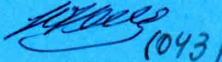


532.6(043)  
K95

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

*Кучірка Юрій Михайлович*

  
УДК 532.6(043)  
K95

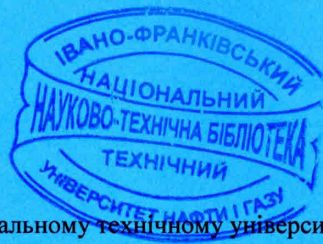
**УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ  
ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ**

Спеціальність 05.11.13 - Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2013

Дисертацією є рукопис



Робота виконана у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор

**Кісіль Ігор Степанович,**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

**Ковальчук Володимир Іванович,**

Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка Національної академії наук України (м. Київ), завідувач відділу макрокінетики природних дисперсних систем,

доктор технічних наук, професор

**Древецький Володимир Володимирович,**

Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), завідувач кафедри приладобудування, електротехніки та інформаційних технологій

Захист відбудеться 28 травня 2013 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15).

Автореферат розісланий 20 квітня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, професор

Дранчук М.М.



## АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження поверхневого натягу (ПН) рідин і розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) необхідне при їх виробництві та використанні у нафтогазовій, авіаційній, космічній та інших галузях промисловості. Екологічний контроль на вміст ПАР у побутових і промислових водних стоках, медичні дослідження біологічних рідин (БР) людського організму також мають гостру потребу у розробленні надійних методів дослідження ПН рідин та виробництві на їх основі автоматизованих вимірювальних засобів.

За значенням ПН можна експериментально вибирати тип ПАР і його концентрацію у розчинах, судити про якість розчинів ПАР як на водній, так і на органічній основах. Оптимальний вибір типу ПАР та концентрації промислових розчинів ПАР при їх застосуванні у нафтогазовій промисловості дозволяє підвищити видобуток нафти і газу. Використання ПАР при виробництві різноманітних промислових та побутових миючих засобів вимагає надійних приладів для оцінки їх якості і контролю за ефективністю їх застосування. Широкий вжиток таких миючих засобів потребує проведення постійного екологічного контролю та моніторингу на вміст ПАР як у стічних водах, які в подальшому у процесі їх очищення передбачається використовувати для різноманітних цілей, так і у водоймах, які є джерелами для постачання питної води населенню.

Використання ПАР у сучасних технологіях видобутку сланцевого газу із використанням значних об'ємів води, в т.ч. і на території України, вимагає проведення постійного екологічного контролю водних ресурсів на вміст у них ПАР з використанням автоматизованих засобів вимірювання їх ПН. В медичній галузі результати вимірювання рівноважного (РПН) та динамічного ПН (ДПН) БР людини відображають її вік, стать, ознаки здоров'я чи наявність конкретного захворювання у людському організмі.

Сучасні методи і прилади для дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці дозволяють здійснювати такі дослідження у вище описаних сферах, проте вони вимагають попереднього вимірювання густини досліджуваних рідин та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину.

Тому удосконалення існуючих методів дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці є актуальним, що дозволить усунути недоліки відомих методів і тим самим підвищити точність результатів дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних державних бюджетних тем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу «Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрат та контролю обладнання і технологічних параметрів у нафтогазовій галузі» (0109U008878) і «Розроблення новітніх методів і систем експрес-контролю наявності поверхнево-активних речовин (ПАР) у стічних водах, водоймищах і річках» (0112U003012), де автор був виконавцем відповідних розділів, пов'язаних із розробленням удосконалених методів і трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці.

0112U003012 0109U008878

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення точності результатів досліджень рівноважного та динамічного поверхневих натягів рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці шляхом розроблення удосконалених методів таких досліджень та трикапілярного пристрою, що їх реалізує.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- здійснити аналіз відомих методів і приладів для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці;
- розробити методику фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска у цей момент;
- розробити удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів за максимальними тисками у бульбашках, які утворюються на нижніх торцях цих капілярів;
- розробити удосконалену процедуру визначення моментів досягнення максимальних тисків у бульбашках у процесі їх вимірювання;
- розробити та виготовити трикапілярний пристрій для автоматизованого дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;
- розробити методику урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, що утворюються із трьох капілярів, а також методику визначення радіусів цих капілярів;
- здійснити метрологічний аналіз розроблених методів і трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, а також розробити проект методики перевірки цього пристрою;
- провести лабораторні і натурні випробування трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

**Об'єктом дослідження** є процес дослідження поверхневого натягу однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР і біологічних рідин людського організму.

**Предметом дослідження** є удосконалені методи підвищення точності досліджень поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимального тиском у бульбашці.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися: теорія капілярності Лапласа (для розроблення методики фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці); чисельні методи Рунге-Кутта та Адамса-Башфорта-Мултона (для розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують поверхню меніска); математичні фільтри Савицького – Голяя (для визначення моменту максимального тиску у процесі його вимірювання); статистичні методи (для оброблення значень максимального тиску та часових параметрів ДПН рідин і розчинів ПАР); методи інтерполяції, екстраполяції та апроксимації даних (для визначення проміжних значень максимальних тисків у бульбашках та рівноважного максимального тиску для кожного із трьох капілярів); методи теорії похибок (для оцінки складових похибки трикапілярного пристрою).

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблено методику фіксації моменту досягнення максимального

тиску у бульбашці у процесі розрахунку параметрів меніска у цей момент, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- вперше розроблені ітераційні методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, які не вимагають попереднього визначення густини рідини та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину у цю рідину, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- вперше розроблено процедуру визначення моменту максимального тиску у бульбашці у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького–Голя другого порядку, що дозволило підвищити точність вимірювання максимального тиску і, відповідно, точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- отримані залежності радіусу кривизни меніска в його омбілічній точці та віддалі від неї до нижнього торця капіляра у момент максимального тиску у бульбашці від параметрів, які визначаються у процесі дослідження ПН рідини, що дозволило врахувати несферичність меніска у цей момент, і тим самим підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблено і виготовлено трикапілярний пристрій з метою реалізації удосконалених методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, який дозволяє здійснювати автоматизоване їх дослідження у діапазоні часу існування розділу фаз від 0,1 с до 50000 с та здійснено метрологічний аналіз цього пристрою;

- розроблено методику урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на вимірні максимальні тиски у бульбашках, які утворюються із трьох капілярів, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено методику попереднього визначення радіусів вихідних отворів трьох вимірювальних капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, що дозволяє врахувати їх виробничі вади і тим самим підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено процедуру статистичного оброблення максимальних тисків і часових параметрів ПН рідин і розчинів ПАР у процесі їх вимірювання, що дозволяє підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено проект методики перевірки трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин і розчинів ПАР;

- впроваджено трикапілярний пристрій для дослідження БР пацієнтів Чернівецького обласного клінічного онкологічного диспансеру та промислових розчинів ПАР, які використовуються ТЗОВ «Вінісін».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати із формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: розроблення методики фіксації моменту максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку параметрів меніска у цей момент [1÷3];

розроблення ітераційних методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів [4÷12]; розроблення і виготовлення трикапілярного пристрою [4÷12]; розроблення методики визначення моменту максимального тиску у бульбашці у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького – Голея [13]; розроблення методики урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках [14]; розроблення методики визначення радіусів вихідних отворів трьох капілярів за виміряними максимальними тисками у бульбашках; розроблення процедури статистичного оброблення максимальних тисків і часових параметрів ДПН рідин і розчинів ПАР у процесі їх вимірювання [14÷18]; метрологічний аналіз трикапілярного пристрою; розроблення проекту методики повірки трикапілярного пристрою.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: VI – й науково-технічній конференції «Приладобудування 2007: Стан і перспективи» (м. Київ) – 2007 р.; V – й науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ) – 2008 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми і перспективи» (м. Івано-Франківськ) - 2009р.; IX-й науково-технічній конференції «Приладобудування – 2010: стан і перспективи» (м. Київ) – 2010 р.; науково-технічній конференції «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України» (м. Івано-Франківськ) – 2010 р.; VI – й науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ) – 2011 р.; XI-й Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця) – 2012 р.; V – му Всесвітньому конгресі «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ) – 2012 р.; VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія і вимірювальна техніка» (м. Харків) – 2012 р.; I-й конференції студентів, аспірантів «Сучасні тенденції розвитку приладобудування» (м. Луганськ) – 2012 р.

**Публікації.** За результатами теоретичних і експериментальних досліджень, які представлені у дисертаційній роботі, опубліковано 6 статей у фахових наукових виданнях України (в т.ч. 1 стаття – одноособова), отримано 2 патенти України на винахід, прийнято участь у 10 – ох науково-технічних конференціях.

**Обсяг та структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та 16 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 273 сторінки, з яких основний зміст дисертації викладено на 145 сторінках друкованого тексту, 40 рисунках і 9 таблицях. Список використаних джерел складається із 101 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність наукової проблеми досліджень, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та задачі досліджень,

визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, показаний особистий внесок здобувача, вказана інформація про публікації по результатах роботи та їхню апробацію.

У першому розділі здійснено аналіз експериментальних умов дослідження ПН однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР та БР людського організму.

Показано, що метод максимального тиску у бульбашці (МТБ) задовольняє сучасні вимоги щодо дослідження РПН і ДПН однокомпонентних рідин і розчинів ПАР, а також дозволяє здійснити автоматизований процес їх дослідження.

Проведено аналіз відомих методів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці та приладів, що реалізують ці методи, які базуються на використанні одного вимірювального капіляра із певним внутрішнім радіусом його вихідного отвору, двох капілярів з різними радіусами, що дозволило виявити їх основні недоліки, які впливають на точність визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

Показано, що актуальними проблемами відомих методів дослідження ПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці та приладів, що їх реалізують, залишаються: необхідність підвищення точності урахування несферичності меніска у момент максимального тиску у бульбашці; необхідність попереднього вимірювання густини досліджуваної рідини; потреба у точному зануренні вимірювального капіляра на задану глибину цієї рідини; необхідність урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми приладів на вимірні максимальні тиски у бульбашках, які утворюються на нижніх торцях капілярів із різними радіусами, а також труднощі визначення моментів максимальних тисків та часових параметрів ДПН у процесі їх вимірювання.

З урахуванням наведеного сформульовані задачі, які потребують вирішення, та обрано напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі розроблено основні теоретичні положення, на яких ґрунтуються запропоновані удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці.

За основу взято строго аналітичну залежність ПН рідини  $\sigma$  від максимального тиску у бульбашці  $P_{\max}$ :

$$P_{\max} = \frac{2\sigma}{R_o} + \Delta\rho g(H + z_o), \quad (1)$$

де  $R_o$  і  $z_o$  – радіус кривизни меніска в його облічній точці у момент максимального тиску у бульбашці та віддаль від неї до нижнього торця капіляру, відповідно;  $\Delta\rho$  – різниця густин рідини та газу;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $H$  – глибина занурення капіляру у досліджувану рідину. Значення  $P_{\max}$ ,  $\Delta\rho$ ,  $g$  і  $H$  можуть бути визначеними чи вимірними, а  $R_o$  і  $z_o$ , які залежать від радіусу капіляру та властивостей рідини, піддаються вимірюванню лише за допомогою швидкісної відеотехніки, але це веде до значних ускладнень і не є виправданим у більшості практичних випадків.

З метою урахування несферичності меніска та одержання параметрів  $R_o$  і  $z_o$  використано таку відому систему диференційних рівнянь капілярності, яка описує поверхню меніска бульбашки у будь-який момент, у т.ч. і у момент максимального

тиску у ній:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dl} = \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{dl} = 2 + \beta z - \frac{\sin \varphi}{x}, \\ \frac{dz}{dl} = \sin \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут нахилу дотичної меридіана у відповідній точці поверхні меніска до осі абсцис;  $x$ ,  $z$  – безрозмірні горизонтальна і вертикальна координати точки профілю меніска, відповідно;  $l$  – безрозмірна довжина дуги твірної меридіального перерізу меніска;  $\beta$  – безрозмірний параметр, що повністю визначає поверхню меніска:  $\beta = R_0^2/a^2$ , де  $a^2 = \sigma/\Delta\rho g$  – капілярна стала рідини. Параметри  $x$ ,  $z$ ,  $l$  у системі рівнянь (2) приведені у безрозмірну форму шляхом ділення їх розмірних значень на радіус кривизни меніска  $R_0$ . Початкові умови для розв'язку системи рівнянь (2) є такими:  $z = l = \varphi = 0$ .

На основі результатів розрахунку геометричних параметрів двох поверхонь меніска, які одержують при розв'язку системи рівнянь (2) методом Рунге-Кутта 4(5) порядку чи Адамса-Башфорта-Мултона, запропоновано таку *методику фіксації моменту максимального тиску у бульбашці* у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска. Для двох заданих параметрів  $\beta$  та  $\beta + \Delta\beta$  ( $\Delta\beta \ll \beta$ ) розраховують дві поверхні меніска від кута  $\varphi = 0^\circ$  до досягнення кінцевою точкою кожної поверхні кута  $\varphi = 180^\circ$ . Поверхню меніска з параметром  $\beta$  вважають основною, а поверхню меніска з  $\beta + \Delta\beta$  додатковою, тобто наступною у процесі росту меніска. Кожну координату абсцис  $x_{\text{max}}$  профілю додаткової поверхні меніска приводять до однакового значення з параметром  $x_{\text{max}}$  профілю основної поверхні меніска шляхом перемноження  $x_{\text{max}}$  на коефіцієнт  $\sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ , де  $x_{\text{max}}$  представляє собою безрозмірний радіус кромки ножового капіляра, на якій досягається максимальний тиск у бульбашці. Необхідність такого приведення пояснюється тим, що профілі основної і додаткової поверхонь меніска моделюють дві стадії росту меніска в одній досліджуваній рідині, тобто значення капілярної сталої  $a^2$  для обох поверхонь є однаковим. Для того, щоб поверхня меніска з іншим значенням параметру  $\beta$ , наприклад,  $\beta + \Delta\beta$ , могла існувати у рідині з таким же значенням  $a^2$  необхідно, щоб радіус кривизни такої поверхні меніска  $R_{0,\text{доп.}}$  визначався наступним співвідношенням:

$$\frac{R_0^2}{\beta} = \frac{R_{0,\text{доп.}}^2}{\beta + \Delta\beta} = a^2, \text{ або } R_{0,\text{доп.}} = R_0 \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}. \quad (3)$$

Отже, при порівнянні параметрів основної та додаткової поверхонь меніска



необхідно приводити параметри додаткової поверхні меніска до параметрів основної поверхні шляхом їх перемноження на коефіцієнт  $\sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ . На основі розрахованих масивів значень вертикальної  $\dot{z}_{\text{осн}}$  та горизонтальної  $\dot{x}_{\text{осн}}$  координат профілю додаткової поверхні меніска за допомогою інтерполяції сплайнами знаходять проміжне значення  $\dot{z}_{\text{осн}}$ , яке відповідатиме координаті  $\dot{x}_{\text{мак}} = \dot{x}_{\text{осн}} / \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ . Далі розраховують значення безрозмірних тисків для профілів основної та додаткової поверхонь меніска за виразами  $\dot{P}_{\text{осн}} = 2/\beta + \dot{z}_{\text{осн}}$  та  $\dot{P}_{\text{мак}} = 2/(\beta + \Delta\beta) + \dot{z}_{\text{осн}}$ , відповідно. Отримані значення  $\dot{P}_{\text{осн}}$  і  $\dot{P}_{\text{мак}}$  приводять до одного масштабу та порівнюють між собою: якщо приведений тиск  $\dot{P}_{\text{мак}} \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$  буде більшим від тиску  $\dot{P}_{\text{осн}}$ , то вважають, що максимальний тиск у бульбашці ще не наступив, але якщо  $\dot{P}_{\text{мак}} \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$  стане меншим від  $\dot{P}_{\text{осн}}$ , то приймають, що момент максимального тиску для основної поверхні меніска є досягнутий. Тоді безрозмірні геометричні параметри профілю основної поверхні меніска будуть відповідати безрозмірному максимальному тиску  $\dot{P}_{\text{мак}}$ . Якщо вказана умова не виконується, то процедура порівняння  $\dot{P}_{\text{осн}}$  і  $\dot{P}_{\text{мак}} \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$  проводиться для наступних точок профілів основної та додаткової поверхонь меніска аж до виявлення цього моменту. Пошук моменту максимального тиску у бульбашці починають з точок, для яких кут  $\varphi \geq \pi/2$ , оскільки відомо, що лише при куті  $\varphi \geq \pi/2$  можливе досягнення моменту максимального тиску у бульбашці. Описаний алгоритм реалізують для значень безрозмірного параметру  $\beta$  від 0,001 до 10. Вказаний діапазон відповідає можливим діапазонам значень капілярних сталих однокомпонентних рідин і розчинів ПАР  $a^2 = (1 \div 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , радіусів капілярів, на яких можуть знаходитися бульбашки у моменти максимальних тисків у них  $r = (0,1 \div 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  та радіусів кривизни менісків  $R_0 \approx (0,1 \div 3,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , які утворюються на кромках вихідних отворів таких капілярів. Результатом реалізації розробленої методики є масив розрахованих для заданих  $\beta$  значень горизонтальних  $\dot{x}_*$  і вертикальних  $\dot{z}_*$  координат профілю основної поверхні меніска, які приведені до  $R_0$ , максимального тиску  $\dot{P}_{\text{мак}}$ , який приведений до  $\Delta \text{рг} R_0$ , площі меніска  $\dot{A}_*$  та об'єму бульбашки  $\dot{V}_*$ , які приведені до  $R_0^2$  та  $R_0^3$ , відповідно, а також кута  $\varphi_*$  у момент максимального тиску у бульбашці. Приведені до інших параметрів ( $a, r, P_{\text{мак}}$ ) геометричні параметри меніска у цей момент визначають так:

$$\left. \begin{aligned} r/a &= \dot{x}_* \cdot \sqrt{\beta}, \quad R_0/a = \sqrt{\beta}, \\ z_0/a &= \dot{z}_* \cdot \sqrt{\beta}, \quad \sigma/P_{\text{мак}} r = 1/(\dot{P}_{\text{мак}} \cdot \beta \cdot \dot{x}_*), \\ A/r^2 &= \dot{A}_* \cdot (1/\dot{x}_*)^2, \quad V/r^3 = \dot{V}_* \cdot (1/\dot{x}_*)^3, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На основі розрахованих параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці запропоновані апроксимаційні залежності  $R_o/a = f_2(r/a)$  і  $z_o/a = f_3(r/a)$ , які дозволяють замінити параметри  $R_o$  і  $z_o$  у залежності (1) на залежності від параметрів, які визначаються у процесі дослідження ПН рідини ( $\sigma$ ,  $\Delta\rho$ ):

$$\frac{R_o}{a} = f_2\left(\frac{r}{a}\right) = A_0 + \sum_{i=0}^8 \left( A_i \cos\left(i \frac{kr}{a}\right) + B_i \sin\left(i \frac{kr}{a}\right) \right) \quad (5)$$

де  $k = 2,064006$ ;  $A_0 = 7,538336$ ;  $A_1 = -0,949654$ ;  $B_1 = -11,732394$ ;  $A_2 = -8,706698$ ;  $B_2 = -0,570453$ ;  $A_3 = -1,049907$ ;  $B_3 = 5,76990$ ;  $A_4 = 3,162638$ ;  $B_4 = 0,894259$ ;  $A_5 = 0,548177$ ;  $B_5 = -1,411823$ ;  $A_6 = -0,487164$ ;  $B_6 = -0,237016$ ;  $A_7 = -0,071153$ ;  $B_7 = 0,1179$ ;  $A_8 = 0,016604$ ;  $B_8 = 0,011195$ ,

$$\frac{z_o}{a} = f_3\left(\frac{r}{a}\right) = \frac{C_0 + C_1 \frac{r}{a} + C_2 \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C_3 \left(\frac{r}{a}\right)^3 + C_4 \left(\frac{r}{a}\right)^4 + C_5 \left(\frac{r}{a}\right)^5}{C_6 + C_7 \frac{r}{a} + C_8 \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C_9 \left(\frac{r}{a}\right)^3 + C_{10} \left(\frac{r}{a}\right)^4 + \left(\frac{r}{a}\right)^5}, \quad (6)$$

де  $C_0 = 0,0001842$ ;  $C_1 = 12,844138$ ;  $C_2 = -36,994924$ ;  $C_3 = 43,828754$ ;  $C_4 = -25,649188$ ;  $C_5 = 6,616949$ ;  $C_6 = 12,884830$ ;  $C_7 = -37,462462$ ;  $C_8 = 42,641759$ ;  $C_9 = -21,471278$ ;  $C_{10} = 2,901192$ . Звідси отримують, що  $R_o = a \cdot f_2(r/a)$  та  $z_o = a \cdot f_3(r/a)$ . Максимальна абсолютна похибка визначення параметрів  $R_o$  і  $z_o$  із залежностей (5) і (6) при максимальному значенню капілярної сталої  $a^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  становить  $2,119 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  та  $1,575 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , відповідно.

Це дозволяє записати такий вираз для визначення однокapілярним пристроєм ПН рідини  $\sigma$ , у якому врахована несферичність меніска у момент максимального тиску у бульбашці та відсутні параметри  $R_o$  і  $z_o$ :

$$\sigma = \frac{a \cdot f_2(r/a)}{2} (P_{\max} - \Delta\rho g(H + a \cdot f_3(r/a))). \quad (7)$$

Для визначення  $\sigma$  згідно (7), крім максимального тиску  $P_{\max}$ , необхідно попередньо визначити різницю густин досліджуваної рідини та газу  $\Delta\rho$ , а також прецизійно встановити вимірювальний капіляр на задану глибину  $H$  у досліджувану рідину. При цьому ПН рідини  $\sigma$  знаходять ітераційним методом, так як шукане значення  $\sigma$  міститься у правій і лівій частинах залежності (7).

З метою усунення необхідності визначення  $\Delta\rho$  та встановлення заданого  $H$  був розроблений ітераційний метод визначення ПН рідини з використанням трьох зафіксованих між собою капілярів у вузол, який занурений у досліджувану рідину на довільну глибину: двох

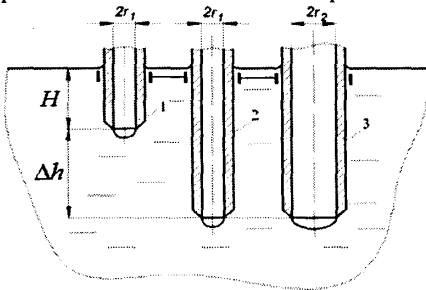


Рис. 1. Схема розміщення трьох капілярів у вузол

капілярах, що мають однаковий внутрішній радіус  $r_1$ , але розташованих на різних глибинах занурення  $\Delta h$  та третього капіляру, що має інший радіус  $r_2$ , проте розташований на тій ж глибині занурення, що і другий капіляр (рис.1).

Цей метод дозволяє визначити ПН рідини  $\sigma$ , базуючись лише на вимірюванні максимальних тисків у трьох капілярах при відомих радіусах їх вихідних отворів, за такою залежністю:

$$\sigma = \frac{P_{\max 3} - P_{\max 2} - (P_{\max 2} - P_{\max 1})(z_{02} - z_{01})/\Delta h}{2(1/R_{02} - 1/R_{01})}, \quad (8)$$

де  $P_{\max 1}$ ,  $P_{\max 2}$ ,  $P_{\max 3}$  – значення максимальних тисків у бульбашці для 1-го капіляру, 2-го і 3-го капілярів, відповідно;  $\Delta h$  – строго фіксована віддал між торцями 2-го і 3-го капілярів, які опускаються на довільну, але однакову глибину, і 1-го капіляру;  $R_{01} = a \cdot f_2(r_1/a)$ ,  $R_{02} = a \cdot f_2(r_2/a)$ ,  $z_{01} = a \cdot f_3(r_1/a)$ ,  $z_{02} = a \cdot f_3(r_2/a)$ .

Пневматична схема трикапілярного пристрою, який реалізує запропонований метод, представлена на рис. 2, з якого видно, що крім суми «лапласового» та гідростатичного тисків на меніск виміряні значення максимального тиску для кожного із трьох капілярів включають складову додаткового перепаду тиску, який виникає тому, що максимальний тиск вимірюється не на торці вимірювального капіляра, тобто у бульбашці, а у деякій точці вимірювальної схеми пристрою, причому ділянка між цією точкою та бульбашкою має певний пневматичний опір, що викликає додатковий перепад тиску газу. З метою урахування цієї складової розроблена *методика урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми пристрою на вимірюваний максимальний тиск у бульбашці*.

Суть цієї методики полягає у наступному. Перед дослідженням ПН рідини автоматизовано шляхом відповідної комутації газового потоку у пристрої визначають значення пневматичних опорів  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  ділянок трьох вимірювальних капілярів від давача тиску Д1 до нижніх торців цих капілярів та пневматичного опору  $R_3$  змінного дроселя Д32 (рис. 2). Тоді виміряні давачем Д1 у моменти максимальних тисків у бульбашках значення тисків  $P_{\max 1 \text{ вим.}}$ ,  $P_{\max 2 \text{ вим.}}$ ,  $P_{\max 3 \text{ вим.}}$  у вимірювальній камері пристрою та давачем Д2 значення перепадів тиску  $\Delta P_{R11}$ ,  $\Delta P_{R12}$ ,  $\Delta P_{R13}$  через протічний капіляр ДП1 з внутрішнім радіусом  $r_0$  та довжиною  $l_0$  дозволяють визначити значення  $P_{\max 1}$ ,  $P_{\max 2}$  та  $P_{\max 3}$  з урахуванням відповідних додаткових перепадів тисків наступним чином:

$$P_{\max 1} = P_{\max 1 \text{ вим.}} - R_4 \left( \frac{\Delta P_{R11} \cdot \pi r_0^4}{8 l_0 \eta} - \frac{P_{\max 1 \text{ вим.}}}{R_3} \right), \quad (9)$$

$$P_{\max 2} = P_{\max 2 \text{ вим.}} - R_5 \left( \frac{\Delta P_{R12} \cdot \pi r_0^4}{8 l_0 \eta} - \frac{P_{\max 2 \text{ вим.}}}{R_3} \right), \quad (10)$$

$$P_{\max 3} = P_{\max 3 \text{ вим.}} - R_6 \left( \frac{\Delta P_{R13} \cdot \pi r_0^4}{8 l_0 \eta} - \frac{P_{\max 3 \text{ вим.}}}{R_3} \right), \quad (11)$$

де  $\eta$  – кінематична в'язкість газу (повітря) у вимірювальній камері пристрою, яка є функцією його температури  $T$ , котра вимірюється давачем температури Т2.

Для визначення моментів досягнення максимальних тисків у процесі їх

вимірювання для кожного із трьох капілярів, а також часових параметрів ДПН рідин і розчинів ПАР розроблено процедуру, яка базується на застосуванні математичного згладжуючого фільтра Савицького – Голя 2-го порядку для оброблення часової залежності тиску газу у вимірювальній камері пристрою або перепаду тиску газу через протічний капіляр ДП1. При реалізації цієї процедури масив значень тиску у вимірювальній камері пристрою, або перепаду тиску через ДП1 у реальному часі неперервно проходить через програмний фільтр Савицького – Голя. Тоді за піком різкого зростання профільшованої кривої тиску газу (рис. 3, а), або різкого падіння профільшованої кривої перепаду тиску газу (рис. 3, б) можна чітко визначити момент максимального тиску. Ці піки суттєво перевищують амплітуду шкідливих вібраційних коливань тиску газу через вплив компресора чи шуму вимірювальної системи пристрою, що дозволяє точно визначити момент настання максимального тиску у процесі вимірювання.

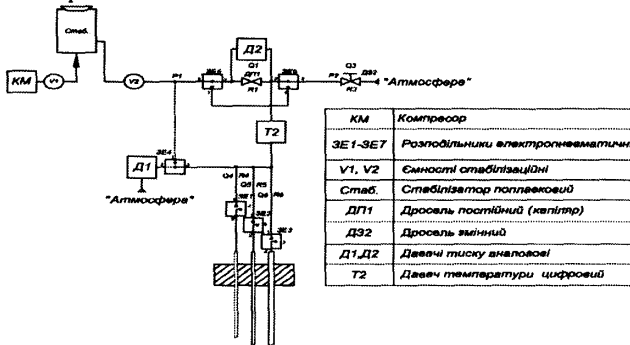


Рис. 2. Пневматична схема пристрою, який реалізує запропонований ітераційний метод визначення ПН рідин за допомогою трьох капілярів

Мінімальне значення тиску визначається на основі аналізу кожної точки нефільтрованої кривої тиску газу у вимірювальній камері пристрою. На основі знайденої пари «мінімум-максимум» визначаються значення максимального тиску  $P_{max}$  з урахуванням додаткового перепаду тиску, час існування поверхні меніска  $t_1$  і період між бульбашками  $t_6$ .

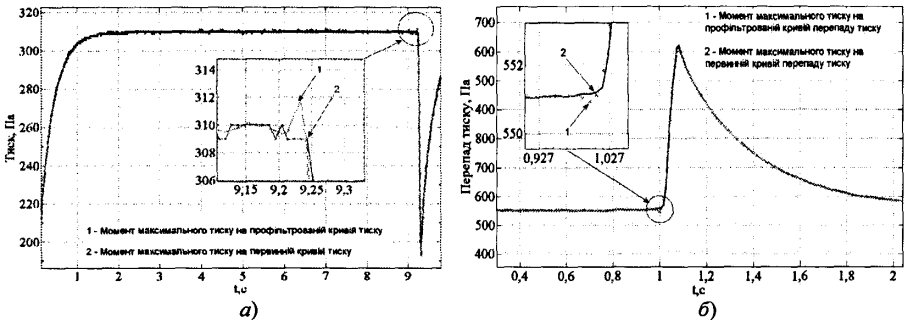


Рис. 3. Визначення моменту максимального тиску на основі кривої тиску (а) або перепаду тиску газу (б) за допомогою згладжуючого фільтра Савицького – Голя

Значення  $P_{\max}$ ,  $t_1$  та  $t_b$ , які отримані для заданого тиску газу у вимірювальній камері пристрою і відповідного капіляра, статистично обробляються за наступною запропонованою процедурою. Всі значення, які входять в установлені допустимі інтервали по величині тиску газу і часу існування поверхні меніска арифметично усереднюються, а із зростанням їх кількості збільшується показник відтворення отриманої групи усереднених параметрів. Вимірювання максимального тиску для заданого тиску у камері та відповідного вимірювального капіляра проводиться до одержання заданого значення показника відтворення  $N$  (при  $N \geq 4$ ) для такого усередненого набору  $P_{\max}$ ,  $t_1$ ,  $t_d$  та  $t_b$ , де  $t_d$  – час схлопування бульбашки ( $t_d = t_b - t_1$ ), що забезпечує мінімальну випадкову похибку визначення  $P_{\max}$ . До результатів вимірювання включається усереднений набір  $P_{\max}$ ,  $t_1$ ,  $t_d$  та  $t_b$  з максимальним показником відтворення  $N$ .

Запропонований ітераційний метод визначення ПН рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів не може бути використаний для дослідження ДПН розчинів ПАР у часовому діапазоні часу існування поверхні меніска  $t_1$ , у якому не виконується умова рівності значень ДПН для капілярів з різними радіусами для одного і того ж значення  $t_1$ , тобто у так званому короткому діапазоні часу існування меніска. Тому для визначення ДПН рідин і розчинів ПАР, в т.ч. у короткому діапазоні, розроблений метод із застосуванням трьох капілярів, який також не потребує попереднього вимірювання  $\Delta r$  та встановлення  $H$ . Для його реалізації пропонується використовувати ту ж пневматичну схему пристрою, що і для попереднього методу. У вимірювальній камері такого пристрою спочатку встановлюють найбільший робочий тиск газу при закритих вимірювальних капілярах. Для цього заданого значення тиску газу у реальному часі по чергово вимірюють часові залежності тиску газу у вимірювальній камері та перепаду тиску газу через протічний капіляр ДПН для кожного із трьох капілярів. На їх основі за вище описаною методикою визначаються усереднені значення максимальних тисків  $P_{\max}$  та часові параметри ДПН  $t_1$ ,  $t_d$  та  $t_b$  для кожного із трьох капілярів. Після цього у вимірювальній камері пристрою встановлюється менший заданий тиск і описана процедура повторюється. Крок між значеннями встановленого тиску у камері встановлюється на основі значення  $t_1$  попередньої точки визначеного  $P_{\max}$ , а саме: чим більший  $t_1$ , тим менший крок. Це дозволяє отримати оптимальні криві залежностей максимальних тисків від часу існування поверхні меніска для кожного із трьох капілярів  $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$  (рис. 4).

Процес вимірювання триває до досягнення рівноважних максимальних тисків для кожного із трьох капілярів. Момент рівноважного максимального тиску для відповідного капіляра досягається тоді, коли відношення  $\Delta P_{\max} / \Delta t_1$  прямує до нуля, або за відсутності появи бульбашок за заданий час очікування. Значення максимальних тисків на кривих  $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$  для кожного капіляра інтерполюють. Це дозволяє визначити проміжні значення  $P_{\max}$  і, відповідно, ДПН рідини  $\sigma$  та  $t_1$ , а також отримати рівноважні значення максимальних тисків для кожного із трьох капілярів при однаковому значенні  $t_1$ .

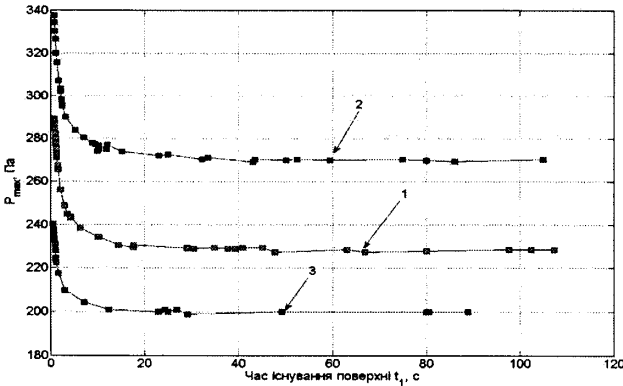


Рис. 4. Значення максимальних тисків для трьох капілярів, рідина: 0,1% водний розчин тінолу;  
1 – капіляр 1; 2 – капіляр 2; 3 – капіляр 3

Оскільки три капіляри зафіксовані у вузол, то, віднявши  $\Delta h$ , одержують глибину занурення першого капіляра. Визначені значення  $\Delta p$  та глибини занурення першого  $H - \Delta h$ , другого і третього капілярів  $H$  дозволяють згідно (7) перерахувати криві  $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_s)$  для трьох капілярів із різними радіусами та глибинами занурення у відповідні залежності ДПН рідини  $\sigma = f(\Delta t_s)$  (рис. 5).

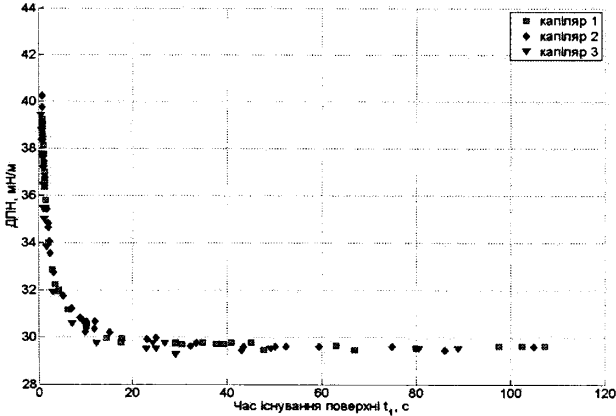


Рис. 5. Значення ДПН 0,1% водного розчину тінолу при 18°C

Тоді на основі рівноважних значень максимальних тисків для кожного із трьох капілярів згідно (8) визначають РПН рідини  $\sigma_{\text{рівн}}$ . Значення  $\Delta p$ , яке визначається так:

$$\Delta p = (P_{\max 2} - P_{\max 1}) / \Delta h g,$$

рівноважного максимального тиску  $P_{\max 3 \text{ рівн}}$  для третього капіляра та РПН  $\sigma_{\text{рівн}}$  дозволяють ітераційним методом із залежності (7) розрахувати глибину занурення другого та третього капілярів.

Для аналізу явища різних значень ДПН розчинів ПАР у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні менісків для капілярів з різними радіусами, а, відповідно, і різними площами поверхонь менісків та об'ємами бульбашок розраховані залежності площі поверхні меніска  $A$  та об'єму бульбашки  $V$  у момент максимального тиску у ній:

$$\frac{A}{r^2} = \sum_{i=0}^9 D_i \left( \frac{\sigma}{r P_{\max}} \right)^i, \quad (11)$$

де  $D_0 = 9,911362$ ;  $D_1 = -3,248420$ ;  $D_2 = -0,914388$ ;  $D_3 = 2,097048$ ;  $D_4 = 0,233596$ ;  $D_5 = -1,126647$ ;  $D_6 = -0,0748275$ ;  $D_7 = 0,359625$ ;  $D_8 = 0,008693$ ;  $D_9 = -0,04478$ ;

$$\frac{V}{r^3} = \sum_{i=0}^9 E_i \left( \frac{\sigma}{r P_{\max}} \right)^i, \quad (12)$$

де  $E_0 = 3,910177$ ;  $E_1 = -1,606965$ ;  $E_2 = -0,54791$ ;  $E_3 = 1,152591$ ;  $E_4 = 0,128683$ ;  $E_5 = -0,625201$ ;  $E_6 = -0,03478$ ;  $E_7 = 0,19775$ ;  $E_8 = 0,002954$ ;  $E_9 = -0,024110$ .

Отримані криві ДПН рідини  $\sigma = f(\Delta t_1)$ , площі поверхні меніска і об'єми бульбашок у момент максимального тиску у них дозволяють обґрунтувати різні значення ДПН розчинів ПАР у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска з використанням капілярів з різними радіусами, а також розрахувати залежність ДПН рідин і розчинів ПАР від ефективного часу адсорбції. Це також дозволить порівнювати результати досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці з іншими методами дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

Для визначення ПН рідин і розчинів ПАР за допомогою розроблених методів необхідно попередньо визначити внутрішні радіуси кромки вихідних отворів трьох вимірювальних капілярів. З цією метою розроблено *методику визначення їх радіусів за вимірними максимальними тисками у бульбашках*, яка дозволяє визначити радіуси  $r_1$  та  $r_2$  кромки вимірювальних капілярів, на яких відбувається досягнення максимальних тисків у бульбашках. Реалізація запропонованої методики включає два етапи. На першому етапі посудину з еталонною рідиною з відомими ПН  $\sigma_{zp}$  та різницею густин цієї рідини та газу  $\Delta\rho_{zp}$  (в якості рідини пропонується використовувати дистильовану воду при нормальних умовах) повільно піднімають до дотику першого капіляра з поверхнею рідини. Тоді за описаною вище методикою визначають моменти та значення максимальних тисків для другого та третього капілярів  $P_{\max 2}$ ,  $P_{\max 3}$ , відповідно. На другому етапі ці капіляри занурюють на довільну глибину і визначають максимальні тиски для першого  $P'_{\max 1}$  та другого капілярів  $P'_{\max 2}$ , відповідно. На основі отриманих значень  $P'_{\max 1}$  та  $P'_{\max 2}$  при відомій  $\Delta\rho_{zp}$ , або шляхом прямого вимірювання, визначають  $\Delta h$ . Значення  $\Delta h$  буде глибиною занурення для другого та третього капілярів на першому етапі. Тоді на основі  $P_{\max 2}$ ,  $\Delta\rho_{zp}$ ,  $\sigma_{zp}$ , глибини занурення  $H$  другого та третього капілярів ітераційним методом із залежності (7) визначають значення радіусів  $r_1$  вихідних кромки першого та другого капілярів, на яких виникає максимальний тиск у бульбашках. Аналогічно на основі  $P_{\max 3}$ ,  $\Delta\rho_{zp}$ ,  $\sigma_{zp}$  та  $\Delta h$  визначають радіус третього капіляру  $r_2$ .

У **третньому розділі** основна увага приділена встановленню вимог до пристрою з метою практичної реалізації ним запропонованих методів та опису розробленого та виготовленого трикапілярного пристрою для автоматизованого дослідження ПН рідин та розчинів ПАР.

*Структурна схема трикапілярного пристрою* (рис. 6) включає: джерело газу 1, блок стабілізації тиску газу 2, блок вимірювання витрати газу 3, вимірювальну камеру 4, блок регулювання тиску газу 5, блок вимірювання температури газу 6, вузол вимірювальних капілярів 7, термостабілізовану посудину з блоком вимірювання та встановлення температури рідини 8, блок електропневматичних

розподільників 9, блок керування і оброблення даних 10, блок керування кроковим двигуном, електропневматичними розподільниками, елементами нагрівання і охолодження досліджуваної рідини 11, давач тиску газу Д1 у вимірювальній камері пристрою 12, давач перепаду тиску газу Д2 13, блок живлення елементів нагрівання та охолодження досліджуваної рідини і рідкокристалічного дисплею 14, рідкокристалічний дисплей 15 та персональний комп'ютер (ПК) 16.

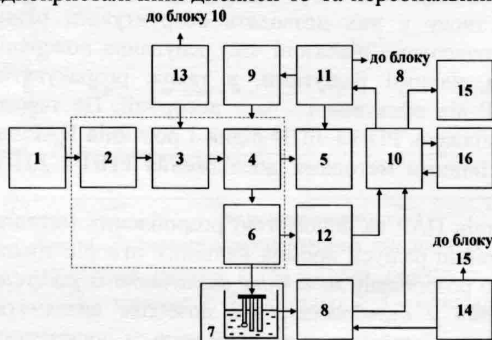


Рис. 6. Структурна схема трикапілярного пристрою для автоматизованого дослідження РПН рідин і розчинів ПАР

даних від давачів тиску та температури, їх передачу до ПК, а також виконання команд від ПК. Програмне забезпечення для ПК забезпечує процес дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР в автоматизованому режимі, а саме програмну реалізацію усіх розроблених методів та процедур.

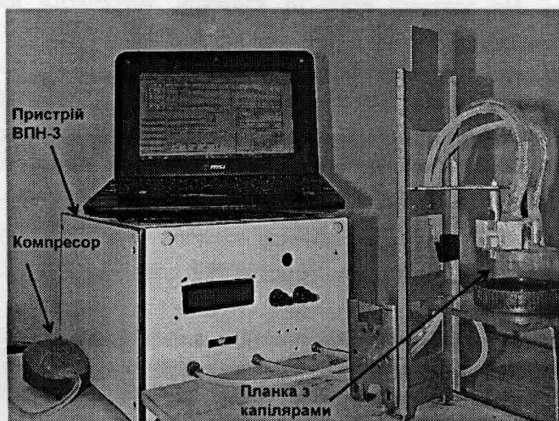


Рис. 7. Макет трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР

досліджувану рідину; автоматизоване вимірювання залежностей максимальних тисків від часу існування поверхні меніска для кожного із трьох капілярів і визначення на їх основі РПН і ДПН рідини чи розчину ПАР.

Алгоритм роботи трикапілярного пристрою реалізується розробленим програмним забезпеченням, яке складається з програмного коду мікроконтролера ADUC834, на якому базується робота блоку керування і оброблення даних, та програмного комплексу на ПК. Програмний код для мікроконтролера ADUC834, який розроблений на мовах програмування «Embedded C» і «Assambler», забезпечує керування усіма вузлами трикапілярного пристрою, первинне оброблення

Процедура автоматизованого дослідження РПН і ДПН рідини трикапілярним пристроєм (макет, якого представлений на рис. 7) включає такі етапи: запуск і налаштування трикапілярного пристрою; автоматизоване визначення пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми пристрою та їх порівняння з раніше визначеними їх номінальними значеннями з метою діагностики пристрою; занурення капілярів на достатню глибину у



У четвертому розділі представлено результати метрологічного аналізу розроблених методів та трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин і розчинів ПАР, у якому здійснено аналіз інструментальних та методичних складових сумарної похибки визначення ним ПН рідин і розчинів ПАР.

З'ясовано, що основний вклад у сумарну похибку визначення ПН рідин і розчинів ПАР вносять похибки визначення максимальних тисків для трьох капілярів, а також радіусів їх вихідних отворів, що підтверджує обґрунтованість застосування запропонованих методик, які підвищують точність визначення максимальних тисків та радіусів цих капілярів. Показано, що довірча гранична

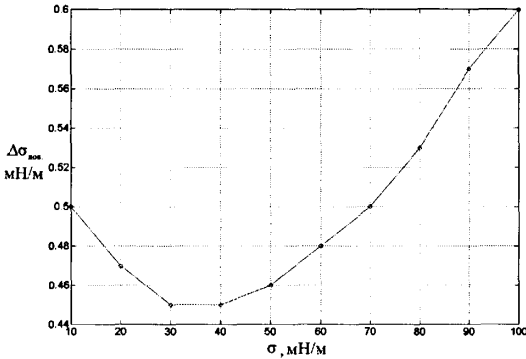


Рис. 8. Залежність  $\Delta\sigma_{\text{доп}}$  від ПН рідини

похибка визначення трикапілярним пристроєм ПН рідин і розчинів ПАР, приймаючи найгірший випадок розподілу її складових, знаходиться в інтервалі  $0,45 \div 0,6$  мН/м для значень ПН у діапазоні  $10 \div 100$  мН/м (рис. 8).

Підготовлено проект методики перевірки трикапілярного пристрою, яка базується на вимірюванні ПН еталонних рідин, які відповідають ДСТУ ГОСТ 8.428:2009, на довільних глибинах занурення вимірювальних капілярів у ці рідини.

У п'ятому розділі описано розроблену процедуру проведення лабораторних випробувань трикапілярного пристрою, результати його лабораторних та натурних випробувань, а також висновки, які були отримані при їх аналізі. З метою лабораторних випробувань трикапілярного пристрою були проведені дослідження ПН водних розчинів тіполу та етанолу з різною їх концентрацією, а також водних розчинів NaCl з різною густиною. З метою натурних випробувань цього пристрою було досліджено ПН промислових водних розчинів ПАР «ВУК LPD 6296» з різною концентрацією (використовуються ТзОВ «Вінісін» при виробництві лінолеуму), водного розчину «WG 15SAA/1», який застосовується в якості комплексної добавки для струменевої цементації, а також БР людського організму.

Отримані результати лабораторних та натурних випробувань макету трикапілярного пристрою свідчать про те, що дійсна похибка визначення ПН рідин і розчинів ПАР знаходиться у межах розрахованої граничної похибки пристрою для відповідних значень ПН рідин і не перевищує 0,5 мН/м.

У додатках наведено програмний код для розрахунку геометричних параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці та його результати, програми для визначення ПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням одного і трьох вимірювальних капілярів, програмні коди для визначення моментів максимальних тисків та часових параметрів ДПН рідин і розчинів ПАР і їх статистичного оброблення. Представлено програми для визначення радіусів капілярів та розрахунку граничної похибки визначення трикапілярним пристроєм ПН рідин. Крім того, наведено програмні коди для мікроконтролера та ПК, які реалізують

автоматизоване дослідження трикапілярним пристроєм РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР та проект методики повірки цього пристрою.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна задача, яка полягає в розробленні удосконалених методів підвищення точності результатів досліджень РПН і ДПН однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР та БР людського організму, а також трикапілярного пристрою для реалізації цих методів, який дозволяє автоматизовано здійснювати дослідження РПН і ДПН таких рідин у діапазоні часу існування розділу фаз від 0,1 с до 50000 с без попереднього визначення густини таких рідин і глибин занурення капілярів у досліджувану рідину. В результаті проведеної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Здійснено аналіз відомих методів досліджень РПН і ДПН рідин за максимальним тиском у бульбашці та приладів на їх основі з використанням одного вимірювального капіляру і двох капілярів з різними радіусами вихідних отворів, що дозволило виявити їх основні недоліки, які впливають на точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

2. Вперше розроблено методику фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска, що дозволило врахувати несферичність меніска у цей момент, підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, а також визначити геометричні параметри меніска у момент максимального тиску у бульбашці.

3. Вперше розроблено ітераційну методику визначення ПН рідин із застосуванням трьох капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, що утворюються з цих капілярів, яка не вимагає попереднього визначення густини досліджуваної рідини та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину у цю рідину. Це дозволило розробити удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

4. Вперше розроблено процедуру визначення моменту максимального тиску у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького – Голя другого порядку, що дозволило підвищити точність вимірювання максимального тиску, а відповідно і точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

5. Розроблено методику урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, що утворюються із трьох капілярів, а також методику визначення радіусів цих капілярів, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

6. Розроблено структурну, функціональну, пневматичну, електричну схеми, конструкцію трикапілярного пристрою та програмне забезпечення для мікроконтролера і ПК, а також виготовлено цей пристрій, що реалізує розроблені методи підвищення точності результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

7. Здійснено метрологічний аналіз розроблених методів визначення РПН і ДПН

рідин і розчинів ПАР та трикапілярного пристрою, що реалізує ці методи. Показано, що довірча гранична похибка визначення ПН рідини нелінійно залежить від його значення та знаходиться в інтервалі  $0,45 \div 0,6$  мН/м для значень ПН у діапазоні  $10 \div 100$  мН/м, а також розроблено проект методики перевірки трикапілярного пристрою.

8. Проведені лабораторні та натурні випробування макету трикапілярного пристрою, які підтвердили працездатність розроблених методів, а також показали, що дійсна максимальна похибка визначення ПН рідин і розчинів ПАР цими методами знаходиться у межах розрахованої граничної похибки та становить  $0,5$  мН/м.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кісіль І. С. Удосконалена методика і прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / І. С. Кісіль, А. В. Кулиняк, Ю. М. Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – №17. – С. 45–50.

2. Кучірка Ю. М. Удосконалений пристрій для вимірювання поверхневого натягу на межі контакту рідина–повітря [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль, А. В. Кулиняк // Матеріали шостої науково–технічної конференції «Приладобудування – 2007: стан і перспективи». – К.: – 2007. – С. 186–188.

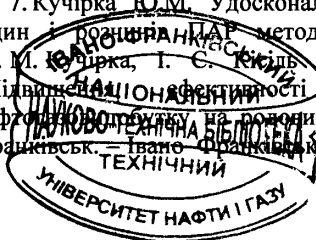
3. Кучірка Ю. М. Удосконалена методика та прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали V Міжнародної науково–технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 2–5 грудня 2008 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – С. 202–205.

4. Кучірка Ю. М. Вимірювання динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево–активних речовин на межі їх розділу з газом [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи», 20–23 жовтня 2009 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – С. 125–127.

5. Кісіль І. С. Удосконалений прилад для дослідження динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево–активних речовин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / І. С. Кісіль, Ю. М. Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – №23. – С. 60–65.

6. Пат. 89128 Україна, МПК (2009): G01N 13/00. Спосіб вимірювання поверхневого натягу рідин [Текст] / І. С. Кісіль, Р. І. Кісіль, Ю. М. Кучірка; заявник і патентовласник Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу.–а200807743; заявл. 06.06.2008; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24, 2009 р.

7. Кучірка Ю. М. Удосконалення методики вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Тези доповідей науково–технічної конференції «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазової продукції на родовищах України», 16–18 листопада 2010 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – С. 187–191.



8. Кучірка Ю. М. Удосконалення методики визначення поверхневого натягу рідин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали дев'ятої науково-технічної конференції «Приладобудування – 2010: стан і перспективи». – К.: – 2010. – С. 134-136.

9. Пат. 92867 Україна, МПК (2009): G01N 13/00. Спосіб вимірювання динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево-активних речовин [Текст] / І. С. Кісіль, Р. І. Кісіль, Ю. М. Кучірка; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.–а200910440; заявл. 15.10.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 11, 2010 р.

10. Малько А.О. Розроблення методики метрологічної атестації стандартних градувальних характеристик концентрації поверхнево-активних речовин у воді за значеннями їх рівноважного поверхневого натягу [Текст] / А. О. Малько, О. Б. Барна, Ю. М. Кучірка // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія і вимірювальна техніка», 9–11 жовтня 2012 р., м. Харків.– С. 152.

11. Кучірка Ю. М. Удосконалена методика та прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 29 листопада – 2 грудня 2011р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – С. 220–223.

12. Кучірка Ю.М. Удосконалена методика вимірювання динамічного поверхневого натягу поверхнево-активних речовин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю.М.Кучірка, І.С.Кісіль, Б.В.Костів // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – №27. – С. 48–51.

13. Kuchirka Y. M. Technique improvement of measurement of surface tension of surfactants solutions by maximum bubble pressure method [Text] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль, Ф. Рейндерс // Матеріали першої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні тенденції розвитку приладобудування», 19–20 листопада 2012 р., м. Луганськ.– С. 45.

14. Kisil I.G. Improvement of technique of measurement of surface tension of surfactants solutions by maximum bubble pressure method [Text] / I.G. Kisil, Y. M. Kuchirka, O. I. Osmolovskyi // Proceedings «The fifth world congress «Aviation in the XXI-st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27 September 2012, Kyiv.– P. 1.9.29–1.9.32.

15. Кучірка Ю.М. Удосконалені методи підвищення точності результатів дослідження поверхневого натягу рідин та пристрій для їх реалізації [Текст] / Ю. М. Кучірка // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2013. – № 1. – С. 58–63.

16. Кучірка Ю. М. Удосконалення методики вимірювання поверхневого натягу розчинів ПАР методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали одинадцятої Міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2012)», 9–11 жовтня 2012 р., м. Вінниця. – С. 37.

17. Кісіль І.С. Підвищення точності розрахунку геометричних розмірів газового

пухирця в момент максимального тиску в ньому [Текст] / І.С.Кісіль, Ю.М.Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – №20. – С.30–35.

18. Кісіль І.С. Метрологічний аналіз методик вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в бульбашці [Текст] / І.С.Кісіль, Ю.М.Кучірка, Р.І.Кісіль // Науковий вісник Івано–Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – №1(23). – С. 178–185.

### АНОТАЦІЯ

**Кучірка Ю.М. Удосконалені методи підвищення точності результатів дослідження поверхневого натягу рідин та пристрій для їх реалізації. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого звання кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано–Франківськ, 2013.

Дисертація присвячена дослідженню і розробленню удосконалених методів для дослідження ПН рідин та розчинів ПАР на межі контакту рідина - газ.

Проаналізовано відомі методи і прилади для вимірювання ПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці, внаслідок чого визначено їхні недоліки.

Представлено удосконалені методи, що враховують несферичність меніска у момент максимального тиску у бульбашці, і не потребують попереднього визначення густини рідини та прецизійної системи занурення капілярів на певну глибину цієї рідини, а також пристрій з їх реалізації, який дозволяє автоматизовано досліджувати РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів за максимальними тисками у бульбашках, які утворюються на їх нижніх торцях.

**Ключові слова:** дослідження, динамічний поверхневий натяг, рівноважний поверхневий натяг, метод максимального тиску у бульбашці.

### АННОТАЦИЯ

**Кучирка Ю.М. Усовершенствованные методы повышения точности результатов исследования поверхностного натяжения жидкостей и устройство для их реализации. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13. – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано - Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2013.

Диссертация посвящена разработке усовершенствованных методов и устройства по их реализации для автоматизированного исследования поверхностного натяжения (ПН) жидкостей и растворов ПАВ на границе жидкость – газ с использованием трех зафиксированных между собой капилляров с различными внутренними радиусами и расстоянием между их нижними торцами.

В первом разделе осуществлена оценка экспериментальных условий проведения исследования ПН однокомпонентных жидкостей, промышленных растворов ПАВ и биологических жидкостей человека, проанализированы известные методы и приборы для измерения ПН жидкостей и растворов ПАВ за максимальным

давлением в пузырьке. Определены их недостатки, сформулированы задачи и направления по их усовершенствованию.

Во втором разделе представлены усовершенствованные методы определения равновесного (РПН) и динамического (ДПН) ПН жидкостей и растворов ПАВ, учитывающие отклонения поверхности мениска от полусферической формы в момент максимального давления в пузырьке, которые не требуют предварительного определения плотности жидкости и прецизионной системы погружения капилляров на заданную глубину жидкости, а также методики, которые повышают точность определения РПН и ДПН жидкостей и растворов ПАВ.

В третьем разделе описаны требования к устройству с целью реализации им разработанных методов определения ПН жидкостей и растворов ПАВ, а также структурная, функциональная, электрическая, пневматическая схемы, конструкция и программное обеспечение трикапиллярного устройства для автоматизированного исследования РПН и ДПН жидкостей и растворов ПАВ.

Четвертый раздел посвящен метрологическому анализу погрешностей предложенных методов определения РПН и ДПН жидкостей и растворов ПАВ, а также трикапиллярного устройства. Показано, что граничная погрешность определения этим устройством РПН и ДПН жидкостей и растворов ПАВ составит  $0,45 \div 0,6$  мН/м для значений ПН в интервале от 10 до 100 мН/м.

В пятом разделе разработана процедура проведения лабораторных испытаний трикапиллярного устройства, приведены результаты лабораторных и натуральных испытаний, а также выводы, которые были получены при их анализе.

**Ключевые слова:** исследование, динамическое поверхностное натяжение, равновесное поверхностное натяжение, три капилляры, метод максимального давления в пузырьке.

## ANNOTATION

**Kuchirka Y.M. Improved methods for improving the accuracy of the research results of the surface tension of liquids and device for its implementation. – The manuscript.**

Dissertation on competition of scientific degree of the candidate of engineering science at specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and material composition determination. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

Dissertation is dedicated to research and development of measurement of surface tension at the boundary of contact of fluid and gas and the device, that realizes developed improved methods by using of maximum pressure in the bubble. The known methods of measuring of surface tension of fluids and surfactants solutions by using of maximum pressure in the bubble are analyzed, their merits and demerits are determined.

Presented improved methods that take into account deviations from hemispherical surface meniscus forms at the moment of the maximum pressure in the bubble and do not require prior density measurement of liquids and precision system for capillary immersion at a certain depth of fluid and the device with their implementation, allowing automatically investigate surface tension liquids by using of maximum pressure in the bubble.

**Keywords:** research, dynamic surface tension, equilibrium surface tension, three capillaries, the method of maximum pressure in the bubble.