основной – второй моды ($m = 2$), то выражения (5) и (6) приобретут вид

$$\tau_\sigma = \pi\sqrt{\frac{\rho \cdot a^3}{2\sigma \cdot (1 - W)}}, \tag{7}$$

$$\tau_\nu = \frac{a^2}{5\nu}. \tag{8}$$

2) $W > 1$ – в этом случае имеет место монотонное нарастание или затухание незначительного возмущения поверхности, которое характеризуется одним из двух возможных характерных времен:

– характерным временем развития капиллярной неустойчивости поверхности мениска жидкости при $W > W_{уст}$ $W > W_{уст} = 1 + \frac{\rho \cdot \nu^2}{\sigma \cdot a}$ [4]

$$\tau_\sigma^{(\nu)} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot a^3} \cdot (W - 1)} - \frac{\nu}{a^2}}, \tag{9}$$

– характерным временем затухания при $1 < W < W_{уст}$

$$\tau_\nu^{(\sigma)} = \frac{1}{\frac{\nu}{a^2} - \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot a^3} \cdot (W - 1)}}. \tag{10}$$

Таким образом, при $\tau_\sigma << \tau_\nu$ поверхность совершает колебания, пока за счет вязкости их амплитуда значительно снизится. Если $\tau_\sigma >> \tau_\nu$, то почти полное затухание колебаний произойдет за время, меньше одного периода основной моды. С увеличением напряжения характерное время капиллярных колебаний τ_σ увеличится. С увеличением вязкости жидкостей ν характерное время вязкого затухания капиллярных колебаний τ_ν уменьшится. Следовательно, рост напряжения и вязкости приводят к тому, что затухание возмущения поверхности мениска происходит за меньшее число колебаний.

Для реализации бесконтактного метода измерения поверхностного натяжения в электрическом поле лежащую каплю формируют в кювете с заостренной кромкой, под воздействием электрического поля изменяют форму мениска, что сопровождается переходом высоты капли над кромкой кюветы через экстремум, поверхностное натяжение рассчитывают по изменению геометрических параметров капли.

Кювету с исследуемой жидкостью размещают на нижнем электроде. На электроды подается напряжение, которое формируется блоком управления напряжением и пошагово возрастает. Увеличение напряженности приводит к изменению формы мениска, сопровождаемое ростом высоты капли. Дальнейшее усиление напряженности вызывает разрыв капли с образованием дочерних капель, что характеризует неустойчивое состояние

мениска. При этом наблюдается резкое уменьшение высоты. При каждом шаге изменения напряжения, подаваемого на электроды, фотокамерой регистрируют изображение исследуемой капли и с помощью ЭВМ осуществляют предварительную обработку изображения, определяют ординату z_b вершины капли, и сравнивают данную координату с предыдущим значением. При $z_{i+1}>z_i$ происходит дальнейшее увеличение напряжения на один шаг. В случае $z_{i+1}<z_i$ сохраняется в памяти последнее изображение, которое подлежит дальнейшей обработке, определению геометрических параметров и, соответственно, поверхностного натяжения исследуемой жидкости.

Для обеспечения необходимой точности и быстродействия средства контроля необходимо, чтобы время срабатывания фотокамеры было больше времени изменения и перераспределения напряженности электрического поля между электродами и затухания капиллярных колебаний на поверхности капли

$$t_n = t_{DAC} + t_E + t_p, \tag{11}$$

где t_n – время перехода капли в стационарное состояние при изменении напряжения на один квант; t_{DAC} – время преобразования ЦАП; t_E – время перераспределения напряженности электрического поля между электродами и установления стационарного состояния; t_p – время достижения равновесия на поверхности капли.

Общая длительность измерительного преобразования при изменении напряжения на один квант включает время преобразования ЦАП t_{DAC}; время перераспределения напряженности электрического поля между электродами и установления стационарного состояния t_E; время достижения равновесия на поверхности капли t_p; время, затрачиваемое фотокамерой на снятие и оцифровку изображения t_{fc}; время передачи изображения по USB интерфейсу в ПК t_{USB} и определяется как

$$t_{заг} = t_{DAC} + t_E + t_p + t_{fc} + t_{USB}. \tag{12}$$

Большинство измерительных устройств используют последовательные ЦАП из-за их высокой скорости преобразования, так, для ЦАП MAX5158 время установки составляет $8\cdot10^{-6}$ с [5]. Время перераспределения напряженности электрического поля между электродами и установления стационарного состояния t_E составляет $2\cdot10^{-4}$ с. В видеорежиме работы фотокамеры достигается возможность снятия изображения со скоростью 30 кадров/с, следовательно t_{fc} = 0,03 с. Для достижения высокого быстродействия передачи данных и обработки изображения необходимо, чтобы ПК поддерживал передачу данных по USB 2.0, который обеспечивает скорость передачи данных до 60 Мбайт/с [5, 6], поэтому t_{USB} = 0,03 с.

Время достижения равновесия на поверхности капли t_p состоит из времени затухания капиллярных колебаний τ_σ и времени вязкого затухания τ_ν, находящихся согласно (7), (8). Например, для дистиллированной воды при U=6,3 кВ параметр Рэлея (3) W<1, τ_ν=1,24 с, τ_σ=$3{,}47\cdot10^{-2}$ с, т. е. t_p=1,27 с. В этом случае поверхность совершает колебания, пока за счет вязкости их амплитуда значительно снизится. С увеличением напряжения характерное время капиллярных колебаний τ_σ увеличивается; с увеличением вязкости жидкостей характерное время вязкого затухания капиллярных колебаний τ_ν уменьшается. Таким образом, рост напряжения и вязкости приводят к тому, что затухание капиллярных колебаний на поверхности мениска происходит быстрее. Таким образом, $t_{общ}$ не превышает 1,5 с.

Для уменьшения продолжительности измерительного процесса предварительная обработка изображения капли ПК осуществляется параллельно переходу капли в стационарное состояние при изменении напряжения на один шаг и снятию изображения фотокамерой. При этом временная диаграмма измерительного преобразования имеет вид, изображенный на рис. 1.

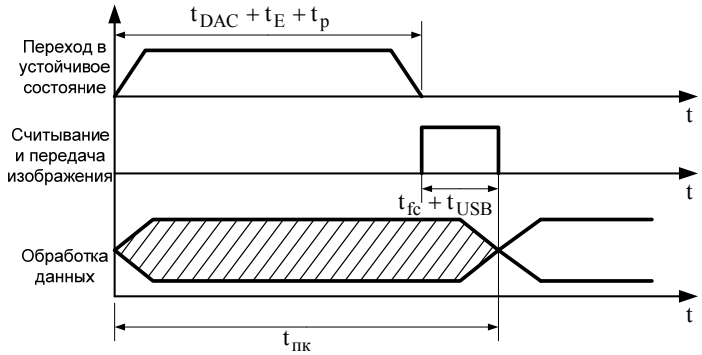

Рис. 1. Временная диаграмма измерительного преобразования

При оценке быстродействия микропроцессора ПК $t_{ПК}$ необходимо проанализировать алгоритм предварительной обработки изображения. Время выполнения предварительной обработки изображения микропроцессором ПК в средстве контроля определяется

$$t_{пк} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \tag{13}$$

где t_1 – продолжительность загрузки данных;
t_2 – продолжительность определения ординаты омбиличной точки z_i; t_3 – продолжительность сравнения z_i с z_{i-1}; t_4 – продолжительность записи и удаления из памяти изображения; t_5 – продолжительность формирования кода для ЦАП.

Так, для процессора Intel Celeron с частотой работы 2,2 ГГц скорость чтения из памяти составляет 2,5 Гбайт/с, скорость записи в память – 911 Мбайт/с. Поскольку объем фотографии составляет до одного Мбайта, то $t_{пк}$ не превышает 1,5 с.

Общая продолжительность измерительного преобразования составляет

$$t_{\Sigma} = K \cdot t_{общ}, \tag{14}$$

где K – количество измерений.

В диапазоне изменения напряженности 450 – 700 кВ/м наибольшее время измерения составляет 1000 с. Для уменьшения данного времени целесообразно разделить весь диапазон напряженности в зависимости от исследуемой жидкости и концентрации на несколько поддиапазонов. Так, например, для концентрации до 0,1% растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) напряженность наступления неустойчивого состояния находится в диапазоне 600 – 640 кВ/м, для неионогенных ПАВ при концентрации 0,5–1% – 550 – 590 кВ/м, для анионных ПАВ при концентрации 1–5% – 500 – 540 кВ/м. Для ПАВ, повышающих поверхностное натяжение, при концентрации до 2% напряженность наступления неустойчивого состояния находится в диапазоне 630 – 670 кВ/м. Таким образом, при измерении поверхностного натяжения в определенном диапазоне необходимо провести 120 измерений, что позволяет сократить максимальное время измерения до 180 с.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– исследовано неустойчивость капли на основе модового подхода, что позволило оценить продолжительность затухания капиллярных колебаний на поверхности мениска, синхронизировать скорость установления стационарного состояния капли при изменении напряжения на один шаг с частотой регистрации изображения лежащей капли и сократить длительность измерения поверхностного натяжения.

– оценено, что продолжительность перехода капли в стационарное состояние при росте напряжения на один шаг не превышает 1,3 с. Для уменьшения продолжительности измерительного преобразования параллельно переходу капли в стационарное состояние и

снятию изображения фотокамерой осуществляют предварительную обработку изображения капли ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Білинський Й. Й. Роль поверхневих явищ в різних процесах та оптичні засоби визначення поверхневого натягу / Йосип Білинський, Оксана Городецька // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – №2 (10). – С. 198 – 203.

2. Григорьев А. И. Локальное увеличение напряженности однородного электростатического поля вблизи вершины сфероидальной капли / А. И. Григорьев, С. И. Щукин // Журнал технической физики, 1999. – том 69, вып. 8. – С. 49 – 54.

3. Щукин С. И. Исследование устойчивости капель по отношению к собственному и поляризационному зарядам: автореф. дис. на присвоен. научн. степени к-та физ.-мат. наук: спец. 01.04.14 / С. И. Щукин. – М., 1999. – 16 с.

4. Григорьев А. И. Капиллярные электрогидродинамические неустойчивости в дисперсних системах: автореф. дис. на присвоен. научн. степени д-ра физ.-мат. наук: спец. 01.04.14 / А. И. Григорьев. – Одесса, 1991. – 32 с.

5. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В.Агуров – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 576 с.

Городецкая Оксана Степановна – к. т. н., старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, (0432) 598-358, e-mail**:** biloshkursky@ukr.net.

Стальченко Александр Владимирович – асистент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail**:** stal1978@ukr.net

Винницкий национальный технический университет.