

532.6
Б25

Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

БАРНА ОЛЬГА БОРИСІВНА



УДК 532.6(043)
Б25

**УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОД РОЗГОРНУТОГО МЕНІСКА ТА ПРИЛАД ДЛЯ
КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА МЕЖАХ РОЗДІЛУ ФАЗ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2014

Дисертацією є рукопис.

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



Науковий керівник:

Лауреат Державної премії України,
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 технічних наук, професор
Древецький Володимир Володимирович
Національний університет водного господарства та природокористування МОН України, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій м. Рівне

Кандидат технічних наук, доцент
Городецька Оксана Степанівна
Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, м. Вінниця.

Захист відбудеться «30» жовтня 2014р. об 11⁰⁰ 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 бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15).

Автореферат розісланий «18» вересня 2014р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, професор

 Дранчук М.М.

**ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**-----
теми.

Поверхневі властивості на межах розділу різних фаз (тверде тіло, рідина, газ) відіграють важливу роль у поведінці систем, де мають місце ці межі розділу. Саме через них відбувається взаємодія різних фаз між собою, у результаті чого досягають бажаного ефекту від цієї взаємодії. Вплинути на поверхневі властивості на межах розділу різних фаз з метою досягнення необхідного ефекту можна за допомогою поверхнево-активних речовин (ПАР).

На даний час ПАР використовують практично в усіх галузях народного господарства. Особливістю при цьому є те, що невелика їх кількість у розчині має здатність впливати на процес взаємодії контактуючих фаз. Завдяки цьому можливе використання їх як миючих засобів, допоміжних речовин в технологічних процесах флотації руд, нафтогазовидобутку, при бурінні свердловин, а також при виробництві штучних волокон, каучуку, пластмас, як піноутворювачі, стабілізатори емульсій, деемульгатори, антистатики, інгібітори корозії тощо.

Тому для кожного із технологічних процесів, де мають місце відповідні технологічні рідини і де передбачається використання ПАР, актуальною задачею є вибір типу ПАР, основи його розчину і концентрації в ньому ПАР з урахуванням характерних особливостей і умов таких технологічних процесів. Одними із найбільш визначальних параметрів, що характеризують якість підібраних ПАР у розчині, є поверхневий натяг (ПН) та крайовий кут змочування (ККЗ) на межі розділу фаз розчин ПАР–повітря–тверде тіло. Вимірювання ПН досліджуваного розчину ПАР дозволяє на основі отриманих результатів здійснювати оптимальний підбір ПАР і його концентрації у розчинах з урахуванням особливостей технологічного процесу.

Одними з найбільш розповсюджених сучасних методів вимірювання поверхневих властивостей рідин та розчинів ПАР є методи дослідження та аналізу форми криволінійних поверхонь розділу фаз (висячої краплі, розгорнутого меніска, лежачої краплі тощо). Значну увагу розробленню різних модифікацій цих методів, їх удосконаленню та розробленню приладів для вимірювання поверхневого натягу на їх основі приділяли і приділяють А.В. Нейман, Р. Міллер, В.Б. Файнерман, А.М. Макієвські, І.С. Кісіль, Й.Й. Білинський та інші. Тим не менше підвищення точності отриманих результатів при дослідженні поверхневих властивостей, підвищення надійності роботи приладів для вимірювання ПН та ККЗ, а також розширення їх можливостей є і надалі актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких знайшли відображення у дисертаційній роботі, виконувались здобувачем відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі методів контролю якості і сертифікації продукції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичного плану виконання науково-дослідної держбюджетної теми Д6-10П "Нові технології видобування вуглеводнів із родовищ з важковилучуваними запасами" (РК 0110U000116), та держбюджетної теми ІФНТУНГ Д17-12-П "Розроблення новітніх методів і систем експрес контролю

наявності поверхнево – активних речовин у стічних водах, водоймищах і річках" (РК 0109U008878), де автор була виконавцем розділів, пов'язаних із розробленням методів і засобів для вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз рідина – газ, контролю концентрації ПАР у стічних водах, водоймищах і річках удосконаленим методом.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення удосконалених методу розгорнутого меніска та приладу для підвищення точності результатів контролю поверхневих властивостей на межах розділу рідина – повітря – тверде тіло.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз відомих методів контролю ПН і ККЗ рідин і розчинів ПАР за допомогою дослідження форми менісків та їх технічних реалізацій, зокрема, провести порівняльний аналіз відомих методів дослідження ПН рідин методом розгорнутого меніска і виявити шляхи удосконалення цього методу;

- розробити і дослідити модель розгорнутого меніска, виявити особливості меніска такого типу;

- розробити удосконалений метод розгорнутого меніска для контролю ПН та ККЗ розчинів ПАР із покроковою методикою визначення координат точок контуру меніска;

- розробити та виготовити прилад для контролю ПН та ККЗ рідин та водних розчинів ПАР методом розгорнутого меніска та розробити методику роботи з цим приладом;

- здійснити метрологічний аналіз розроблених удосконалених методу і приладу для контролю ПН та ККЗ рідин та водних розчинів ПАР методом розгорнутого меніска та оцінити вірогідність контролю розробленим приладом;

- провести лабораторні випробування розробленого приладу для контролю ПН та ККЗ рідин та водних розчинів ПАР методом розгорнутого меніска.

Об'єктом дослідження є процес контролю поверхневих властивостей розчинів ПАР на межах розділу фаз.

Предметом дослідження є методи та засоби аналізу форми меніска для контролю поверхневого натягу та крайового кута змочування розчинами ПАР твердих тіл.

Методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач у дисертаційній роботі використовувалися моделювання криволінійної поверхні меніска на основі теорії капілярності Лапласа, методи Рунге-Кутта розв'язку диференціальних рівнянь капілярності, методи оптимізації типу «метод золотого січення» при розробленні алгоритмів побудови теоретичного контуру межі розділу фаз. При метрологічному аналізі удосконаленого методу та розробленого приладу використовувались методи оцінювання і вираження невизначеності вимірювань, в тому числі методи математичної статистики, теорії ймовірності, методи структурного аналізу складових невизначеності. Експериментальні дослідження проводилися на основі методів цифрового оброблення отриманих експериментальних зображень розгорнутих менісків, методів виділення контурів цих менісків, теорії подібності для порівняння теоретичних і експериментальних менісків, методів числового

опрацювання результатів експериментів з використанням персональних комп'ютерів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше досліджено залежність форми профіля розгорнутого меніска від таких факторів: радіуса зануреного циліндра, ПН і ККЗ досліджуваної рідини. Це дало можливість обґрунтувати вибір радіуса стрижня та його матеріалу;

– розроблена теоретична модель розгорнутого меніска, враховуючи його розмірні координати. Це дозволило порівнювати теоретичний контур меніска із експериментальним контуром, не переводячи координати точок ні теоретичного, ні експериментального контурів у безрозмірний формат;

– вперше за результатами моделювання профілю розгорнутого меніска та меніска над стінками посудини із досліджуваною рідиною обґрунтовано вибір розмірів посудини для досліджуваної рідини, що дозволило підібрати розміри стрижнів та посудини для досліджень в залежності від радіусів використовуваних стрижнів;

– удосконалено метод розгорнутого меніска, запропоновано покроковий спосіб визначення координат точок контуру меніска. Це дало можливість збільшити кількість точок експериментального контуру розгорнутого меніска, що, в свою чергу, дозволило зменшити вплив неякісних випадкових експериментальних точок на результат контролю.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено прилад для контролю ПН та ККЗ розчинів ПАР удосконаленим методом розгорнутого меніска, за допомогою якого можна здійснювати підбір ПАР і їх концентрацій у розчинах для різних технологічних процесів;

– розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє визначати координати точок експериментального контуру розгорнутого меніска, розраховувати подібні до експериментальних контурів теоретичні контури і шляхом їх порівняння визначати значення ПН та ККЗ досліджуваних розчинів ПАР;

– наукові результати використано у навчальному процесі кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції ІФНТУНГ при проведенні науково-дослідної роботи студентами і виконанні ними курсових робіт та дипломних проєктів.

Особистий внесок здобувача.

Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків дисертаційної роботи отримані автором самостійно і стосуються здійснення моделювання, розроблення методики і установки для дослідження профілю розгорнутого меніска з метою дослідження ПН [4], методики розрахунку невизначеності виділення контуру розгорнутого меніска [5], дослідження особливостей методу розгорнутого меніска [12], методики дослідження динамічного і рівноважного ПН рідин і розчинів [13], удосконалення методу розгорнутого меніска та розробки приладу для вимірювання ПН та ККЗ [17].

У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: аналіз методів витягування різних тіл при вимірюванні ПН для оптимального вибору концентрації ПАР у розчинах [1, 10], моделювання розгорнутого циліндричного

меніска біля плоскої стінки [2], розроблення регресійної методики для контролю ПН рідин методом розгорнутого меніска [3], аналіз та розрахунок всіх складових невизначеності результатів вимірювання поверхневого натягу розробленим приладом [6], опис основних процедур для контролю міжфазного натягу розчинів ПАР на водній основі [7], аналіз існуючих методів та удосконалення методу розгорнутого меніска [8], дослідження особливостей методів та приладів вимірювання динамічного ПН рідин [9, 11, 15], використання методу розгорнутого меніска для дослідження стічних вод та природних водних середовищ на наявність поверхнево-активних речовин [14, 18, 20], розроблення окремих блоків та вузлів приладу для дослідження ПН методом розгорнутого меніска [16, 19].

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: 2-га і 4-та науково-практичні конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2009, 2013); науково-технічна конференція «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України» (Івано-Франківськ, 2010); 9-та міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2010: стан і перспективи» (Київ, 2010); 6-та міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011); 4-та науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 2011); 16-ий міжнародний молодежний форум «Радиоелектроника и молодежь в 21 веке» (Харьков, 2012); міжнародні науково-технічні конференції «Нафтогазова енергетика – 2011, 2013» (Івано-Франківськ, 2011, 2013); 7-а науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (Київ, 2011); 9-а міжнародна конференція «Стратегия качества в промышленности и образовании», спец. випуск Международного научного журнала «Acta Universitatis Pontica Euxinus» (Варна, Болгария, 2013); VIII міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія і вимірювальна техніка» (Харків, 2012).

Публікації.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 20 наукових робіт, з яких 5 статей у фахових наукових виданнях, що відповідають вимогам ДАК МОН України до публікацій результатів дисертаційних робіт (в т. ч. 1 стаття одноосібна), 2 статті у журналах, внесених до міжнародної науково-метричної бібліографічної бази Index Scopicus (в т. ч. 1 одноосібна), 1 патент України на винахід, 12 тез та матеріалів доповідей на науково-технічних конференціях (із них 7 конференцій – Міжнародні).

Обсяг та структура дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та 8 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 174 сторінки, з яких основний зміст викладено на 145 сторінках

друкованого тексту, 48 рисунках і 5 таблицях. Список використаних джерел складається із 96 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

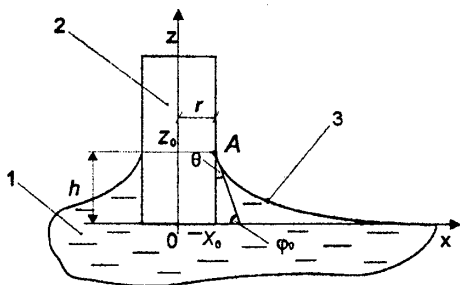
У вступі обґрунтовано актуальність обраного напрямку досліджень, сформульовано мету, завдання та методи досліджень, наведено зв'язок дисертаційної роботи з іншими науковими темами, визначено предмет та об'єкт дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача в отриманих результатах, подано інформацію про апробацію основних положень роботи та публікації автора роботи щодо результатів щодо результатів проведених досліджень.

У першому розділі проведено аналіз відомих методів контролю поверхневих властивостей (ПН та ККЗ) рідин і їх розчинів. Виявлено недоліки відомих методів при контролі поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Завдяки тому, що форма меніска рідини визначена взаємодією сил поверхневого натягу і Земного тяжіння, особливу увагу приділено дослідженню методів, основаних на аналізі форм осесиметричних менісків. Розглянуто методи витягування твердих тіл різної форми із досліджуваної рідини. Також проаналізовано методи, основані на аналізі форми розгорнутого меніска, виявлено його переваги у порівнянні із методами, основаними на аналізі згорнутих менісків – крапель. Встановлено, що перевагами методу розгорнутого меніска є можливість одночасно досліджувати як ПН досліджуваної рідини, так і ККЗ рідиною досліджуваного циліндричного стрижня, збільшення тривалості часу досліджень – до декількох годин, можливість досліджувати рідини із різною в'язкістю.

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність удосконалення методу розгорнутого меніска для дослідження поверхневих властивостей рідин, сформульовано завдання, що потребують вирішення, і обґрунтовано напрямки дисертаційних досліджень.

У другому розділі подано суть удосконаленого методу розгорнутого меніска; досліджено шляхом моделювання особливості форми розгорнутого меніска та вплив на його форму таких параметрів, як капілярна стала досліджуваної рідини, радіус зануреного циліндра, ККЗ тощо; проаналізовано вплив розмірів посудини та змочуваності її стінок досліджуваною рідиною на форму розгорнутого меніска; розроблено методика порівняння теоретичного контуру із експериментальним і критерій вибору теоретичного контуру подібного до експериментального.

Суть удосконаленого методу розгорнутого меніска полягає у наступному (рис. 1). Отримавши експериментально реальний повний чи частину профілю розгорнутого меніска, розраховують такий теоретичний контур цього меніска, який би із найменшим відхиленням відрізнявся від експериментального. В цьому випадку вважають, що фізико-хімічні параметри теоретично розрахованої межі розділу фаз (різниця густин контактуючих фаз, поверхневий натяг), які визначають капілярну сталу досліджуваної рідини на межі розділу із газовим середовищем, відповідають тим же параметрам експериментальної межі розділу фаз. Тоді, з урахуванням



1 – досліджувана рідина; 2 – тонкий циліндр, занурений у рідину; 3 – розгорнутий меніск

Рис. 1. Профіль розгорнутого меніска з лінією трифазного контакту на боковій поверхні циліндра

різниці густин контактуючих фаз і прискорення вільного падіння, отримують значення ПН.

Визначення ПН σ рідин за допомогою такої методики передбачає такі основні процедури:

– отримання в оцифрованому вигляді множини координат точок експериментального профілю розгорнутого меніска на межі розділу фаз;

– розрахунок множини теоретичних контурів профілів розгорнутих менісків на основі диференційних рівнянь, що описують профілі з урахуванням відомих фізико-хімічних та інших параметрів, що впливають на

форми цих профілів;

– розроблення критерію подібності теоретичного і експериментального профілів контурів розгорнутого меніска;

– вибір із множини отриманих теоретичних профілів такого, який найменше буде відрізнятися від експериментального згідно критерію подібності;

– оцінка точності визначення ПН на основі порівняння параметрів експериментального і теоретичного профілів контурів з урахуванням вибраного критерію подібності;

– додатковий розрахунок теоретичних контурів профілів меніска з метою досягнення заданої точності отриманого результату.

Для розрахунку теоретичних контурів розгорнутого меніска за основу були взяті диференційні рівняння, що описують форму розгорнутого меніска, утвореного навколо циліндричного стрижня, зануреного у досліджувану рідину:

$$\begin{cases} dx/d\varphi = -\cos\varphi/(z/a^2 + \sin\varphi/x), \\ dz/d\varphi = \sin\varphi/(z/a^2 + \sin\varphi/x), \end{cases} \quad (1)$$

де x , z – розмірні координати точок теоретичного контуру розгорнутого меніска; $a^2 = \sigma/\Delta\rho g$ – капілярна стала (σ – поверхневий натяг досліджуваної рідини, $\Delta\rho$ – різниця густин контактуючих фаз, g – прискорення вільного падіння); φ – кут між горизонтальною віссю та нормаллю, проведеною до контуру розгорнутого меніска в точці з координатами x , z .

Диференційні рівняння (1) не вирішуються аналітичним шляхом, а мають часткові інтеграли із врахуванням початкових умов. З метою дослідження моделі розгорнутого меніска як початкові умови задають координати точки трифазного контакту із такими параметрами: $z_0 = h$ – висота підняття меніска по поверхні стрижня, $x_0 = r$ – радіус зануреного стрижня, $\varphi_0 = 90^\circ - \theta$ – кут між дотичною до профілю меніска в т. трифазного контакту та горизонтальною віссю координат, θ –

ККЗ рідиною бічної поверхні стрижня (рис. 1). Таким чином початкові умови для початку процесу інтегрування системи (1) мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0 \dots 0 \text{ із кроком } -h_\varphi; \\ x_0 &= r; \quad z_0 = h; \\ a^2 &= \sigma / \Delta \rho g.\end{aligned}\quad (2)$$

При виборі початкових умов (2) важливе значення має вибір кроку інтегрування h_φ , оскільки це впливає на точність результатів чисельного інтегрування. З метою оптимального підбору кількості кроків інтегрування при моделюванні теоретичного контуру були розраховані похибки обмеження для координати x та для координати z при різній кількості кроків інтегрування і на основі отриманих результатів запропоновано оптимальну кількість 1000÷2000 кроків інтегрування.

Як кінцеві умови чисельного інтегрування задають $\varphi_{end} = 10^{-6}$, $z_{end} = 10^{-9}$ м. Фактично дані кінцеві умови описують область переходу криволінійної поверхні меніска у горизонтальну поверхню досліджуваної рідини.

За допомогою чисельного інтегрування диференціальних рівнянь (1) отримують множину теоретичних контурів в залежності від початкових умов (2). Для чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь використано метод Рунге-Кутта четвертого порядку.

Для визначення особливостей зміни характеристик меніска були отримані ряд контурів розгорнутого меніска в залежності від вхідних параметрів.

Одним із основних параметрів, що впливає на форму розгорнутого меніска є радіус зануреного циліндричного стрижня. При однакових значеннях капілярної

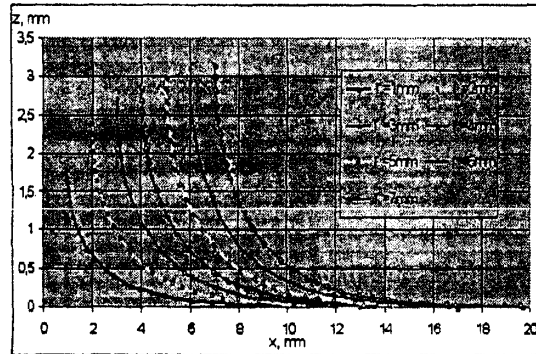


Рис. 2. Розраховані контури розгорнутих менісків при різних радіусах циліндричного стрижня, однакових значеннях кута $\varphi_0 = 90^\circ$ та капілярної сталой рідини $a^2 = 7,34 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$

сталой a^2 і ККЗ θ в залежності від радіуса циліндра r мінятимуться висота підняття меніска h і його кривизна (рис. 2).

Як видно із рис. 2 необхідно обирати такі стрижні для дослідження, для яких висота підняття меніска є співрозмірна і близька до їх радіусів (в діапазоні від 2 мм до 8 мм). При менших значеннях ККЗ досліджуваною рідиною поверхні стрижня висота підняття меніска вздовж бічної стінки стрижня збільшується. Отже для покращення отриманих зображень розгорнутого меніска рекомендовано використовувати

стержні для досліджень із малим значенням ККЗ, або збільшувати змочуваність відомими методами: нанесення шорсткості на поверхню, ретельне очищення поверхні стрижня тощо.

При моделюванні профілів розгорнутих менісків, утворених навколо занурених стрижнів із однаковими радіусами і з однаковими кутами змочування, досліджено, що висота підймання розгорнутого меніска по бічній стінці стрижня пропорційна ПН досліджуваного рідкого розчину.

При сталих радіусі зануреного стрижня та висоті підняття розгорнутого меніска було отримано ряд контурів, що зображено на рис. 3. Для побудови такого сімейства профілів було задано деякі значення кута φ_0 і відносно цих значень (при незмінних значеннях радіуса стрижня r та висоті підняття меніска h) знайдено значення ПН σ , для яких виконується умова $z \rightarrow 0$ (рис. 3). Як видно із рис. 3, у випадку однакових координат точки трифазного контакту $A(x_0, z_0)$ при більших значеннях ККЗ $\theta = 90^\circ - \varphi$ значення ПН σ також більші і навпаки.

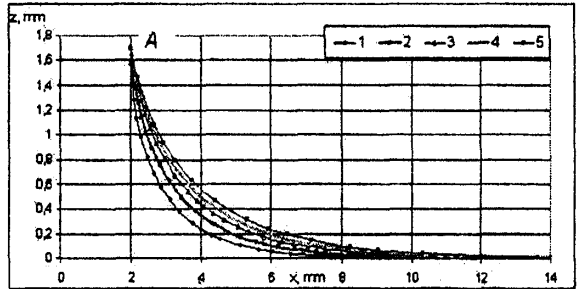
Такий варіант застосовується при підборі теоретичного профілю розгорнутого меніска, що є найбільш подібний до експериментального.

Координати початкової точки отримують із чіткої частини експериментального розгорнутого меніска, дана точка повинна бути близькою до точки трифазного контакту, але не бути нею, або методом апроксимації чітко отриманих точок експериментального розгорнутого меніска отримують координати точки трифазного контакту. Далі, почергово

змінюючи значення кута φ_0 і поверхневого і натягу σ , розраховуючи для цих значень координати точок теоретичного розгорнутого меніска і порівнюючи їх із координатами точок експериментального розгорнутого меніска ітераційним методом розраховують такий теоретичний розгорнутий меніск досліджуваної рідини, який відповідає експериментальному розгорнутому меніску.

Нами запропоновані ітераційні процедури для розрахунку координат точок теоретичних розгорнутих менісків для різних значень φ_0 і σ і порівняння цих координат із координатами точок експериментального розгорнутого меніска рідини, а також розроблені алгоритми підпрограм для ПК по виконанню вказаних процедур.

Також подано методику порівняння координат точок експериментального і теоретичного профілів розгорнутих менісків. Загальне відхилення експериментальних точок від теоретичних розраховують як середнє квадратичне відхилення E таким чином:



1 — $\varphi_0 = 90^\circ$, $\sigma = 25,35$ мН/м; 2 — $\varphi_0 = 75^\circ$,
 $\sigma = 38,30$ мН/м; 3 — $\varphi_0 = 65^\circ$, $\sigma = 54,65$ мН/м; 4 —
 $\varphi_0 = 60^\circ$, $\sigma = 67,52$ мН/м; 5 — $\varphi_0 = 55^\circ$, $\sigma = 85,86$ мН/м

Рис. 3. Теоретичні профілі менісків, побудованих із однаковими вхідними параметрами $R = 2$ мм, $h = 1,7$ мм та при різних значеннях вхідних параметрів φ_0 та σ

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_{e,i} - x_{t,i})^2 + (z_{e,i} - z_{t,i})^2]} / N, \quad (3)$$

де $x_{e,i}, z_{e,i}$ – експериментальні точки розгорнутого меніска; $x_{t,i}, z_{t,i}$ – точки теоретичного розгорнутого меніска, найближчі до відповідних експериментальних; N – кількість точок експериментального розгорнутого меніска.

Розроблена методика порівняння координат точок теоретичного розгорнутого меніска із експериментальним дозволяє здійснити підбір подібного теоретичного розгорнутого меніска до експериментального із множини розгорнутих менісків, побудованих із однієї початкової точки інтегрування.

При моделюванні розгорнутого меніска, утвореного над краями посудини із досліджуваною рідиною та дослідженні його впливу на розгорнутий меніск було запропоновано розраховувати координату z' по вертикалі спільного меніска, утвореного розгорнутим меніском навколо стрижня та меніском над краями посудини, таким чином:

$$z' = \frac{-\Delta P'}{\Delta \rho g} = -\frac{(2\sigma/b_2 + \Delta \rho g(z_2 - z_1))}{\Delta \rho g} = z_1 - z_2 - \frac{2a^2}{b_2}, \quad (4)$$

де z_1 – вертикальна координата профілю розгорнутого меніска, z_2 – вертикальна координата меніска над посудиною, b_2 – радіус кривизни в омбілічній точці меніска над посудиною. При цьому меніск над стінками посудини по формі представляє собою лежачу краплю і для знаходження координат точок такого контуру меніска було чисельно проінтегровано відповідну систему диференційних рівнянь капілярності для згорнутих менісків.

На основі проведених теоретичних досліджень розраховано мінімальний діаметр посудини для досліджень із врахуванням можливих радіусів зануреного стрижня та очікуваного значення ПН, при якому меніск над краями посудини не впливатиме на утворений розгорнутий меніск в центрі посудини. Результати розрахунків оформлені у вигляді табличних даних та апроксимовано за допомогою такої залежності:

$$R_{\text{noc}}(r, \sigma) = a + br + c\sigma + d\sigma + fr^2, \quad (5)$$

де R_{noc} – радіус посудини (мм), в якій меніск досліджуваної рідини над стінками не впливатиме на розгорнутий меніск в центрі посудини, утворений навколо стрижня із радіусом r (мм); σ – попередньо оцінене приблизне значення ПН досліджуваної рідини (мН/м). Було встановлено, що при значеннях $a=8,58$ мм; $b=3,17$; $c=0,1$ мм²/мН; $d=0,004$ мм/мН; $f=-0,11$ мм⁻¹ СКВ апроксимованих даних від експериментальних становить 1,87 мм, а коефіцієнт кореляції становить 0,9971. За допомогою (5) можна ще перед початком експериментів підібрати посудину потрібних розмірів для проведення досліджень ПН відповідних рідин чи розчинів ПАР.

Проаналізовано характер меніска рідини біля стінок посудини у випадку змочування та незмочування рідиною посудини, на основі чого розроблено рекомендації щодо підбору матеріалу стінок посудини для досліджуваної рідини.

У третьому розділі розроблено структурну схему та подано конструкцію приладу, який реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска для контролю поверхневих властивостей рідин, конструкцію оптичної системи приладу і окремих його блоків. Крім цього, в цьому розділі певна увага приділена розробленню методики виділення координат точок контуру розгорнутого меніска із піксельною та субпіксельною точністю, алгоритму програмного забезпечення для виділення контуру, калібруванню оптичної системи приладу.

Структурна схема розробленого приладу зображена на рис. 4. Основними вузлами і блоками приладу є: 1 – блок живлення, що забезпечує необхідну величину струму для живлення освітлювача 2, який побудований на матриці із шести SMD світлодіодів білого світла; 3 – світлорозсіювальне молочне скло, що встановлене в напрямку поширення світла для забезпечення однорідного розсіяного світлового поля; 4 – непрозора діафрагма, положення якої регулюється відносно розгорнутого меніска та стрижня у двох напрямках для забезпечення чіткого, без світлових плям, зображення профілю меніска та горизонтальної поверхні рідини. Відлік вертикальної координати розгорнутого меніска здійснюють від горизонтальної поверхні рідини; 5 – скляний циліндричний стрижень, що занурюється у досліджувану рідину 6. Бічна поверхня стрижня повинна бути шороховатою для кращого змочування її досліджуваною рідиною 6, яку наливають по вінця у посудину 7, що являє собою стакан для зважування, виготовлений згідно ТУ 92-891.029-91 із скла ТС ГОСТ 21400-75. Діаметр посудини повинен бути більшим або рівним 50 мм (згідно розроблених у розд. 2 досліджень); 8 – підвіс, що являє собою нерозтяжну нитку (дротину) для забезпечення вертикальності стрижня; 9 – підіймальний столик, за допомогою якого регулюють положення посудини 7 відносно оптичної осі, а також забезпечують змочування поверхні стрижня над лінією трифазного контакту шляхом максимального підймання відносно зануреного стрижня та подальшого опускання до потрібного рівня; 10, 11 – мікроскоп та ПЗЗ камера, що являють собою цифровий мікроскоп (USB Digital Microscope), за допомогою якого отримують зображення періодичністю від 1 с протягом необхідного часу. Кожне зображення отримують у цифровому вигляді розміром 1600×1200 точок (пікселів) із деяким значенням інтенсивності від 0 до 255 у кожному пікселі. Отримані зображення заносяться в пам'ять ПК 13 для подальшої їх обробки; 12 – двопозиційний механізм регулювання положення цифрового мікроскопа; 13 – персональний комп'ютер із розробленим відповідним програмним забезпеченням.

На рис. 5 зображено загальний вигляд розробленого приладу, де: 1 – цифрова камера, положення якої регулюється по вертикалі і горизонталі ручкою 2 двопозиційного механізму; 3 – масивна основа приладу, що розміщена на 4-х ніжках для горизонтування приладу; 4, 5 – ручки для налаштування положення шторки 7 відносно утвореного меніска рідини та джерела світла з метою уникнення відблиску світла на поверхні рідини; 6 – ручка підіймального столика із посудиною з досліджуваною рідиною для зручності розташування меніска рідини відносно світлового екрана, а також для забезпечення кута відтікання рідини відносно стрижня; 8 – частина скляного стрижня; 9 – досліджуваний розгорнутий меніск

рідини. В процесі проведення експериментів було визначено форму та розміри шторки 7.

У розробленому приладі для отримання зображення використовують цифрову камеру, що являє собою цифровий USB-мікроскоп Microsafe Shiny Vision MM-2288-5X із роздільною здатністю 2,0 мегапікселя. За допомогою даної камери отримують зображення зануреного циліндра та розгорнутого меніска рідини із максимальною роздільною здатністю 1200×1600 пікселів. Таким чином отримане зображення має вигляд матриці, в якій 1200 рядків та 1600 стовпців. Кожен елемент такої матриці відповідає деякому пікселю зображення і містить три складових інтенсивності кожного із основних кольорів – червоного (R), зеленого (G) і синього (B). Інтенсивність кожної складової може мати значення від 0 до 255.

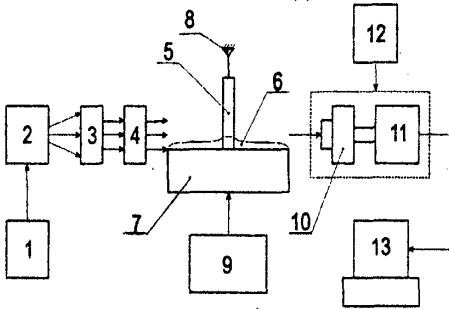


Рис. 4. Структурна схема приладу для контролю поверхневих властивостей рідин методом розгорнутого меніска

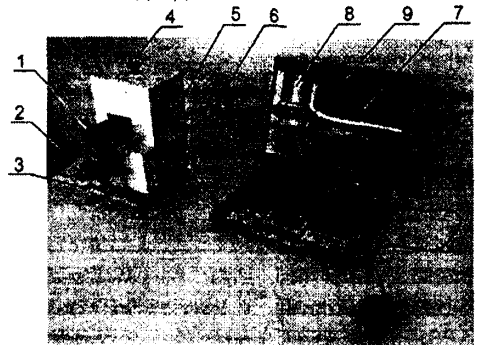


Рис. 5. Загальний вигляд розробленого приладу

Методика обробки зображення розгорнутого меніска включає такі кроки:

- перетворення зображення із кольорового (RGB) в градації сірого та підвищення контрасту,
- фільтрація зображення з метою видалення шумів,
- виділення контуру розгорнутого меніска та бінаризація зображення,
- пошук крайньої точки розгорнутого меніска,
- покрокове визначення всіх точок розгорнутого меніска,
- субпіксельне виділення контуру розгорнутого меніска.

Після перетворення кольорового зображення у градації сірого вихідне зображення має вигляд матриці 1200×1600 , в кожному елементі якої є значення інтенсивності I від 0 (чорний колір) до 255 (білий колір). Виділення меж на зображенні відбувається за допомогою оператора Кенні. В результаті проведення процедур, вказаних вище, отримують матрицю меж зображення розміром 1200×1600 пікселів у логічному форматі, де логічна «1» відповідає точці максимального градієнта інтенсивності.

Подальше визначення координат точок розгорнутого меніска виконується покроково від визначеної початкової точки меніску із перевіркою сусідніх точок. Перевіривши всі сусідні пікселі, визначається наступна точка меніска. Така ж перевірка виконується із знайденою точкою. Таким чином визначають координати всіх точок розгорнутого меніска із експериментального зображення. Результатом є

масив координат точок, що відповідають точкам контуру розгорнутого меніска, із похибкою визначення 1 піксел. Розроблено підпрограму для ПК, що реалізує вказану вище процедуру.

Для визначення координат точок із субпіксельною точністю знайдені із піксельною точністю координати точок розгорнутого меніска співставляють із вихідним зображенням. Далі знаходять інтенсивність кожної точки примежової зони по горизонталі G_x (рис. 6, а) та вертикалі G_z (рис. 6, б) у діапазоні $\pm m$, де m – кількість пікселів примежової зони, $m = 5 + 15$ пікселів.

Для кожної точки примежової зони знаходять похідні інтенсивності dG_x по горизонталі (рис. 6, а) та dG_z (рис. 6, б) по вертикалі у вказаному діапазоні $\pm m$ пікселів.

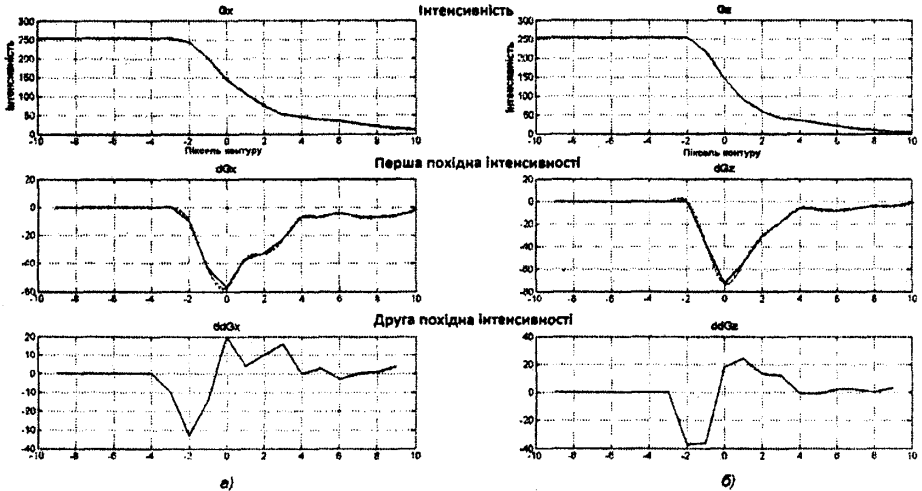


Рис. 6. Основні етапи знаходження межі зображення із субпіксельною точністю: а) по горизонталі зображення, б) по вертикалі зображення

Розрахунок другої похідної ddG_x (рис. 6, а) та ddG_z (рис. 6, б) дозволяє знайти точне положення межі зображення у точці перетину кривої із нульовим рівнем. Проте, як видно із рис. 6, на зображеннях ddG_x та ddG_z крива другої похідної має кілька точок перетину із нульовим рівнем. Тому для уникнення помилкового знаходження межі зображення запропоновано поділити діапазон $\pm m$ пікселів на $n = 50 \dots 100$ точок, а самі значення зміни інтенсивності dG_x та dG_z інтерполювати кубічними сплайнами відповідно до нової кількості точок. Далі знайти абсолютні максимуми похідних, координати x яких відповідають точному положенню межі зображення відносно попередньо знайденої межі зображення із піксельною точністю. Таким чином знаходять відхилення по горизонталі $\pm \Delta x$ та вертикалі $\pm \Delta z$ (переважно у долях пікселя) від початкових значень координат межі зображення і отримують координати точок розгорнутого меніска із субпіксельною точністю.

Розроблено підпрограму для ПК, що реалізує запропоновану процедуру виділення точок контуру із субпіксельною точністю.

Запропоновано методику калібрування відеокамери приладу, що використовується для визначення координат розгорнутого меніска у розмірних величинах. У результаті із експериментального зображення розгорнутого меніска отримують розмірні координати точок частини розгорнутого меніска для підбору найбільш подібного теоретичного контуру розгорнутого меніска.

У четвертому розділі дисертаційної роботи здійснений метрологічний аналіз удосконаленого методу розгорнутого меніска і розробленого приладу та оцінено вірогідність контролю поверхневих властивостей цим приладом.

Метрологічний аналіз здійснений згідно міжнародних загальних правил оцінювання та вираження невизначеності вимірювання. Проведений аналіз сумарної стандартної невизначеності вимірювання поверхневого натягу. З цією метою було досліджено стандартну невизначеність кожної вхідної величини, що має вплив на результат контролю. На основі невизначеностей всіх вхідних величин та їхніх внесків було розраховано стандартні сумарні невизначеності контролю ПН та ККЗ, а також їх розширені невизначеності.

При аналізі процесу контролю ПН методом розгорнутого меніска було досліджено, що на результат контролю ПН методом розгорнутого меніска впливають такі стандартні невизначеності вхідних величин (рис. 7): невизначеність визначення різниці густин $\Delta\rho$ фаз рідина – газ $u(\sigma(\Delta\rho))$, що включає невизначеності попереднього визначення густини досліджуваної рідини $u(\rho_a)$ і повітря над нею $u(\rho_b)$; невизначеність вимірювання радіуса r зануреного скляного стрижня $u(\sigma(r))$, яка включає невизначеність засобу вимірювання радіуса циліндра $u_B(r)$ і невизначеність результату визначення радіуса циліндра $u_A(r)$ на основі статистичних даних; невизначеність виділення розгорнутого меніска із отриманого

його цифрового зображення $u(\sigma(x,z))$, що включає невизначеність отримання координат контуру розгорнутого меніска у цифровому форматі $u_{pix}(x,z)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{opt})$. Невизначеність $u_{pix}(x,z)$ включає невизначеність $u_A(E_{zz})$ типу А відхилень координат точок x і z експериментального розгорнутого меніска від координат теоретичного

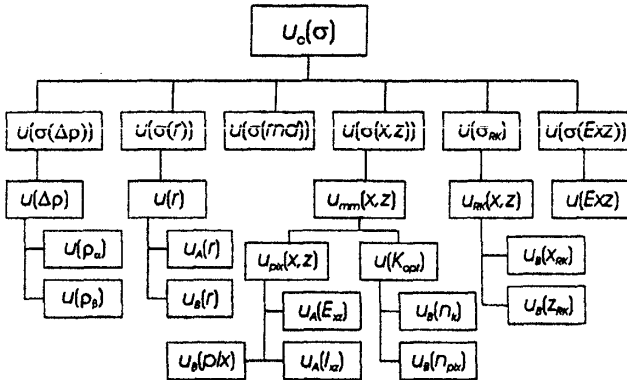


Рис. 7. Складові сумарної стандартної невизначеності вимірювань поверхневого натягу удосконаленим методом і приладом

розгорнутого меніска, невизначеність $u_A(I_x)$ типу А відхилень координат точок x і z експериментального розгорнутого меніска від координат розмитого контуру розгорнутого меніска і невизначеність $u_B(pix)$ типу В внаслідок отримання зображення у цифровому (дискретному) форматі. Невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу $u(K_{opt})$ включає невизначеність $u_B(n_{pix})$ відліку віддалі між лініями сітки на її цифровому зображенні і невизначеність $u_B(n_k)$ технології виготовлення сітки; невизначеність чисельного методу Рунге–Кутта розв'язку системи диференційних рівнянь, що описують розгорнутий меніск, з метою побудови теоретичного контуру розгорнутого меніска $u(\sigma_{RK})$, яка включає невизначеності $u_B(x_{RK})$ і $u_B(z_{RK})$ результатів чисельного інтегрування при визначенні координат x і z контуру; невизначеність підбору теоретичного контуру, подібного до експериментального $u(\sigma(E_x))$; невизначеність заокруглення результатів при їх обчисленні на ЕОМ $u(\sigma(rnd))$.

Особливістю розрахунку невизначеності вимірювань у даному випадку є відсутність явної аналітичної залежності між вхідними та вихідною величинами і неможливість розрахунку часткових похідних залежності вихідної величини по кожній із вхідних величин. Тому запропоновано внесок невизначеності кожної вхідної величини розраховувати експериментально. Оцінка внеску невизначеності $u_i(y)$ кожної вхідної величини приймалась рівною вимірній зміні вихідної величини Y , що викликана зміною заданої вхідної величини X_i на її невизначеність $u(x_i)$ (при цьому значення інших вхідних величин підтримувались постійними):

$$u_i(y) = |\Delta Y| = \left| \left\{ y \Big|_{x_1, \dots, x_i} - y \Big|_{x_1, \dots, x_i + u(x_i)} \right\} \right|. \quad (6)$$

На основі невизначеностей всіх вхідних величин та їхніх внесків було розраховано стандартну сумарну невизначеність вимірювання ПН $u_c(\sigma) = 0,257$ мН/м та на її основі обчислено за допомогою (6) сумарну невизначеність вимірювання ККЗ $u_c(\theta(\sigma)) = 1,58^\circ$. З урахуванням того, що коефіцієнт охоплення $k = 2$ відповідає рівню довіри $p = 0,95$; розраховані розширені невизначеності $U(\sigma) = 0,514$ мН/м, $U(\theta) = 3,16^\circ$, або у відносних величинах $\bar{U}_{0,95}(\sigma) = 0,6\%$ та $\bar{U}_{0,95}(\theta) = 3,5\%$, відповідно. Це означає, що приблизно 95% всіх визначених значень σ і θ знаходяться у діапазонах $(\sigma_{\text{вим}} \pm 0,5)$ мН/м та $(\theta_{\text{вим}} \pm 3)^\circ$.

При оцінюванні вірогідності контролю проведено аналіз основних показників вірогідності: законів розподілу випадкових величин, допуску контрольованого параметра, помилок першого та другого роду. Здійснено оцінювання статистичних характеристик контрольованого параметра (ПН) на основі експериментальних досліджень. Встановлено, що вірогідність контролю розробленим приладом не є меншою 91,6%.

У п'ятому розділі подано методику проведення лабораторних досліджень розробленим приладом, зображено інтерфейси розроблених підпрограм в

середовищі MatLAB, що реалізують процедуру виділення контуру розгорнутого меніска із його експериментального зображення, розрахунок коефіцієнта перетворення координат точок із пікселів у розмірний формат, побудову теоретичного розгорнутого меніска, подібного до експериментального і розрахунок на основі подібного теоретичного контуру ПН та ККЗ досліджуваної рідини чи розчину ПАР.

Значну увагу приділено лабораторним випробуванням приладу для контролю поверхневих властивостей рідин. Під час лабораторних випробувань, крім перевірки працездатності приладу в цілому і його окремих блоків і вузлів зокрема, були проведені дослідження ПН чистих рідин, результати яких порівнювалися із відомими табличними даними. Також були проведені дослідження ПН водних розчинів деяких ПАР різних концентрацій, результати яких порівнювалися із результатами досліджень цих же розчинів ПАР за допомогою інших приладів, зокрема, за допомогою відомого приладу ППНЛ-1, основна приведена похибка вимірювання якого становить 0,5%. Проведені експерименти обома приладами із розчинами ПАР типу Тіпол різних концентрацій показали однакові результати.

На рис. 8 зображені результати експериментальних досліджень на замовлення НДПІ ПАТ «Укрнафта» ПН водних розчинів Стінолу (синергетична суміш ПАР аніонного та неіоногенного типу), які використовують при обробленні привибійних зон нафтогазовидобувних свердловин з концентраціями 10%; 5%; 2,5%; 1,25%; 1%; 0,3%; 0,15%. На рис. 9 зображено залежність контрольованого ПН розчинів ПАР типу Стінол від натурального логарифма концентрацій цих розчинів.

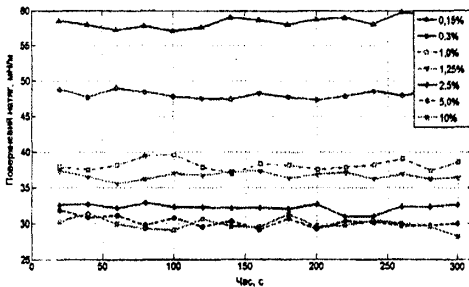


Рис. 8. Результати контролю розчину ПАР типу Стінолу різних концентрацій

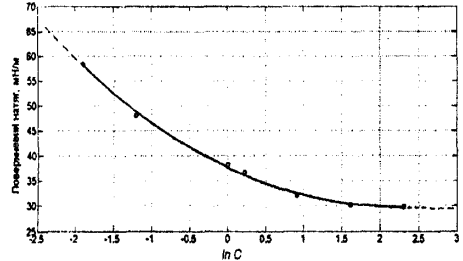


Рис. 9. Залежність ПН розчину ПАР типу Стінолу від логарифма концентрації

Залежність ПН від концентрації ПАР типу Стінол в розчині було апроксимовано поліноміальною функцією:

$$\sigma(C) = -0,10(\ln C)^3 + 1,77(\ln C)^2 - 7,04\ln C + 37,65, \quad (7)$$

де $\sigma(C)$ – ПН розчину (мН/м), C – концентрація ПАР типу Стінол в розчині у відсотках. СКВ апроксимованих даних від експериментальних рівне 0,504 (мН/м), коефіцієнт кореляції рівний 0,9977. Впровадження результатів дослідження підтверджено актом впровадження НДПІ ВАТ «Укрнафта» від 30.05.2014р.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна задача, яка полягає в розробленні удосконаленого методу розгорнутого меніска та приладу для контролю поверхневого натягу та крайового кута змочування на межах розділу фаз підвищеною точністю отримуваних результатів. При цьому отримані такі основні результати:

1) проведено аналіз відомих методів визначення ПН і ККЗ розчинів ПАР шляхом дослідження форми менісків та їх технічних реалізацій. Проведено порівняльний аналіз відомих методів дослідження ПН рідин методом розгорнутого меніска, на основі чого виявлено шляхи удосконалення цього методу;

2) розроблено та досліджено математичну модель розгорнутого меніска, що дозволило виявити особливості розгорнутих менісків і розробити рекомендації щодо вибору діаметру та матеріалу циліндричних стрижнів для проведення досліджень, розмірів посудини для досліджуваної рідини;

3) розроблено удосконалений метод розгорнутого меніска для контролю ПН і ККЗ розчинів ПАР з регресійною методикою визначення координат точок контуру розгорнутого меніска, зокрема, запропоновано методику цифрової обробки експериментальних зображень, покрокового визначення контуру меніска та субпиксельне його виділення, що дозволяє виділити точніше точки контуру меніска із його експериментального зображення;

4) розроблено та виготовлено прилад для контролю ПН та ККЗ рідин та водних розчинів ПАР удосконаленим методом розгорнутого меніска, який дозволяє здійснювати контроль ПН і ККЗ розчинів ПАР різних концентрацій, а також рідин із різними фізичними властивостями;

5) здійснено метрологічний аналіз розроблених удосконалених методу і приладу для контролю ПН і ККЗ рідин та водних розчинів ПАР методом розгорнутого меніска та оцінено вірогідність контролю;

6) проведені лабораторні випробування розробленого приладу для контролю ПН рідин та водних розчинів ПАР методом розгорнутого меніска, а також натурні випробування водних розчинів ПАР типу Стінол різних концентрацій, що використовуються для при вибійних зон пластів експлуатаційних нафтогазоносних свердловин на замовлення НДПІ ПАТ «Укрнафта». Акт впровадження додається.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кісіль І.С. Аналіз і рекомендації щодо використання методів і пристроїв для дослідження поверхневого натягу рідин з вимірюванням взаємодіючих зусиль між рідинами і твердими тілами різної форми / І.С. Кісіль, О.Б. Зарічна // *Методи та прилади контролю якості*. – 2009. – №23. – С. 44 – 48.

2. Барна О.Б. Дослідження поверхневого натягу рідин методом розгорнутого циліндричного меніска біля плоскої стінки / О.Б. Барна, В.Б. Біліщук, І.С. Кісіль // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – №26. – С. 57 – 59.

3. Кісіль І.С. Використання регресійної методики для визначення поверхневого натягу рідин / І.С. Кісіль, Р.Т. Боднар, В.Б. Біліщук, Б.В. Костів, О.Б. Барна // *Методи та прилади контролю якості*. – 2012. – №28. – С. 91 – 99.

4. Барна О.Б. Методика і установка для дослідження профілю розгорнутого меніска для визначення поверхневого натягу та крайового кута змочування / О.Б. Барна // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Далі. – №18(189). – 2012. – С. 20 – 28.
5. Барна О. Б. Невизначеність виділення контуру розгорнутого меніска при дослідженні поверхневого натягу рідин / О. Б. Барна // Метрологія та прилади. – 2014. - №1 (45). – С. 27 – 31 (входить до наукометричної бази Index Copernicus).
6. Кісіль І.С. Метрологічний аналіз результатів вимірювання поверхневого натягу рідин приладом, що реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска / І.С. Кісіль, О.Б. Барна // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №1 (32). – С. 47 – 53.
7. Kisil I. Device for study of dynamic surface tension of aqueous surfactant solution / I. Kisil, V. Bilischuk, Yu. Kuchirka, O. Barna // Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2014. – №2. – Р. 28 – 30 (входить до наукометричної бази Index Copernicus).
8. Пат. UA 104491 C2 Україна, МПК (2006.01) G01N 13/02. Спосіб визначення поверхневого натягу і крайового кута змочування на межах розділу фаз методом розгорнутого меніска / Кісіль І.С., Барна О.Б., Білішук В.Б.; заявник і патентовласник Івано-Франківський націон. Техн.. ун-т нафти і газу. – № а 201204602; заявл. 25.10.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. №3.
9. Зарічна О.Б. Дослідження динамічного поверхневого натягу рідин на межі їх розділу із газом методом пластинки / О.Б. Зарічна, І.С. Кісіль // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 2-га наук.–практ. конф. студ. і мол. уч., 25–26 листопада 2009р., Івано-Франківськ: зб. тез доп. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2009. – С. 52 – 53.
10. Барна О.Б. Використання методів витягування різних тіл при вимірюванні поверхневого натягу для оптимального вибору концентрації ПАР у розчинах / О.Б. Барна, І.С. Кісіль // Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України: наук.–техн. конф., 16–18 листопада 2010р., Івано-Франківськ: тези доп. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2010. – С.161–166.
11. Зарічна О.Б. Характерні особливості приладів і методик дослідження динамічного поверхневого натягу розчинів ПАР / О.Б. Зарічна, І.С. Кісіль // Приладобудування 2010: стан і перспективи: 9-та міжнар. наук.–техн. конф., 27–28 квітня 2010р., Київ: зб. тез доп. – Київ: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2010. – С. 135–136.
12. Барна О. Б. Особливості методу розгорнутого меніска для дослідження поверхневого натягу рідин / О.Б. Барна // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: 6-та міжнар. наук.–техн. конф., 29 листопада – 2 грудня 2011р., Івано-Франківськ: зб. тез. доп. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С. 271–275.
13. Барна О.Б. Дослідження динамічного і рівноважного поверхневих натягів рідин і розчинів методом пластинки / О.Б. Барна // Погляд у майбутнє приладобудування: 4-та наук.–практ. конф. студ. та асп., 12 квітня 2011р., Київ: зб. тез. доп. – Київ: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2011. – С. 197.
14. Барна О.Б. Прилад для дослідження стічних вод на наявність поверхнево-активних речовин / О.Б. Барна, В.Б. Білішук, І.Р. Патловський // Радиоелектроніка и молодежь в 21 веке: 16-ый межд. молод. форум, 17–19 апреля 2012г., Харьков: сб. материалов форума. Т.2. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – С. 212–213.

15. Барна О.Б. Метод розгорнутого меніска для дослідження динамічного поверхневого натягу розчинів ПАР / О.Б. Барна, В.Б. Білішчук // Нафтогазова енергетика – 2011: міжнар. наук.–техн. конф., 11–14 жовтня 2011р., Івано-Франківськ: анотації – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С. 59.

16. Barna O.B. A table lifting unit of device for research of surface tension of surfactant solutions / O.B. Barna, V.B. Bilishchuk, R. Franzander, O.V. Popovich // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: 7-а наук.–практ. конф. студ., асп. та мол. вчених, 23 листопада 2011р., Київ: зб. тез. доп. – Київ: ПБФ, НТУУ «КПІ», 2011. – С. 7.

17. Barna O. Method and device for surface tension measuring based on the external meniscus shape analysis / O. Barna // Стратегія качества в промышленности и образовании: 9-ая межд. конф., 31 мая – 7 июня 2013г., Варна, Болгария: матер. конф.: у 3 т. – Том 2. – Дніпропетровськ – Варна, 2013. – С. 18–20.

18. Барна О.Б. Методика і засоби для експрес-контролю наявності ПАР у природних водних середовищах і промислових стоках / О.Б. Барна, Ю.М. Кучірка, І.Р. Патловський, І.С. Кісіль, Б.В. Костів // Нафтогазова енергетика 2013: міжнар. наук.–техн. конф., 7–11 жовтня 2013р., Івано-Франківськ: матер. конф. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – С. 216–219.

19. Власійчук В. М. Конструкція приладу ПРМ-100 для дослідження поверхневого натягу розчинів ПАР методом розгорнутого меніска / В. М. Власійчук, О. Б. Барна // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 4-та наук.–практ. конф., 26–27 листопада 2013р., Івано-Франківськ: зб. тез – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – С. 23–25.

20. 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.

АНОТАЦІЯ

Барна О.Б. Удосконалені метод розгорнутого меніска та прилад для контролю поверхневих властивостей на межах розділу фаз. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Міністерства освіти і науки України, Івано-Франківськ, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі щодо вдосконалення методу розгорнутого меніска для контролю поверхневих властивостей на межах розділу фаз.

Проведено аналіз відомих методів контролю поверхневих властивостей розчинів поверхнево-активних речовин за допомогою дослідження форми менісків та їх технічних реалізацій. Здійснений порівняльний аналіз відомих методів контролю поверхневого натягу рідин методом розгорнутого меніска, на основі чого виявлено шляхи удосконалення методу розгорнутого меніска. На основі моделювання розгорнутого меніска досліджено особливості менісків такого типу і розроблені рекомендації щодо проведення досліджень, детально розглянуто закономірності зміни кривизни і форми меніска в залежності від поверхневого

натягу рідини, крайового кута змочування досліджуваною рідиною матеріалу стрижня, радіуса зануреного стрижня.

Удосконалено метод розгорнутого меніска для контролю ПН розчинів ПАР з регресійною методикою визначення координат точок контуру меніска, запропоновано методикою цифрової обробки експериментальних зображень, покращено визначення контуру меніска та субпіксельне його виділення. Розроблено та виготовлено прилад, який дозволяє здійснювати контроль поверхневих властивостей рідин і розчинів поверхнево-активних речовин різних концентрацій, а також рідин із різними фізичними властивостями.

Здійснено метрологічний аналіз розроблених удосконалених методу розгорнутого меніска і приладу для контролю поверхневого натягу та крайового кута змочування рідин та водних розчинів поверхнево-активних речовин і проведені лабораторні випробування розробленого приладу шляхом контролю поверхневих властивостей рідин та водних розчинів поверхнево-активних речовин різних концентрацій.

Ключові слова: поверхневий натяг, крайовий кут змочування, розгорнутий меніск, поверхнево-активна речовина, межа розділу фаз, цифрове зображення, невизначеність, вірогідність.

ANNOTATION

Barna O. B. Improved external meniscus method and device for control of surface properties at the interface. - In Manuscript.

The dissertation is aimed at gaining the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences at specialty 05.11.13 - Devices and methods for monitoring and determining the composition of substances. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2014.

The dissertation is devoted to solution of actual scientific and applied task of external meniscus method improving for surface properties control at the interface.

The analysis of the known methods of surfactant solutions surface properties control by axisymmetric meniscus shape analysis and the technical implementations was done. The external meniscus features were investigated using of meniscus modeling and the recommendations for research were given. The meniscus curvature and shape transformation depending on surface tension, contact angle of investigated liquid and immersed rod radius are researched.

The external meniscus method for surface tension control with regression method of determining coordinates of the meniscus contour was improved. The methods of digital image processing and step-by-step method of meniscus contour definition were proposed. The instrument for surface tension and contact angle control of liquids and aqueous surfactant solutions by the external meniscus method was developed.

The metrological analysis of improved method and developed instrument for surfactant solutions surface tension control by the external meniscus method and laboratory testing of instrument by surface tension and contact angle control of liquids and aqueous surfactant solutions of different concentrations were done.

Keywords: surface tension, contact angle, external meniscus, surfactant, interface, digital image, uncertainty, probability.

АНОТАЦИЯ

Барна О.Б. Усовершенствованные метод развернутого мениска и прибор для контроля поверхностных свойств на границах раздела фаз. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой 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 Министерства образования и науки Украины, Ивано-Франковск, 2014.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи по совершенствованию метода развернутого мениска для контроля поверхностных свойств на границах раздела фаз.

Проведен анализ известных методов контроля поверхностных свойств растворов ПАВ с помощью исследования формы менисков и их технических реализаций. Проведенный сравнительный анализ известных методов контроля ПН жидкостей методом развернутого мениска, на основе чего выявлены пути усовершенствования метода развернутого мениска. На основе моделирования развернутого мениска исследованы особенности менисков такого типа и разработаны рекомендации по проведению исследований, подробно рассмотрены закономерности изменения кривизны и формы мениска в зависимости от ПН жидкости, ККЗ исследуемой жидкостью материала стержня, радиуса погруженного стержня.

Усовершенствован метод развернутого мениска для контроля ПН растворов ПАВ с регрессионной методикой определения координат точек контура мениска, предложена методика цифровой обработки экспериментальных изображений, пошагового определения контура мениска и субпиксельное его выделение. Разработан и изготовлен прибор для контроля ПН и ККЗ жидкостей и водных растворов ПАВ методом развернутого мениска, который позволяет осуществлять контроль ПН растворов ПАВ различных концентраций, а также жидкостей с различными физическими свойствами.

Осуществлен метрологический анализ разработанных усовершенствованных метода и прибора для контроля ПН и ККЗ жидкостей и водных растворов ПАВ методом развернутого мениска и проведены лабораторные испытания разработанного прибора путем контроля ПН и ККЗ жидкостей и водных растворов ПАВ различных концентраций.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, развернутый мениск, поверхностно-активное вещество, граница раздела фаз, цифровое изображение, неопределенность, достоверность.