



Прийнято 27.03.2026. Прорецензовано 01.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 532.6.08

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-70-78

ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ ГАЗОВОГО СТРУМЕНЯ

Боднар Р. Т.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0006-3987-8007>

email: bodnar.roman2014@gmail.com

Анотація. Об'єктом дослідження є фізико-хімічний процес впливу вільного газового струменя на параметри меніска поверхні рідини в залежності від значення поверхневого натягу рідини. Наведено огляд ряду існуючих методів і засобів визначення поверхневого натягу рідини та встановлено їх недоліки при застосуванні у виробничих умовах. Показано зв'язок геометричних параметрів меніска поверхні рідини з поверхневим натягом. Запропоновано метод вільного газового струменя на поверхню рідини для утвореного меніска. Визначено залежності для величини швидкості газового потоку у різних точках вільного газового струменя, який виходить із циліндричного сопла, що дозволяє визначати розподіл динамічного тиску в точках поверхні утвореного меніска. Встановлені таким чином значення тиску застосовуються для розрахунку кривизни поверхні меніска в цій точці, застосовуючи відомі методи розрахунку капілярних поверхонь, а, значить, для визначення поверхневого натягу. Враховуючи, що розраховані теоретично профілі висячої краплі чи витягнутого пухирця є ідентичними, і відрізняються розташуванням омбілічної точки, встановлено умови, при яких можна застосовувати методіку визначення поверхневого натягу рідини при дії вільного газового струменя аналогічно, як для висячої краплі. Для експериментального дослідження профілю меніска розроблено структурну схему пристрою для визначення поверхневого натягу за методом вільного газового струменя, на основі якої виготовлено діючий експериментальний макет. Під дією тиску газового струменя на поверхні рідини створюється меніск, форму якого спостерігають за допомогою цифрового мікроскопа. Інформація з цифрового мікроскопа поступає на персональний комп'ютер, який буде обробляти цю інформацію за розробленим алгоритмом. Отримані результати перших експериментальних досліджень підтверджують припущення про використання запропонованого методу для визначення поверхневого натягу рідини. Отримані результати показують очевидну залежність геометричних параметрів меніска рідин під дією повітряного струменя від величини поверхневого натягу рідин

Ключові слова: поверхневий натяг; поверхнево-активні речовини; газовий струмінь; меніск; вимірювання; аналіз зображення; пристрій.

Вступ

У багатьох технологічних процесах флотації руд, нафтогазовидобутку, буріння свердловин, для очищення виробів на виробництві і в побуті, а також при виробни-

цтві штучних волокон, каучуку, пластмас, в целюлозно-паперовій та інших галузях використовують розчини поверхнево-активних речовин. З метою оптимального проведення таких процесів проводиться

Запропоноване посилання: Боднар, Р. Т. (2026). Вимірювання поверхневого натягу рідин методом газового струменя. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 70-78. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-70-78

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

постійний або періодичний моніторинг поверхневого натягу (ПН) технологічних рідин для оцінки вмісту в рідині ПАР.

Мета роботи – обґрунтувати метод газового струменя для визначення ПН, розробити функціональну схему та макет пристрою для визначення параметрів менісків рідини, на поверхню якої діє вільний газовий струмінь, для визначення ПН рідини з використанням оптоелектронних засобів та обчислювальної техніки.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

У теперішній час відомо ряд методів для визначення ПН рідин, які застосовують в різних ситуаціях залежно від виду рідини та оптимальності отримання вимірюваної інформації.

Принцип роботи багатьох сучасних приладів для визначення ПН рідин оснований на таких методах як лежачої краплі, відриву кільця, максимального тиску в бульбашці та ін. [1, 2]. Кожний з цих методів має конкретне застосування в залежності від виду рідин та умов вимірювання ПН, але в усіх цих методах є одна спільна вада – контакт рідини з діючим на неї інструментом впливу. Таким інструментом вплив є платинове кільце у методі відриву кільця, калібрований капіляр у методі максимального тиску в бульбашці чи пластина у методі Вільгельмі і т. п. Наявність будь-якого інструмента впливу вимагає його ретельного очищення після кожного вимірювання, що приводить до значного зниження продуктивності процесу визначення ПН рідин та унеможливує проведення автоматичного постійного моніторингу ПН. Недотримання чистоти інструменту впливу приведе до значних похибок в результатах вимірювання.

Теоретична база роботи

Поверхневий натяг σ є реальною силою, яка діє вздовж поверхні рідини і при розтягуванні поверхні вона виконуватиме роботу

$$A = \sigma \cdot dS, \quad (1)$$

де σ – поверхневий натяг;

S – площа поверхні рідини.

Робота деформації реального поверхневого шару рідини представляється як сума робіт деформації деякої геометричної поверхні, яка має ПН σ , і неминучої супутньої деформації об'ємних фаз. У загальному випадку робота деформації елементів поверхні включає члени, які зв'язані із змінами об'єму, викривленням поверхні і зміною положення в гравітаційному полі.

Локальні тиски P_1 та P_2 беруться по обидві сторони поверхні, яка розділює рідку і газову фази з врахуванням сили тяжіння.

В результаті таких міркувань отримується рівняння [1]:

$$h_B = l_1 - l_2 - \left(\frac{C_1}{R_1^2} + \frac{C_2}{R_2^2} \right) + mg \cos \varphi, \quad (2)$$

де R_1, R_2 – радіуси кривизни поверхні у взаємно перпендикулярних площинах (рис. 1);

C_1, C_2 – коефіцієнти, зв'язані з деформацією відповідних елементів поверхні;

m – маса елемента поверхні;

g – прискорення сили земного тяжіння;

φ – кут між вертикаллю і нормаллю до поверхні.

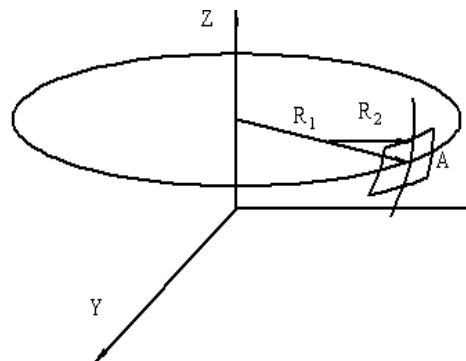


Рисунок 1 – Радіуси кривизни елемента капілярної поверхні

Рівняння (2) виражає умову рівноваги між рідкою і газовою фазами, які розділяють викривлену поверхню, і з нього можна визначити ПН σ незалежно від способу створення деформації поверхні розділу фаз.

Для визначення ПН рівняння (2) реалізується на практиці зокрема у методі максимального тиску в бульбашці, який базується на класичному рівнянні Лапласа, що отримується із (2) при певних допущеннях:

$$P_1 - P_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right), \quad (3)$$

де σ – поверхневий натяг рідини;

P – капілярний тиск;

R_1 та R_2 – радіуси кривизни капілярної поверхні у взаємно перпендикулярних перерізах.

Але меніск утворюватиметься не тільки як поверхня бульбашки, що витискується із капіляра в рідину, але й при дії газового струменя на вільну поверхню рідини, і геометричні параметри меніска будуть пов'язані з ПН рідини.

При цьому кривизна поверхні меніска в кожній його точці теж буде пропорційною величині ПН і теж залежатиме від діючого тиску газового струменя в цій точці.

Але в цьому випадку не застосовуватимуться формули, отримані для методу максимального тиску в бульбашці, оскільки в газовому пухирці тиск практично однаковий на всіх внутрішніх точках оболонки пухирця.

У запропонованому методі тиск газового струменя у різних точках утвореного меніска буде різним в залежності від віддаленості розглядуваної точки простору від вихідного торця капіляру, а, також, із за розширення газового струменя із сопла.

Відповідно, різним буде і розподіл значень величини тиску на різних точках поверхні меніска, що утворюється під дією газового струменя. Значить, автоматично застосовувати метод визначення ПН, аналогічно як в методі максимального тиску в бульбашці, не можна, оскільки це приведе до значних похибок в результатах визначення ПН.

Крім цього, вимірювання тиску у вільному струмені, враховуючи що значення тиску будуть невеликими (порядку 1–10 Па), існуючими тепер засобами вимірювання тиску теж приведе до значних похибок, оскільки внесення навіть сучасних мініатюрних первинних перетворювачів тиску у газовий струмінь приведе до спотворення поля тиску біля поверхні меніска. Значить, просто застосувати визначення ПН в залежності від тиску в омбілічній точці газового меніска приведе до значних похибок.

Використовуючи вирази з газодинаміки, які описують параметри газових потоків, можна отримати шукані значення тиску в різних точках потоку.

Величина динамічного тиску p залежить від швидкості потоку газу v [3]:

$$P = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

де ρ – густина газу.

Якщо нев'язкий газ з параметрами витікає адіабатно з резервуара великого об'єму через сопло, то на зрізі сопла в простір буде швидкість v_1 із тиском p_1 [3]:

$$v_1 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_0 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (5)$$

де $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показник адіабати (для повітря

$k=1,4$);

c_p – питома теплоємність газу при сталому тиску;

c_v – питома теплоємність при сталому об'ємі;

R – універсальна газова стала;

T_0 – температура в середині резервуара;

$\beta = \frac{P_1}{P_0}$ – відношення тисків на виході

сопла і всередині резервуара відповідно.

Аналогом резервуара великого об'єму є пневматичний поплавковий стабілізатор тиску із демпферними пневмоємностями, який живиться від малогабаритного компресора. Принцип дії такого стабілізатора тиску є аналогічним до параметричного стабілізатора напруги постійного струму.

Величина тиску p_0 в резервуарі чи на вході сопла визначається звичайними технічними засобами, наприклад, з використанням тензоперетворювачів типу *MPXV5004DP*.

Величину тиску p_1 на виході із циліндричного сопла можна визначити, знаючи секундну витрату газу Q через сопло:

$$Q = \varepsilon S \sqrt{2g\gamma(p_0 - p_1)}, \quad (6)$$

де S – площа перерізу сопла;

γ – питома вага газу;

g – прискорення земного тяжіння;

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}} - \text{коефіцієнт витрати};$$

$$\xi = \frac{64}{Re} - \text{коефіцієнт опору при ламі-}$$

нарній течії;

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} - \text{число Рейнольдса};$$

d – діаметр отвору сопла;

μ – динамічна в'язкість газу.

Значення швидкості у вільному газовому струмені при виході із циліндричного сопла в різних точках на віддалі x від зрізу сопла на осі струменя Ox [4]:

$$v_x = 0,96v_1 \left(0,29 + \frac{ax}{r_0} \right), \quad (7)$$

де $a = 0.066$ – константа; в рівномірному початковому полі швидкостей для круглої струмени;

r_0 – радіус отвору сопла.

В різних перерізах газового струменя поле швидкостей безперервно деформується. Чим далі переріз вільного газового струменя від зрізу сопла, тим нижча і ширша епюра швидкостей. Інакше кажучи, створюється загальна картина поступового розширення струменя і зменшення його швидкості.

Розподіл швидкостей в поперечному переріз вільного газового струменя можна розрахувати за формулою Шліхтінга [4]:

$$\frac{v}{v_x} = 1 - \eta^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

де v – швидкість вільному газовому струмені в точці з координатами (x, y) ,

η – відносна ордината точки, для круглого струменя $\eta = y/r$,

y – поперечна координата струменя;

r – радіус трубки, з якої виходить струмінь.

Використовуючи вирази (4–8) можна визначати тиск у будь-якій точці вільного газового струменя, який виходить з круглого циліндричного сопла до поверхні рідини, і застосовувати для розрахунку кривизни поверхні меніска в цій точці, застосовуючи відомі методи розрахунку капілярних поверхонь, а, значить, для визначення ПН [1; 2]. Профіль газового меніска, який

утворюється при дії на поверхню рідини струменем газу, досить близький до профілю висячої краплі. Як встановили К. Лайонс, Е. Елбінг та І. Вілсон, розраховані теоретично профілі висячої краплі чи витягнутого пухирця (рис. 2) є ідентичними, відрізняються тільки напрямом вертикальної осі симетрії і, відповідно, розташуванням вершини газового меніска, тобто, омбілічної точки [5].

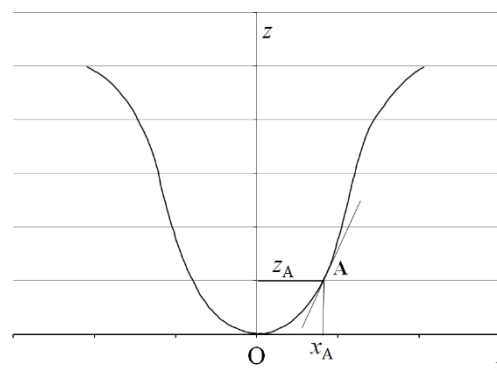


Рисунок 2 – Профіль висячої краплі (витягнутого пухирця)

Значить, у випадку застосування дії газового струменя на поверхню рідини доцільно застосувати методику визначення ПН аналогічно, як для висячої краплі чи витягнутого пухирця.

Для витягнутого в рідині пухирця встановлено залежність [1]:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{2}{R_0} - \frac{z}{a^2}, \quad (9)$$

де R_1 та R_2 – радіуси кривизни капілярної поверхні у взаємно перпендикулярних перерізах у розглядуваній т. A на профілі витягнутого пухирця;

$z = z_A$ – ордината біжучої т. A ;

$a^2 = \frac{\sigma}{\Delta\rho\Delta g}$ – капілярна стала;

$\Delta\rho$ – різниця густин двох фаз (рідини і газу);

g – прискорення земного тяжіння;

R_0 – радіус кривизни капілярної поверхні в омбілічній т. O .

Оскільки капілярна поверхня утворюється під дією струменя газу із круглого отвору капіляра, то цей меніск буде симетричним відносно осі Oz , значить, і в т. O радіус кривизни будуть однаковими і рівними R_0 .

У випадку меніска, утвореного вільним газовим струменем, можна використати і вираз (9) для визначення капілярної сталої a , тобто, для визначення ПН.

Отже, можливі два способи визначення ПН при застосуванні методу газового струменя. В першому слід розраховувати форму менісків для різних значень капілярної сталої a , виходячи з рівняння (2), аналогічно до методики розрахунку параметрів газового пухирця в методі максимального тиску [6], тільки враховуючи значення тиску в різних точках утвореного меніска відповідно до виразів (4–8). Із результатів розрахунку у вигляді таблиць даних можна апроксимувати вирази у вигляді поліномів, які описують геометричний контур меніска для кожного значення капілярної сталої a . Тоді можна застосувати регресійний метод, в якому отриманий з експерименту профіль меніска порівнюється із розрахованим теоретично контуром з найменшими допустимими відхиленнями [7].

Таку методику можна було б застосувувати для автоматичного визначення ПН рідин, наприклад, в шкідливих умовах, де лишень періодично допускається персонал в робочу зону підчас технологічного процесу.

Але, якщо, в процесі контролю ПН потрібно визначати невеликі відхилення ПН від заданого значення, наприклад, в технологічних процесах нафтовидобутку чи при екологічному контролі стічних вод і природних водойм, а власне саме значення ПН допустимо визначати з певною методичною похибкою, то можна застосовувати з цією метою вираз (9). Для цього потрібно отримати контур меніска (рис. 2), на якому визначити радіус кривизни R_0 в облічній т. O та радіуси кривизни R_1 та R_2 . За один радіус кривизни приймемо віддаль від осі Oz до т. A у горизонтальній площині $R_1 = O x_A$, а другий радіус кривизни R_2 у вертикальній площині можна визначити наступним чином.

В околі т. A (рис. 2) взяти множину точок на контурі меніска, що утворюють невелику дугу $MN=S$ (рис. 3).

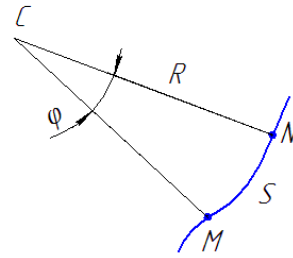


Рисунок 3 – Радіус кривизни дуги

Цей відрізок MN за координатами точок апроксимувати поліномом, який представлятиме рівняння дуги S . Якщо рівняння дуги S продиференціювати і підставити в отримані похідні координати точок M і N , то отримаємо в цих точках значення тангенсів кутів нахилу дотичних до дуги S [8].

Проведені до цих дотичних перпендикуляри MC і NC перетнуться в т. C . Якщо ці перпендикуляри MC і NC описуються рівняннями

$$a_1x + b_1y + c_1 = 0, \quad a_2x + b_2y + c_2 = 0,$$

то кут φ між ними визначається з виразу [9]:

$$\cos \varphi = \frac{|a_1a_2 + b_1b_2|}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2)}}. \quad (10)$$

Тоді другий радіус кривизни елемента дуги S буде рівний [9]:

$$R_2 = \frac{dS}{d\varphi}. \quad (11)$$

Аналогічно до R_2 визначається і радіус кривизни R_0 .

Тоді значення капілярної сталої a^2 , а значить, і ПН, обчислюється із (9) підстановкою визначених R_0 , R_1 , R_2 та z_A . Для цього тільки треба отримати чіткий контур меніска, утвореного газовим струменем.

Для експериментального дослідження профілю меніска розроблено макет пристрою, структурна схема якого показана на рис. 4.

Робота пристрою полягає в наступному. Повітря під тиском із мікрокомпресора 2 поступає на стабілізатор 3 і регулятор тиску 4, до якого приєднано вимірювач тиску 6 і сопло 13, з якого повітря видувається на поверхню рідини. Під дією тиску повітря на поверхні рідини створюється меніск, форму якого спостерігають за допомогою

цифрового мікроскопа 8. Освітлення контура меніска створюється освітлювачем 1. Встановлення режиму освітлення відіграє дуже важливу роль для отримання візуально чіткої лінії контуру меніска. Інформація з цифрового мікроскопа поступає на персональний комп'ютер 11, який буде обробляти цю інформацію за розробленим алгоритмом.

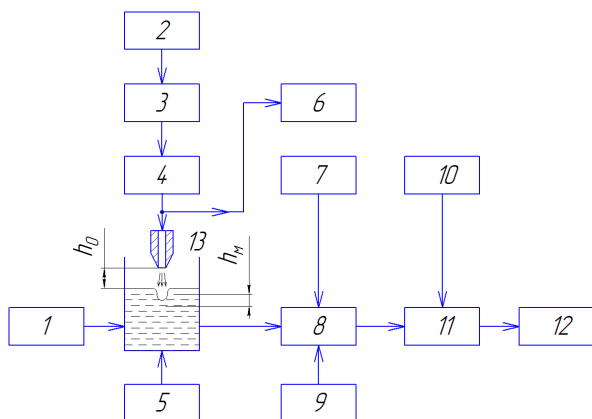


Рисунок 4 – Структурна схема пристрою для визначення поверхневого натягу газовим струменем

Перш за все на зображенні профілю меніска треба визначити координати точок контуру меніска, що здійснюється за розробленою методикою, в якій застосовується оператор Кейні, в якому для визначення краю контуру меніска використовується оператор Собела [10-11]. Потім вже проводяться обчислення за наведеною вище методикою.

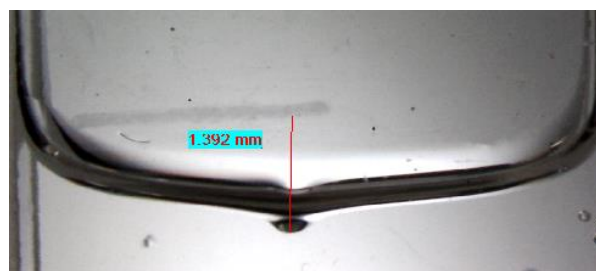
Результати перших досліджень на розробленім пристрою показано на рис. 5–6.

Під дією повітряного струменя на поверхні води утворюється воронка (рис. 5, а), глибина якої дорівнює:

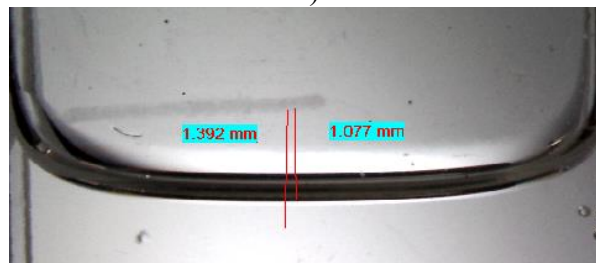
$$h_B = l_1 - l_2, \quad (12)$$

де l_1 – віддаль від вибраної реперної лінії до вершини меніска;

l_2 – віддаль від вибраної реперної лінії до поверхні води в спокійному стані.

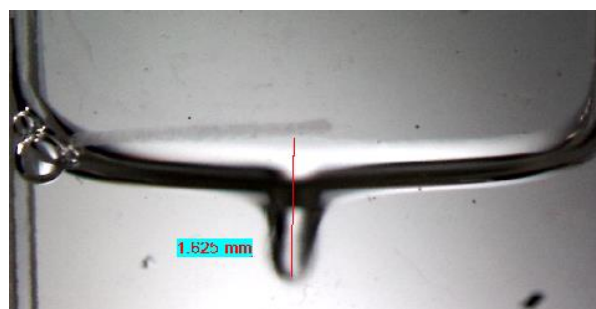


а)

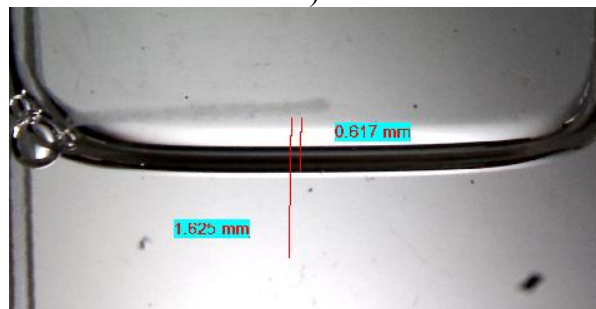


б)

Рисунок 5 – Зображення профілів менісків води під дією повітряного струменя (а) і в спокійному стані (б)



а)



б)

Рисунок 6 – Зображення профілів менісків розчину ПАР під дією повітряного струменя (а) і в спокійному стані (б)

Віддалі l_1 і l_2 визначались за допомогою цифрового мікроскопа (рис. 5, б). Для води глибина воронки становила $h_B = 0,315$ мм.

Після додавання краплини ПАР у кювету з водою при незмінних інших параметрах експерименту утворюється воронка (рис. 6, а), глибина якої становила $h_p = 0,808$ мм.

Глибина воронки на цих рисунках є тільки якісним показником ПН досліджуваної рідини, які підтверджують можливість визначення ПН запропонованим методом. Для точного визначення ПН треба провести вдосконалення макету пристрою та методики вимірювання.

Висновки

1. Проаналізовано ряд існуючих методів і засобів визначення поверхневого натягу рідини та встановлено їх недоліки при застосуванні у виробничих умовах

2. Використання запропонованого методу визначення ПН дає можливість здійснювати вимірювання без затрат праці і часу на промивання вимірювальних інструментів та кювет. Це дозволяє проводити

неперервний моніторинг ПН рідин в технологічних процесах із застосуванням ПАР, а також екологічний контроль стічних вод.

3. Результати перших досліджень підтверджують припущення про використання запропонованого методу для визначення ПН. Отримані результати показують очевидну залежність геометричних параметрів меніска рідин під дією повітряного струменя від величини ПН рідин.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Кісіль І. С., Кісіль Р. І. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Методи максимального тиску у бульбашці, лежачої і висячої крапель та об'єму. Т. 1. Івано-Франківськ : Факел, 2010. 298 с.

2. Кісіль І. С., Боднар Р. Т., Біліщук В. Б., Барна О. Б., Витвицька Л. А. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, крайового кута змочування. Т. 2. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. 406 с.

3. Турик В. М. Гідрогазодинаміка. Курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 145 с.

4. Ткаченко С. Й., Степанова С. Й. Гідрогазодинаміка: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2012. 180 с.

5. Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R. A general selected-plane method for measuring interfacial tensions from the shapes of pendent and sessile interfaces. Department of Chemistry, Monash University. Clayton, Victoria, Australia, 1983.

6. Кісіль І. С. Визначення поверхневого натягу рідин на основі вимірювання максимального тиску в газовому меніску. *Методи та прилади контролю якості*. 1997. № 1. С. 50–54.

7. Боднар Р. Т., Горелов В. О., Кісіль І. С., Степанюк Я. В. Визначення крайового кута змочування рідинами твердих тіл шляхом вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі. *Методи та прилади контролю якості*. 2004. № 12. С. 38–41.

8. Африканова А. Г., Виштакалюк Н. А., Дрозденко О. Л. Вища математика : навч. посіб. Київ : Аграрна освіта, 2014. 367 с.

9. Збірник задач з аналітичної геометрії: навч. посібник для проведення практичних занять з дисципліни «Аналітична геометрія та лінійна алгебра» для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» / В. І. Суцук-Слюсаренко, Ю. В. Бухтіяров, В. В. Жабіна, Л. В. Дрозденко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 135 с.

10. Біліщук В. Б., Костів Б. В., Боднар Р. Т. Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії. *Методи та прилади контролю якості*. 2014. № 2 (33). С. 59–65.

11. Maini R., Aggarwal H. Study and comparison of various image edge detection techniques. *International Journal of Image Processing (IJIP)*. 2009. Vol. 3 (1). P. 1–12. URL: <http://www.math.tau.ac.il/~turkel/notes/Maini.pdf>

References

1. Kisil, I. S., & Kisil, R. I. (2010). *Vymiriuvannia poverkhnevnykh vlastyvostei na mezhakh rozdilu faz. Metody maksimalnogo tysku u bulbashtsi, lezhachoi i vysiachoi krapel ta obiemu* [Measurement of surface properties at phase interfaces. Methods of maximum bubble pressure, sessile and pendant drops, and volume] (Vol. 1). Fakel. (in Ukrainian)
2. Kisil, I. S., Bodnar, R. T., Bilishchuk, V. B., Barna, O. B., & Vytvytska, L. A. (2018). *Vymiriuvannia poverkhnevnykh vlastyvostei na mezhakh rozdilu faz. Metody obertovoi krapli, rozhornutoho meniska, vytiahuvannia til, kraiovoho kuta zmotiuvannia* [Measurement of surface properties at phase interfaces. Methods of rotating drop, extended meniscus, body pulling, contact wetting angle] (Vol. 2). IFNTUNG. (in Ukrainian)
3. Turyk, V. M. (2021). *Hidrohazodynamika. Kurs leksii* [Hydrogasdynamics. Lecture course] (Educational manual). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. (in Ukrainian)
4. Tkachenko, S. Y., & Stepanova, S. Y. (2012). *Hidrohazodynamika: navchalnyi posibnyk* [Hydrogasdynamics: Educational manual]. VNTU. (in Ukrainian)
5. Lyons, C. J., Elbing, E., & Wilson, I. R. (1983). A general selected-plane method for measuring interfacial tensions from the shapes of pendent and sessile interfaces. *Department of Chemistry, Monash University*.
6. Kisil, I. S. (1997). Vyznachennia poverkhnevoho natiahu ridyn na osnovi vymiriuvaloho maksimalnogo tysku v hazovomu menisku [Determination of surface tension of liquids based on the measured maximum pressure in a gas meniscus]. *Methods and Instruments of Quality Control*, (1), 50–54. (in Ukrainian)
7. Bodnar, R. T., Horielov, V. O., Kisil, I. S., & Stepaniuk, Ya. V. (2004). Vyznachennia kraiovoho kuta zmotiuvannia ridynamy tverdykh til shliakhom vymiriuvannia heometrychnykh rozmiriv lezhachoi krapli [Determination of the contact wetting angle of solids by liquids by measuring the geometric dimensions of a sessile drop]. *Methods and Instruments of Quality Control*, (12), 38–41. (in Ukrainian)
8. Afrykanova, A. H., Vyshtakaliuk, N. A., & Drozdenko, O. L. (2014). *Vyshcha matematika: navchalnyi posibnyk* [Higher mathematics: Educational manual]. Agrarna Osvita. (in Ukrainian)
9. Sushchuk-Sliusarenko, V. I., Bukhtiiarov, Yu. V., Zhabina, V. V., & Drozdenko, L. V. (2021). *Zbirnyk zadach z analitychnoi heometrii: navchalnyi posibnyk dlia provedennia praktychnykh zaniat z dystsyplyny "Analitychna heometriia ta liniina alhebra"* [Collection of problems in analytical geometry: Educational manual for practical classes in the discipline "Analytical Geometry and Linear Algebra"] (Educational manual). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. (in Ukrainian)
10. Bilishchuk, V. B., Kostiv, B. V., & Bodnar, R. T. (2014). Metodyka analizu tsyfrovnykh zobrazen dlia vyznachennia koordynat tochok konturu fiksovanoi obertovoi krapli v mizhfaznii tenziometrii [Methodology of digital image analysis for determining the coordinates of contour points of a fixed rotating drop in interfacial tensiometry]. *Methods and Instruments of Quality Control*, 2(33), 59–65. (in Ukrainian)
11. Maini, R., & Aggarwal, H. (2009). Study and comparison of various image edge detection techniques. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(1), 1–12. <http://www.math.tau.ac.il/~turkel/notes/Maini.pdf>

MEASUREMENT OF SURFACE TENSION OF LIQUIDS BY THE GAS JET METHOD

Bodnar R. T.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska St, 15, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-3987-8007>
email: bodnar.roman2014@gmail.com

Abstract. The object of the study is the physicochemical process of the influence of a free gas jet on the parameters of the meniscus of the liquid surface depending on the value of the surface tension of the liquid. A review of a number of existing methods and means of determining the surface tension of the liquid is given and their shortcomings when used in production conditions are identified. The relationship between the geometric parameters of the meniscus of the liquid surface and surface tension is shown. The method of a free gas jet on the liquid surface for the formed meniscus is proposed. The dependences for the gas flow velocity at different points of the free gas jet emerging from the cylindrical nozzle have been determined, which allows us to determine the distribution of dynamic pressure at points on the surface of the formed meniscus. The pressure values established in this way are used to calculate the curvature of the meniscus surface at this point, using known methods for calculating capillary surfaces, and, therefore, to determine the surface tension. Considering that the theoretically calculated profiles of a hanging drop or an elongated bubble are identical and differ in the location of the umbilical point, the conditions under which the method for determining the surface tension of a liquid under the action of a free gas jet can be applied in a similar way as for a hanging drop have been established. For the experimental study of the meniscus profile, a structural diagram of a device for determining the surface tension by the free gas jet method has been developed, on the basis of which a working experimental model has been manufactured. Under the action of the pressure of the gas jet, a meniscus is created on the surface of the liquid, the shape of which is observed using a digital microscope. Information from the digital microscope is fed to a personal computer, which will process this information according to the developed algorithm. The results of the first experimental studies confirm the assumption of using the proposed method to determine the surface tension of the liquid. The results obtained show an obvious dependence of the geometric parameters of the meniscus of liquids under the action of the air jet on the value of the surface tension of the liquids.

Keywords: surface tension; surfactants, gas jet; meniscus, measurement, image analysis, device.