

О. С. Городецька, к. т. н.; О. В. Стальченко

ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КАПІЛЯРНИХ КОЛИВАНЬ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

Проаналізовано нестійкість та тривалість переходу краплі в стаціонарний стан при вимірюванні поверхневого натягу вдосконалим методом лежачої краплі з використанням покровоно зростаючої напруги електричного поля.

Ключові слова: *поверхневий натяг, метод лежачої краплі в електричному полі, стійкість краплі, капілярні коливання.*

Вступ

Сьогодні для багатьох технологічних процесів необхідна повнота та точність знань про різні рідкі середовища та поверхневі явища, які виникають на межі поділу фаз. Фундаментальною властивістю межі поділу рідина – газ є поверхневий натяг, який визначає питому вільну поверхневу енергію рідини і є тим параметром, значення якого в багатьох випадках (газовидобування, хімічна промисловість, фармацевтична, харчова та інші галузі народного господарства) визначальне для оцінки якісних та кількісних параметрів рідини [1]. Особливо важливу роль відіграє поверхневий натяг у таких технологічних процесах, де використовуються розчини поверхнево-активних речовин, наприклад, при інтенсифікації видобування газу, при виготовленні миючих засобів, при розробці і виробництві поверхнево-активних речовин різних функціональних призначень.

Постановка задачі

У результаті аналізу існуючих методик та засобів вимірювання поверхневого натягу рідин встановлено, що засоби вимірювання поверхневого натягу, функціонування яких базується на фотографуванні менісків та їх проектуванні чи друці у збільшеному масштабі не забезпечують високої точності вимірювання. Те ж стосується використання мікроскопа, оскільки використання його не дозволяє автоматизувати процес вимірювання поверхневого натягу рідин та робить його втомливим для дослідника. Крім того, більшість методів базується на емпіричних та наближених залежностях, що суттєво збільшує похибки вимірювань. У зв'язку з вищесказаним, необхідним є вдосконалення методу, який би забезпечував високу чутливість вимірювань. Одним із шляхів вдосконалення методу лежачої краплі є вплив електричного поля, в результаті якого відбувається зміна форми меніска і перехід одного з параметрів меніска, що варіюється, через екстремум. Тому метою роботи є дослідження капілярних коливань та стійкості зарядженої краплі при вимірюванні поверхневого натягу рідин.

Основна частина

У роботі пропонується застосувати метод лежачої краплі в електричному полі. Суть методу полягає в тому, що лежачу краплю формують у кюветі. Кількість рідини, яка може утриматися в кюветі, перевищує об'єм її внутрішньої частини. Надлишок рідини утворює краплю, що піднімається над кромкою кювети. Встановлено, що під впливом електричного поля енергія меніска змінюється, і лежача крапля деформується, перетворюючись із сферичної у витягнуту сфероїдальну. При рості напруженості зовнішнього електричного поля відповідно до [2] відбувається локальне підсилення напруженості електричного поля коло вершини сфероїдальної краплі, яке визначається діелектричною проникністю рідини, поверхневим натягом, розміром краплі та напруженістю зовнішнього поля. Підсилення

напруженості електричного поля біля вершини краплі призводить до її розриву або різкого зменшення кривизни. Екстремальні геометричні параметри відповідають моменту, що передуює настанню нестійкого стану. Крапля рідини в електричному полі стає нестійкою через домінування електричних сил над силами поверхневого натягу. Дослідження нестійкості краплі проводиться на основі модового підходу, згідно якому нескінченний набір капілярних хвиль нескінченно малої амплітуди (які завжди існують через тепловий рух молекул) розглядається як коливальна система з нескінченим числом степенів свободи. Амплітуда m -ої моди капілярних коливань меніска змінюється з часом за законом [3]

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

де A_{k0} – максимальне значення амплітуди коливання у початковий момент часу; m – номер моди; ω_m – частота коливання; x_m – декремент в'язкого затухання.

Частоти різних мод капілярних коливань зарядженої поверхні визначається формулою [3]

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

де ρ – густина рідини; W – параметр Релея, що відповідно до [4]

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

де ε_c – діелектрична проникність навколишнього середовища; U – напруга, що подається на електроди.

Декремент в'язкого затухання капілярних хвиль [3]

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

де V – кінематична в'язкість.

Найменша з можливих мод має найменшу частоту коливання і, відповідно, найбільший період. Більш високі моди капілярних коливань встигають розвинути на фоні одного коливання найменшої з можливих – основної моди, тому саме період основної моди необхідно прийняти за характерний час капілярних коливань меніска. Чим вища мода капілярних коливань, тим швидше вона затухає. Отже, повільніше всього затухає мінімальна з можливих мод капілярних коливань: за час зменшення її амплітуди в e раз, амплітуди більш високих мод зменшаться в значно більшому ступені. Саме тому в якості характерного часу в'язкого затухання капілярних коливань меніска рідини необхідно вибрати час в'язкого затухання основної – другої моди [4].

У залежності від величини напруги, що подається на електроди, яка характеризується значенням параметра Релея W , виділяють дві ситуації: 1) $W < 1$; 2) $W > 1$.

1) $W < 1$ – у цьому випадку поверхня меніска здійснює затухаючі коливання з частотами ω_m та декрементами затухання x_m . Кожна мода капілярних коливань характеризується двома часами:

– часом затухання капілярних коливань [3]

$$\tau_\sigma^m = \frac{2\pi}{\omega_m}, \quad (5)$$

– часом в'язкого затухання – часом, за який амплітуда відповідної моди капілярного коливання зменшується в e раз [3]

$$\tau_v^m = \frac{1}{x_m}. \quad (6)$$

Оскільки в якості характерного часу капілярних коливань меніска рідини прийнято період основної – другої моди ($m=2$), то вирази (5) та (6) набудуть вигляду

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

$$\tau_v = \frac{a^2}{5\nu}. \quad (8)$$

2) $W > 1$ – в цьому випадку має місце монотонне наростання або затухання незначного збурення поверхні, яке характеризується одним з двох можливих характерних часів:

– характерним часом розвитку капілярної нестійкості поверхні меніска рідини при $W > W_{cm}$ $W > W_{cm} = 1 + \frac{\rho \cdot \nu^2}{\sigma \cdot a}$ [4]

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

– характерним часом затухання при $1 < W < W_{cm}$

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

Таким чином, при $\tau_{\sigma} \ll \tau_v$ поверхня здійснює коливання, поки за рахунок в'язкості їх амплітуда значно знизиться. Якщо $\tau_{\sigma} \gg \tau_v$, то майже повне затухання коливань відбудеться за час, менший одного періоду основної моди. Зі збільшенням напруги характерний час капілярних коливань τ_{σ} збільшиться. Зі збільшенням в'язкості рідин ν характерний час в'язкого затухання капілярних коливань τ_v зменшиться. Отже, ріст напруги і в'язкості призводять до того, що затухання збурення поверхні меніска відбувається за менше число коливань.

Для реалізації безконтактного методу вимірювання поверхневого натягу в електричному полі лежачу краплю формують у кюветі із загостреною кромкою, під впливом електричного поля змінюють форму меніска, що супроводжується переходом висоти краплі над кромкою кювети через екстремум, поверхневий натяг розраховують через зміну геометричних параметрів краплі.

Кювету з досліджуваною рідиною розміщують на нижньому електроді. На електроди подається напруга, яка формується блоком керування напругою і покроково зростає. Збільшення напруженості призводить до зміни форми меніска, що супроводжується зростанням висоти краплі. Подальше підсилення напруженості викликає розрив краплі з утворенням дочірніх крапель, що характеризує нестійкий стан меніска. При цьому спостерігається різке зменшення висоти. При кожному кроці зміни напруги, що подається на електроди, фотокамерою реєструють зображення досліджуваної краплі і за допомогою ЕОМ здійснюють попереднє оброблення зображення, визначають ординату z_b вершини краплі, та порівнюють дану координату з попереднім значенням. При $z_{i+1} > z_i$ відбувається подальше збільшення напруги на один крок. У випадку $z_{i+1} < z_i$ зберігається в пам'яті останнє зображення, яке підлягає подальшому обробленню, визначенні геометричних параметрів та, відповідно, поверхневого натягу досліджуваної рідини.

Для забезпечення необхідної точності і швидкодії засобу контролю необхідно, щоб час спрацювання фотокамери був більший за час зміни та перерозподілу напруженості

електричного поля між електродами та затухання капілярних коливань на поверхні краплі

$$t_n = t_{DAC} + t_E + t_p, \quad (11)$$

де t_n – час переходу краплі в стаціонарний стан при зміні напруги на один квант; t_{DAC} – час перетворення ЦАП; t_E – час перерозподілу напруженості електричного поля між електродами та встановлення стаціонарного стану; t_p – час досягнення рівноваги на поверхні краплі.

Загальна тривалість вимірювального перетворення при зміні напруги на один квант включає час перетворення ЦАП t_{DAC} ; час перерозподілу напруженості електричного поля між електродами та встановлення стаціонарного стану t_E ; час досягнення рівноваги на поверхні краплі t_p ; час, що витрачається фотокамерою на зняття та оцифровування зображення t_{fc} ; час передачі зображення по USB інтерфейсу в ПК t_{USB} і визначається як

$$t_{заг} = t_{DAC} + t_E + t_p + t_{fc} + t_{USB}. \quad (12)$$

Більшість вимірювальних пристроїв використовують послідовні ЦАП через їх високу швидкість перетворення, так, для ЦАП MAX5158 час встановлення складає $8 \cdot 10^{-6}$ с [5]. Час перерозподілу напруженості електричного поля між електродами та встановлення стаціонарного стану t_E складає $2 \cdot 10^{-4}$ с. У відеорежимі роботи фотокамери досягається можливість зняття зображення зі швидкістю 30 кадрів/с, отже $t_{fc} = 0,03$ с. Для досягнення високої швидкодії передачі даних та обробки зображення необхідно, щоб ПК підтримував передачу даних по USB 2.0, яка забезпечує швидкість передачі даних до 60 Мбайт/с [5, 6], тому $t_{USB} = 0,03$ с.

Час досягнення рівноваги на поверхні краплі t_p складається із часу затухання капілярних коливань τ_σ та часу в'язкого затухання τ_ν , що знаходяться згідно із (7), (8). Наприклад, для дистильованої води при $U=6,3$ кВ параметр Релея (3) $W < 1$, $\tau_\nu = 1,24$ с, $\tau_\sigma = 3,47 \cdot 10^{-2}$ с, тобто $t_p = 1,27$ с. У цьому випадку поверхня здійснює коливання, поки за рахунок в'язкості їх амплітуда значно знизиться. Зі збільшенням напруги характерний час капілярних коливань τ_σ збільшується; зі збільшенням в'язкості рідин характерний час в'язкого затухання капілярних коливань τ_ν зменшується. Таким чином, ріст напруги та в'язкості призводять до того, що затухання капілярних коливань на поверхні меніска відбувається швидше. Таким чином, $t_{заг}$ не перевищує 1,5 с.

Для зменшення тривалості вимірювального процесу попередня обробка зображення краплі ПК здійснюється паралельно переходу краплі в стаціонарний стан при зміні напруги на один крок та зняттю зображення фотокамерою. При цьому часова діаграма вимірювального перетворення має вигляд, зображений на рис. 1.

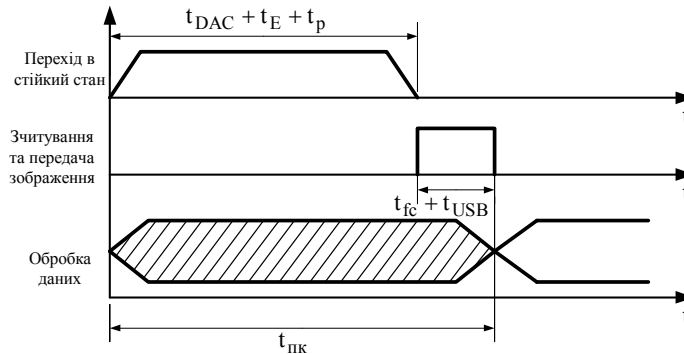


Рис. 1. Часова діаграма вимірювального перетворення

При оцінюванні швидкодії мікропроцесора ПК $t_{ПК}$ необхідно проаналізувати алгоритм

попереднього оброблення зображення. Час виконання попередньої обробки зображення мікропроцесором ПК у засобі контролю визначається

$$t_{нк} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (13)$$

де t_1 – тривалість завантаження даних; t_2 – тривалість визначення ординати омбілічної точки z_i ; t_3 – тривалість порівняння z_i з z_{i-1} ; t_4 – тривалість запису і видалення з пам'яті зображення; t_5 – тривалість формування коду для ЦАП.

Так, для процесора Intel Celeron з частотою роботи 2,2 ГГц швидкість читання з пам'яті становить 2,5 Гбайт/с, швидкість запису в пам'ять – 911 Мбайт/с. Оскільки об'єм фотографії складає до одного Мбайта, то $t_{нк}$ не перевищує 1,5 с.

Загальна тривалість вимірювального перетворення складає

$$t_{\Sigma} = K \cdot t_{заг}, \quad (14)$$

де K – кількість вимірювань.

У діапазоні зміни напруженості 450 – 700 кВ/м найбільший час вимірювання становить 1000 с. Для зменшення даного часу доцільно поділити весь діапазон напруженості в залежності від досліджуваної рідини та концентрації на декілька піддіапазонів. Так, наприклад, для концентрації до 0,1 % розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) напруженість настання нестійкого стану знаходиться в діапазоні 600-640 кВ/м, для неіоногенних ПАР при концентрації 0,5-1 % – 550-590 кВ/м, для аніонних ПАР при концентрації 1-5% – 500-540 кВ/м. Для ПАР, що підвищують поверхневий натяг, при концентрації до 2 % напруженість настання нестійкого стану знаходиться у діапазоні 630-670 кВ/м. Таким чином, при вимірюванні поверхневого натягу у певному діапазоні необхідно провести 120 вимірювань, що дозволяє скоротити максимальний час вимірювання до 180 с.

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– досліджено нестійкість краплі на основі модового підходу, що дозволило оцінити тривалість затухання капілярних коливань на поверхні меніска, синхронізувати швидкість встановлення стаціонарного стану краплі при зміні напруги на один крок з частотою реєстрації зображення лежачої краплі та скоротити тривалість вимірювання поверхневого натягу.

– оцінено, що тривалість переходу краплі в стаціонарний стан при зростанні напруги на один крок не перевищує 1,3 с. Для зменшення тривалості вимірювального перетворення паралельно переходу краплі в стаціонарний стан та зняттю зображення фотокамерою здійснюють попередню обробку зображення краплі ЕОМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білінський Й. Й. Роль поверхневих явищ в різних процесах та оптичні засоби визначення поверхневого натягу / Йосип Білінський, 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 сферoidalной 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 дисперсных 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.

Городецька Оксана Степанівна – к. т. н., старший викладач кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, (0432) 598-358, e-mail: biloshkursky@ukr.net.

Стальченко Олександр Володимирович – асистент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: stal1978@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет.