

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Кулик Назарій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 532.6.08

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Розроблення методу контролю поверхневого натягу рідин
за профілем висячої краплі

(назва роботи)

152 Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

(шифр і назва спеціальності)

_____ Кулик Н.А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

, к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІВТЕМ

Доц. _____ **В.С. Цих**

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано-Франківськ – 2025 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

КАФЕДРА інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень **магістр**

Спеціальність **175 Інформаційно-вимірювальні технології**

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ _____

В.С. Цих

«_____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_ Кулик Назарій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розроблення методу контролю поверхневого натягу рідин за профілем висячої краплі**

Керівник роботи **Боднар Роман Тарасович, к.т.н., доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "05" 12. 2025 року № 752/7

2. Термін подання студентом роботи "18" 12. 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: діапазон вимірювання поверхневого натягу від 10 мН/м до 100 мН/м; діапазон температур 5–95 С⁰; мінімальний об'єм досліджуваної рідини – 10 мл..

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз існуючих методів визначення поверхневого натягу рідин. Теоретичне обґрунтування вибраного методу контролю. Розробка функціональної схеми установки. Розробка методики контролю. Метрологічний аналіз розробки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Моделювання капілярних поверхонь (формат А3); Математична модель (формат А3); Математичне моделювання зображення висячої краплі (формат А3); Схеми функціональні (формат А3); Пристрій дозуючий. Складальне креслення (формат А3); Метрологічний аналіз (А2)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю		
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю		
3.	Розробка функціональної схеми установки.		
4	Розробка методики контролю		
5	Метрологічний аналіз		
6.	Оформлення роботи.		

Студент _____ .. Кулик Н.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ ..Боднар Р.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота 67 с., 11 рис., 6 додатки, 32 джерел, 6 аркушів креслень

Мета роботи - удосконалення методу визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР методом висячої краплі. Метод дослідження - ітераційний.

В даній магістерській роботі розроблено методику, яка дозволяє визначити поверхневий натяг рідин і розчинів ПАР методом висячої краплі. Складено алгоритм проведення досліджень розробленим методом. Розроблено методику обробки отриманого збурження. Побудовано функціональну схему пристрою для визначення поверхневого натягу. Здійснено метрологічний аналіз похибок.

**ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ, КРАПЛЯ, УСТАНОВКА, ІТЕРАЦІЙНИЙ,
ВИЗНАЧЕННЯ.**

THE ABSTRACT

The degree project 67 p., 11 fig., 6 additions, 32 sources, 6 sheets.

Purpose - to improve the method for determining the surface tension of liquids and solutions of surfactants. Research method - iteration.

In this master's thesis developed a method that allows to determine the surface tension of liquids and solutions of surfactants. Compiled algorithm developed research method. We construct a functional diagram to determine die dynamic surface tension.. Done measurement analysis errors.

SURFACE TENSION, DROP, DEVICE, ITERATION, DEFINITION.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. Аналіз методів та засобів контролю поверхневого натягу.....	11
1.1 Метод підняття в капілярі	11
1.2. Методи, пластини, що втягується (метод Вільгельмі)	13
1.3 Метод лежачої та висячої краплі.....	14
1.4 Метод максимального тиску в бульбашці (метод Ребіндера)	16
1.5 Метод відриву кільця, серезки, пластинки (метод Дю Нуї)	16
1.6 Сталогмометричний метод	17
1.7 Методи, що використовують поле обертання	18
1.8 Порівняльний аналіз методів вимірювання поверхневого натягу рідин.....	19
1.9 Порівняльний аналіз методів вимірювання поверхневого натягу	19
1.10 Постановка задачі на магістерську роботу	27
2 Розроблення удосконаленого методу контролю поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР	30
2.1 Теоретичне обґрунтування методу висячої краплі для визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР	30
2.2 Розроблення ітераційного методу визначення динамічного поверхневого натягу за методом висячої краплі	39
2.4 Розробка алгоритму обробки зображення.....	44
2.4.1 Виділення необхідного фрагмента та фільтрації зображення висячої краплі	45
2.4.2 Підвищення контрасту та виділення контуру висячої краплі	46
2.4.3 Бінаризація зображення висячої краплі	53
2.5 Розроблення структурної схеми приладу.....	55
2.6 Розроблення програмного забезпечення	57
2.7 Використання поверхневого натягу для визначення адсорбції в розчинах ПАР.....	58

3 Аналіз метрологічних характеристик методу і приладу для вимірювання динамічного поверхневого натягу рідин та розчинів ПАР	62
Висновки	71
Список використаної літератури	74
Додатки.....	

ВСТУП

Актуальність роботи. Історія експериментальних методів визначення поверхневого натягу налічує більше двох століть. Пройдений шлях від простих і грубих способів, які породили, по висловлюванню Харкінса, "комедію помилок", до прецизійних методик, які дозволяють знаходити поверхнєве натягнення сотих доль відсотка. Про значення, яке надавалося цьому питанню, свідчить той факт, що видатні учені і класики науки, такі як Гей-Люсак, Кельвін, Менделєєв, Релей, Бор, Шредінгер, прямо або побічно брали участь в розробці і вдосконаленні методів визначення поверхневого натягу.

Сьогодні для багатьох технологічних процесів необхідна повнота та точність знань про різні рідкі середовища та поверхневі явища, які виникають на межі поділу фаз.

Процеси, що протікають на межі поділу фаз, в багатьох випадках визначають найважливіші технологічні й природні процеси у всіх галузях народного господарства, побуті, медицині. Фундаментальною властивістю межі поділу фаз є поверхневий натяг, який визначає питому вільну поверхневу енергію рідини на межі контакту рідина - навколишній газ та зумовлює широке коло капілярних явищ, а саме, кавітацію, змочування, просочення пористих тіл тощо.

Особливо важливу роль відіграє поверхневий натяг при роботі з поверхнево-активними речовинами (ПАР), які використовуються майже у всіх галузях народного господарства. В медицині вимірювання поверхневого натягу біологічних рідин (крові, лімфи, ліквору, жовчі, плазми, сироватки, сечі, навколоплідної рідин) є новим методом лабораторної діагностики захворювань людини. Особливо важливе значення поверхневий натяг відіграє в цукровій галузі, де використовують ПАР в процесах миття цукрової сировини, при інтенсифікації цукроваріння, для припинення спінювання, підвищення швидкості кристалізації цукру. Збільшення концентрації ПАР змінює поверхневі та об'ємні властивості рідини до певної межі – критичної

концентрації міцелоутворення, вище якої додавання ПАР здебільшого знижує якість розчинів та призводить до їх економічно невиправданої витрати, що підвищує собівартість того чи іншого процесу. Тому виникає необхідність підвищення вірогідності контролю поверхневого натягу для забезпечення високої якості розчинів в результаті встановлення критичної концентрації ПАР.

Для дослідження вказаних явищ необхідні відповідні прилади і методи визначення поверхневого натягу. Зараз досить поширеним стає метод лежачої краплі. В Україні дослідженням поверхневого натягу займаються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти й газу, Донецькому державному медичному університеті, Науковому центрі технічної екології, м. Донецьк, Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Вінницькому національному технічному університеті. Відомі як контактні, так і безконтактні засоби контролю поверхневого натягу, функціонування яких базується на використанні мікроскопа, фотографуванні менісків та їх проектуванні чи друкі у збільшеному масштабі. Проте ці засоби не забезпечують необхідну точність, чутливість та мають низький рівень автоматизації процесу вимірювання. Тому створення таких засобів контролю поверхневого натягу, які б забезпечували високу чутливість, точність та широкий діапазон вимірювань поверхневого натягу з використанням мікропроцесорної обробки є важливою і актуальною задачею.

Фундаментальною властивістю межі поділу рідина - газ є поверхневий натяг, який визначає питому вільну поверхневу енергію рідини і є тим параметром, значення якого в багатьох випадках (газовидобування, хімічна промисловість, фармацевтична, харчова та інші галузі народного господарства) визначальне для оцінки якісних та кількісних параметрів рідини. Особливо важливу роль відіграє поверхневий натяг у таких технологічних процесах, де використовуються розчини поверхнево-активних речовин, наприклад, при інтенсифікації видобування газу, при виготовленні миючих засобів, при розробці і виробництві поверхнево - активних речовин різних функціональних призначень.

Особливе місце займає значення поверхневого натягу для транспортування

рідкого вуглеводневого пального при їх функціональному використанні, а також якість розпилення палива та швидкість його випаровування суттєво залежать від поверхневого натягу. Поверхневий натяг залежить від розміру і структури молекул, їх полярності і здатності до утворення водневих зв'язків між собою, а також від мольного об'єму. Для рідких вуглеводневих палив, які є сумішшю великої кількості індивідуальних вуглеводів, поверхневий натяг є складною функцією залежності від їх фракційного складу. Тому їх поверхневий натяг може бути визначений лише експериментально, або за допомогою емпіричних формул. Проте більш надійним методом визначення поверхневого натягу є експериментальний.

Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз дозволяє свідомо керувати підбором як окремих фаз, так і їх компонентів у відповідному технологічному процесі. Ще з часів Лапласа відомі різні методи вимірювання таких поверхневих властивостей, як поверхневий (між різними фазами), так і міжфазний (між однакового виду фазами) натяги, крайовий кут змочування рідкими фазами твердих тіл в присутності іншої рідкої чи газоподібної фаз. Необхідно відмітити, що методи вимірювання чи визначення поверхневих властивостей і прилади, що їх реалізують, постійно удосконалюються з метою підвищення точності отримуваних результатів, розширення сфери застосування з урахуванням сучасних досягнень фізики, хімії, вимірювальної і обчислювальної техніки. Останнім часом особливо перспективними слід вважати регресійні методи вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз, які, крім підвищення точності отримуваних результатів, в результаті осциляції меж розділу фаз, дозволяють також оцінювати реологічні властивості поверхневих шарів меж розділу фаз.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення точності визначення поверхневого натягу шляхом створення нових субпіксельних методів знаходження координат краю об'єкта на основі низькочастотної фільтрації двовимірних сигналів.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є поверхнева фізико-хімічна

взаємодія рідини з газом.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є спосіб визначення поверхневого натягу рідин безконтактним методом висячої краплі.

Наукова новизна. Розроблено удосконалену методику обробки зображення висячої краплі, що дозволило знизити поріг чутливості вимірювання поверхневого натягу до $\pm 0,05$ мН/м.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ

Існує багато методів і засобів контролю поверхневого натягу (ПН), які відрізняються діапазоном вимірювального часу існування міжфазної поверхні (так званого часу життя), швидкістю та ступінню деформації поверхні в процесі вимірювань, точністю та відтворюваністю результатів.

За суттю методи, що використовуються для вимірювання поверхневого натягу рідин, можна класифікувати таким чином:

- 1) статичні;
- 2) методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень параметрів;
- 3) методи, що використовують поле обертання;
- 4) за методикою розрахунку.

До статичних методів відносяться методи підняття в капілярі, висячої та лежачої краплі, меніска біля плоскої стінки, пластинки Вільгельмі. Суть цих методів полягає у вимірюванні параметрів профілів менісків фіксованої форми. Цими параметрами є координати точок, які лежать на контурі меніска, а також площа профілю та об'єм меніска. У моменти вимірювань меніск має бути нерухомим. Проте, за наявності механічної рівноваги, у системі можуть бути відсутніми термічна і дифузна рівноваги, які характеризуються значно більшим часом релаксації, ніж механічна рівновага (яка встановлюється зі швидкістю звуку). У цьому випадку, якщо час спостереження за меніском вибирається дуже малим (отримання зображення за допомогою телевізійних засобів контролю), форму меніска також можна вважати фіксованою.

1.1 Метод підняття в капілярі

Метод заснований на капілярних ефектах, тобто здатності рідини втягуватися чи виштовхуватися з капіляра. Змочувальна рідина піднімається в капілярі на висоту [2]

$$h = 2\sigma \cdot \cos \theta / \rho g r_k \quad (1.1)$$

де θ — крайовий кут змочування; ρ — густина рідини; g — прискорення сили тяжіння; r_k — радіус капіляра.

Для визначення рівня рідини в чашці необхідне особливе пристосування. Але можна обійтися двома капілярами різних радіусів. Тоді поверхневий натяг визначається за формулою

$$\sigma = \rho_{ж} g (r_1^{-1} - r_2^{-1})^{-1} (h_1 - h_2) / 2 \cos \theta, \quad (1.2)$$

Для вимірювання рівня рідини в капілярах раціонально застосовувати катетометр. Посудина, у якій знаходиться рідина, повинна бути такого діаметра, щоб капіляр був віддалений від стінок на 30-40 мм. Капіляр повинен бути круглим та перевіреним на однорідність по всій довжині за допомогою ртуті. Добре застосовувати так звані капіляри для термометрів.

Практично метод здійснюється вимірюванням різниці рівнів у двох капілярах різного внутрішнього діаметра, занурених у посудину з досліджуваною рідиною.

Такий метод придатний для вимірювання міжфазного натягу на межі двох рідин. В якості приладу можна використовувати віскозиметр Освальда. На капілярі роблять відмітку, на яку встановлюється міжфазна границя, і від неї відзначають висоту обмеженої рідини в одному коліні і води в іншому. Для розрахунку міжфазного натягу використовується формула

$$\sigma = (h_1 p_1 - h_2 p_2) g r / 2 \cos \theta, \quad (1.3)$$

де h_1 і p_1 - висота підняття і густина органічної фази; h_2 і p_2 - висота, підняття і густина водяної фази.

Варто тільки враховувати, що верхній рівень обох фаз повинен знаходитися в широких частинах трубок.

На відміну від індивідуальних малополярних рідин, у яких кут $\theta = 0$ і $\cos \theta =$

1, при роботі з розчинами поверхнево активних речовин (ПАР) чи рідкими ПАР не завжди легко відмінити момент, коли змочування стінки капіляра стає неповним. У таких випадках необхідно незалежними методами визначати кут θ , що вимагає такої ж витрати праці, як безпосереднє визначення поверхневого натягу. Іншим недоліком цього методу є необхідність відмивати капіляр від ПАР, що при масових визначеннях створює значні труднощі.

1.2 Метод пластинки, що втягується (метод Вільгельмі)

Суть методу полягає в тому, що пластинку із платини, яка висить на нитці, прикріпленій до точного приладу для визначення ваги, опускають до контакту з рідиною у посудині. Визначення поверхневого натягу рідин здійснюється за формулою [2]

$$\sigma = \frac{W + \rho l b h}{2(h + b) \cos \theta} \quad (1.4)$$

де W —покази приладу для визначення ваги; ρ — густина рідини; l , b та h — розміри тієї частини пластини, що занурена у рідину.

Цей метод є простим, але слід вибрати матеріал пластинки, який добре змочується рідиною

1.3 Методи лежачої та висячої краплі

У основі цих методів лежать визначення форми краплі, що лежить на пластинці чи підвішена до кінця капіляра. За допомогою мікроскопа з окулярною сіткою визначають форму і розмір краплі, за якими розраховують поверхневий натяг. Можна фотографувати краплю і на фотографії визначати необхідні для розрахунку параметри.

При використанні методу лежачої краплі, яку наносять на горизонтальну змочувану поверхню, виміряють розміри її профілю, а потім за цими розмірами обчислюють за відомими формулами поверхневий натяг рідини.

При використанні методу краплі, яка висить з якої-небудь змочувану поверхні чи з капіляра, вимірюють максимальний діаметр краплі d_k і висоту від вешини до до екватора H . Поверхневий натяг у цьому випадку обчислюють за формулою [3, 4]

$$\sigma = \frac{(\rho - \rho_r) d_k g}{H} \quad (1.5)$$

де ρ_r — густина газу.

Перевага цих методів полягає в зручності спостереження в часі за зміною поверхневого натягу й при відсутності прямого контакту вимірювального пристрою з поверхнею, що дозволяє застосовувати їх для вимірювання поверхневого натягу розплавів металів і солей, які знаходяться в ізолюваній камері при високій температурі. Проте ці методи мають істотні недоліки. По-перше, труднощі визначення точних параметрів форми краплі вносять значну помилку. По-друге, ПАР змінюють реологічні властивості краплі, наближаючи її за гідродинамічними властивостями до твердої кульки, що може внести похибку у розрахунки і вимагає додаткової перевірки незалежними методами. При роботі з ПАР у всіх випадках можна рекомендувати хоча б одну-дві точки перевірити іншим контрольним методом; якщо результати збігаються, можна вибрати більш простий і зручний метод.

Методи другої групи, на відміну від статичних методів, вимагають, щоб форма меніска у ході дослідження змінювалася. При цьому одна з величин, що характеризує досліджуваний меніск, повинна пройти через екстремум. Це методи: максимальної висоти лежачої краплі, максимального тиску бульбашки, витягування циліндра, шару, конуса, відриву кільця, пластинки, сталагмометричний, барботажний, лежачої та висячої краплі у електростатичному полі. Розглянемо найбільш поширені з них.

1.4 Метод максимального тиску в бульбашці

Суть його полягає в тому, що через калібрований капіляр, опущений у досліджувану рідину, видують пухирці газу.

При зростанні тиску пухирець збільшується до тих пір, коли тиск P всередині пухирця стане максимальним, і цей максимум треба зафіксувати. Тоді величина поверхневсго натягу рідини визначиться із формули [5]:

$$P = gh_k \rho + 2\sigma/r_k, \quad (1.6)$$

де h_k — глибина занурення капіляра в рідину, r_k – радіус капіляра.

1.5 Метод відриву кільця, серезки, пластинки (метод Дю Нуї)

В основі методу лежить визначення сили, необхідної для відриву рідини, що змочила кільце, від поверхні рідини. Сила відриву визначається [6]

$$W = 2\pi(r_{\text{вн}} + r_{\text{зовн}})\sigma, \text{ або } W = 4\pi r_{\text{сер}}\sigma, \quad (1.7)$$

де $r_{\text{вн}}$ $r_{\text{зовн}}$ $r_{\text{сер}}$ внутрішній, зовнішній і середній радіуси кільця.

Деякі автори враховують косинус кута змочування кільця. У розрахункову формулу були введені поправки на силу відриву, густину рідини, радіуси кільця та дроту. Однак на практиці в більшості випадків застосовується більш простий порівняльний метод. Характеристики досліджуваної рідини порівнюються з відомими поверхневим натягом і силою відриву досліджуваної рідини. Розрахунок тоді ведеться за формулою

$$\sigma_x = \sigma_{\text{ст}} W_x / W_{\text{ст}}, \quad (1.8)$$

де $W_{\text{ст}}$, W_x — сила відриву кільця від стандартної і випробуваної рідини; $\sigma_{\text{ст}}$ - поверхневий натяг стандартної рідини.

Метод аналогічний до методу Вільгельмі, аналогічно визначається сила відривання кільця чи іншого предмета.

На основі цього методу випускаються закордонними фірмами прості і автоматизовані прилади.

1.6 Сталагмометричний метод

В основі методу лежить визначення ваги краплі, що відривається від капіляра. В цей момент вага краплі рівна силі поверхневого натягу, яка діє по периметру відриву радіусом r_k [7]

$$P_k = 2\pi r_k \sigma / k_n, \quad (1.9)$$

де k_n - поправочний коефіцієнт, який враховує, що відрив крапель відбувається по радіусу шийки краплі, який менший за радіус самої краплі.

Прилад, в якому здійснюється такий процес називається сталагмометром

Недоліком методу є недостатня точність.

1.7 Методи, що використовують поле обертання

Суть методу обертаної краплі полягає у прирівнюванні доцентрової сили,

яка діє на систему рідина-газ (або легша рідина), що знаходиться в закритій трубці, що обертається, з силою поверхневого натягу рідини, яка протидіє зміні рідини .поверхні метод стержня, що обертається. При обертанні запаяної трубки, у якій знаходиться однорідна рідина, внаслідок зчеплення з поверхнею буде обертатися і прилеглий до неї шар рідини. В'язкість рідини сприятиме передачі цього руху глибшим шарам. За відсутності інших впливів через деякий час уся система перейде у стан гідростатичної рівноваги, коли всі елементи рідини рухатимуться з малою швидкістю. Якщо всередині трубки знаходиться крапля іншої легшої рідини або пухирець газу, то при обертанні трубки навколо її осі важча рідина намагатиметься перейти на периферію і витіснить легшу рідину до осі трубки.

Внаслідок пухирець (або крапля легшої рідини) набуватиме витягнутої форми вздовж осі обертання, причому чим більша швидкість обертання, то більш витягнутим буде пухирець. Вимірюючи розмір краплі при відомій частоті обертання визначають поверхневий натяг рідини.

1.7 Порівняльний аналіз методів вимірювання поверхневого натягу рідин

Наведений огляд методів визначення поверхневого натягу лежить в основі класифікації методів, яка наведена в додатку Б. В основу класифікації покладено чотири класифікаційних ознаки.

Параметрами, за якими отримують інформацію про поверхневий натяг досліджуваної рідини, визначають в основному геометричні та фізичні характеристики капілярних поверхонь: розміри, масу, об'єм, силу взаємодії. Геометричні характеристики капілярних поверхонь визначають за допомогою різних оптичних засобів.

Класифікація базується на належності до одного з методів вимірювання поверхневого натягу. За методом вимірювання ПН засоби визначення ПН можна поділити на такі, в основу яких покладено встановлення параметрів профілів капілярних поверхонь та методики визначення.

Типи менісків, що використовуються для При визначенні ПН розглядають дві групи капілярних поверхонь: згорнуті та розгорнуті меніски. У першій групі

капілярні поверхні не перетинають вісь обертання O_z (лежача та висяча краплі, притиснутий та витягнутий пухирець (рис. В, а-г)). У другій групі капілярні поверхні не перетинають вісь обертання (рис. В, д, є).

Методи, основані на вивченні профілів менісків, поділяються на статичні; методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень; та такі, що використовують поле обертання.

У статичних поверхня знаходиться в рівновазі й нерухома в момент вимірювання. До статичних відносяться методи підняття в капілярі, висячої та лежачої краплі, меніска біля плоскої стінки, пластинки Вільгельмі. Так, метод капілярного підняття використовується лише в тих випадках, коли трубка добре змочується, тобто контактний кут рівний нулю. В більшості методик через складність точного визначення рівня рідини в трубці використовується диференціальний метод, в якому вимірюється різниця положень менісків в двох трубках з різним внутрішнім радіусом. В основі методів лежачої та висячої краплі лежить визначення форми краплі, яка лежить на пластинці або підвішена до кінця капіляра. Ці методи особливо корисні при дослідженні поверхонь, що старіють, оскільки дозволяють досліджувати форми краплі у часі при сталому її об'ємі. Кінцева форма краплі є дійсно рівноважною, внаслідок чого отримується рівноважне значення поверхневого натягу.

Похибка методів лежачої та висячої крапель складає 0,15%.

Метод Вільгельмі полягає у вимірюванні зусилля втягування пластинки, яка підвішена до коромисла ваг та дотикається до рідини. При цьому сила, що втягує пластинку, врівноважується на вагах так, щоб положення пластинки не змінювалось після дотику з рідиною.

У методах, що базуються на вимірюванні екстремальних значень, поверхня поділу фаз, що визначається, руйнується або рухається. При цьому одна із величин, що характеризує досліджуваний меніск, повинна пройти через екстремум. До цих методів відносяться метод максимальної висоти лежачої краплі, максимального тиску бульбашки, витягування циліндра, шару, конуса, відриву кільця, пластинки, сталагмометричний, лежачої та висячої краплі у електростатичному полі. Як параметри, що аналізуються, можуть

використовуватися не тільки величини, які безпосередньо належать меніскові, а і сила, що діє на тверде тіло, яке знаходиться у досліджуваній системі, або відстань від твердого тіла до флюїдних фаз, пов'язаних із параметрами власного меніска строгими співвідношеннями.

В методі максимальної висоти лежачої краплі параметром, що має екстремум, є висота краплі, що є функцією об'єму. Збільшення об'єму краплі здійснюється додаванням дуже малих краплин. Похибка методу максимальної висоти лежачої краплі складає 0,1%.

Методом витягування вертикального циліндра можна вимірювати значення поверхневого натягу із похибкою до 0,1 мН/м. Аналогічну точність має метод витягування кулі. Метод відриву кільця (метод Дю Нуї) має обмежене застосування. У випадку простих рідин він дає хороші результати, а для розчинів його використання обмежується через старіння поверхні. В основі методу лежить визначення сили, необхідної для відриву рідини, яка змочила кільце, від поверхні рідини.

Метод зважування чи вимірювання об'єму крапель полягає у визначенні ваги краплі, яка відривається від капіляра та утримується силами поверхневого натягу. У випадку простих рідин цей метод має достатню точність, однак при роботі з розчинами похибка може бути значною, оскільки відрив краплі від наконечника капіляра визначається гравітацією не може бути уповільнений.

До методів, які використовують поле обертання, належать метод обертової краплі, метод стержня, що обертається. Метод краплі, що обертається, розроблений для визначення дуже низьких міжфазних натягів у системі рідина-рідина. Цей метод придатний не для всіх рідин: гладкий профіль краплі утворюється в тому випадку, коли хоча б одна із рідких фаз має достатньо високу в'язкість.

За методикою розрахунку виділяють розрахунок поверхневого натягу за паракором; суміші рідин, в залежності від температури і тиску; за коефіцієнтом ізотермічного стиснення; за коефіцієнтом заломлення; за густиною і тиском пари.

Проведений аналіз показує, що на методи визначення ПН є різноманітні.

Але визначення ПН будь-яким методом залежить від вимірювання розмірів чи фізичних параметрів з високою точністю та обчисленням ПН за встановленою методикою з використанням персональних комп'ютерів. Але методики розрахунку ПН є наближеними.

Так, наприклад, метод Вільгельмі та капілярного підняття вимагає визначення крайового кута змочування, що потребує такі ж витрати праці, як безпосереднє визначення поверхневого натягу. Метод підрахунку крапель також трудомісткий: після кожного визначення в присутності поверхнево-активних речовин потрібне ретельне очищення капіляра. Недоліком описаних вище методів є невисока точність, невеликий діапазон та неавтоматизований процес вимірювання. Тому виникає потреба в інших високо ефективних методах вимірювання.

Метод лежачої краплі полягає у визначенні форми краплі, що лежить на підкладці. Ще в середині 19 ст. Квінке Т. запропонував для визначення поверхневого натягу використовувати велику лежачу краплю, яка має екватор. Вимірювалась відстань від екватора до вершини краплі $z_{\pi/2}$ (рис. 1.3.) і поверхневий натяг розраховувався за формулою [8]:

$$\sigma = (\rho^{(\alpha)} - \rho^{(\beta)}) \cdot g \cdot z_{\pi/2}^2 / 4 \quad (1.10)$$

де $\rho^{(\alpha)}$, $\rho^{(\beta)}$ - густина фаз α і β ; $z_{\pi/2}$ - відстань від екватора до вершини краплі.

Формулу (1.10) можна було використовувати і у випадку, коли крапля утворювала з підкладкою крайовий кут $\theta = \varphi_k = \pi/2$. При цьому вимірювалась повна висота краплі z_k (індекс "к" відносився до точки контакту трьох фаз).

Використовували велику краплю, яка не змочує підкладку ($\theta = \varphi_k = \pi$), і поверхневий натяг розраховували за формулою:

$$\sigma = (\rho^{(\alpha)} - \rho^{(\beta)}) \cdot g \cdot z_k^2 / 4 \quad (1.11)$$

де z_k — повна висота краплі.

Ці два варіанти, не дивлячись на простоту розрахункових формул, не отримали широкого розповсюдження через складність експериментального характеру (неоднорідність твердих поверхонь часто не дозволяла утворити досить широку краплю зі сталим крайовим кутом вздовж всієї лінії контакту трьох фаз, і крапля втрачала обертальну симетрію; крім того, досить важко в

розглянутих випадках фіксувати положення вершини краплі.

Автори Тавде Р. та Парватікар Д. запропонували варіант, в якому можуть використовуватись краплі будь-якого розміру при умові, що вони мають екватор. В цьому варіанті вимірювали екваторіальний діаметр $2x_{\pi/2}$ та координату екватора $z_{\pi/2}$, умови знаходження поверхневого натягу мають вигляд [9]

$$\varphi_{|X=X_{\pi/2}} = \pi/2, \quad Z_{|X=X_{\pi/2}} = Z_{\pi/2} \quad (1.12)$$

Для розрахунку поверхневого натягу за допомогою таблиць Ботфорта та Адамса складалась таблиця залежності $a^2/x_{\pi/2}^2$ від $z_{\pi/2}/x_{\pi/2}$ в інтервалі $0,458 < z_{\pi/2}/x_{\pi/2} < 0,560$ (пізніше верхня межа інтервалу була відсунута до 0,978). Основний недолік даного варіанта - менша по відношенню з $x_{\pi/2}$ точність вимірювання $z_{\pi/2}$, що викликано труднощами визначення точного положення екваторіального діаметра. Запропонували вимірювати поряд з екваторіальним діаметром лежачої краплі $2x_{\pi/1}$ діаметр $2x_{\pi'}$ на відстані $\pi'x_{\pi/2}$ від її вершини (в роботі розглядались значення $\pi' = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$). Умови для такого варіанта записувались у вигляді [9]

$$\varphi_{|X=X_{\pi/2}} = \pi/2, \quad Z_{|X=X_{\pi'}} = 2\pi'x_{\pi/2}. \quad (1.13)$$

У всіх згаданих варіантах необхідно, щоб крапля мала екватор, тобто щоб крапля погано змочувала підкладку ($\theta > \pi/2$). Ця не завжди досяжна на практиці умова є серйозним обмеженням.

Іващенко Ю. та Єршоменко В. запропонували кращий варіант, який не зовсім залежив від умов змочування, та полягав у вимірюванні на фотографії краплі відрізків $H_{\pi/6}$ та $H_{\pi/4}$, які отримувалися шляхом проведення дотичних до профілю, що утворюють з горизонталлю відповідно кути $\pi/6$ та $\pi/4$ (рис. В.2). В цьому випадку необхідні для знаходження поверхневого натягу умови записувались так [5]:

$$(x-z)_{|\varphi=\pi/4} = H_{\pi/4}, \quad (x/\sqrt{3} - z)_{|\varphi=\pi/6} = H_{\pi/6} \quad (1.14)$$

Такий варіант давав можливість використовувати краплі з крайовим кутом в межах $\pi/4 < \theta < \pi$. Поверхневий натяг розраховувався з допомогою показаної в табличному вигляді залежності $a^2/2H_{\pi/4}^2$ від $H_{\pi/6}/H_{\pi/4}$ ($0,3900 < H_{\pi/6}/H_{\pi/4} < 0,4572$).

Розвиток електронно-обчислювальної техніки призвів до нового етапу в

дослідженні поверхні, в тому числі і поверхневого натягу. Використання ЕОМ значно скоротило час трудомістких операцій розрахунку поверхневого натягу, точка 2 вибирається більш віддалено від вершини, далі на ЕОМ відшукується значення поверхневого натягу.

В роботі визначали координати великої кількості точок (біля десятка). Зображення (профіль) краплі, яке отримувалось з допомогою стандартної відеокамери, перетворювалось процесором в цифрову форму, після чого зі знайдених координат профілю за допомогою ЕОМ розраховувався поверхневий натяг.

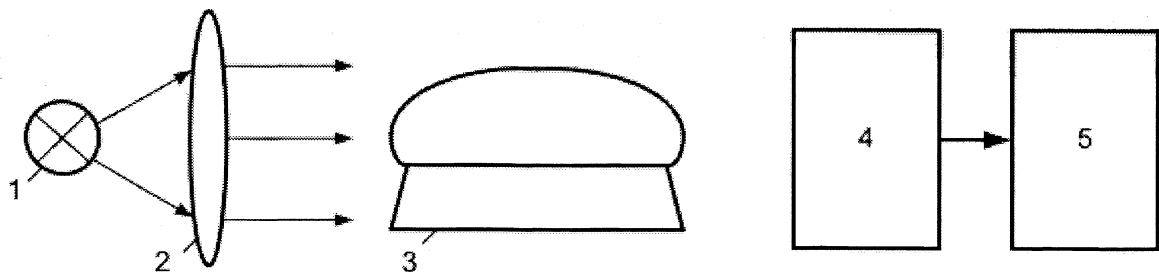
І.С. Кісілем, В.О. Гореловим запропонована нова методика визначення поверхневого натягу, яка полягає в отриманні за допомогою відеотехніки на екрані монітора зображення профілю лежачої краплі (рис. 1.1) [10].

Профіль краплі розбивають на дві симетричні відносно осі z частини, після чого кожену з них розбивають на j горизонтальних ділянок. Розбивку на окремі ділянки здійснюють пропорційно висоті краплі z . Профіль кожної із ділянок оцифровують, тобто за допомогою відеотехніки вимірюють координати z_{jk} і x_{jk} для всіх $j = 1, \dots, m$ і $k = 1, \dots, n$ (m - кількість ділянок на профілі лежачої краплі, n - кількість точок на кожній із ділянок). На основі отриманих таким чином координат $(z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jk})$ і $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$ профіль кожної із j -ділянок (крім профілю, що включає т. О) з достатньою точністю описують у вигляді певної поліноміальної залежності вигляду $z_j = f(x)$. Розраховують значення параметрів $(1/R_1)_j$ і $(1/R_2)_j$ профілю краплі для серединної площини перерізу кожної j -ділянки за винятком ділянки, що включає т. О. На основі отриманих значень $(1/R_1)_j$, $(1/R_2)_j$, $1/b$ розраховують значення поверхневого натягу для кожної із ділянок, після чого знаходять усереднене значення поверхневого натягу. Однак, ця методика має невисоку чутливість через невелику зміну геометричних параметрів при вимірюванні малих значень поверхневого натягу.

Засоби контролю поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі мають схожу будову, основними складовими якої є джерело світла, колімаційна лінза, кювета із краплею, лінза, що збільшує зображення краплі. Головною задачею, яку повинен забезпечувати засіб контролю, є отримання профілю краплі.

В найпростіших засобах зображення отримується в результаті проектування краплі на екран, проте такий підхід придатний лише для грубої оцінки поверхневого натягу і широко не використовується. Використання у засобі контролю вимірювального мікроскопа виправдане при проведенні невеликого числа вимірювань. Коли число точок, що аналізується, більше декількох десятків, процедура вимірювання стає обтяжливою, а час, потрібний для вимірювання координат точок контуру, сумірний із швидкістю випаровування деяких речовин.

Поширеним способом отримання зображення краплі є фотографування, де зображення отримується на фотоплівці. В цьому випадку фотоапарат працює в комплексі з мікроскопом або із плівок отримують фотографії великого розміру, що дозволяє збільшити зображення краплі до 100 разів. Найбільш досконалими є засоби контролю, суть яких полягає у використанні цифрової фото- та відеотехніки, узагальнена структурна схема яких наведена на рис. 1.1.



1- джерело світла, 2 - колімаційна лінза, 3 - кювета із досліджуваною рідиною, 4 - фото- або відеокамера, 5 - ЕОМ

Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема засобу контролю поверхневого натягу, що реалізує метод лежачої краплі

Збільшене за допомогою оптичної системи зображення краплі приймається фото- або відеокамерою, де відбувається його оцифрування. При цьому кожний піксель характеризується певним числом рівнів яскравості. Оцифроване зображення надходить в ЕОМ, де здійснюється його обробка, виділення контуру, вимірювання згідно із обраною реалізацією методу лежачої краплі необхідних геометричних параметрів та розрахунок поверхневого натягу рідини.

В результаті проведеного порівняльного аналізу встановлено, що найбільш ефективним є метод лежачої краплі, який базується на вимірюванні геометричних параметрів лежачої краплі рідини, що сформована на горизонтальній підкладці або у кюветі із загостреною кромкою. В результаті аналізу існуючих методик та засобів вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі встановлено, що засоби вимірювання, функціонування яких базується на фотографуванні менісків та їх проектуванні чи друці у збільшеному масштабі не забезпечують високої точності вимірювання. Те ж стосується використання мікроскопа, оскільки використання його не дозволяє автоматизувати процес вимірювання ПН рідин та робить його обтяжливим для дослідника. Крім того, більшість методик базується на емпіричних та наближених залежностях, що суттєво збільшує похибки вимірювань. На основі вище сказаного актуальною є задача вдосконалення методу, який би забезпечував високу чутливість, точність та мав би широкий діапазон вимірювань. Для реалізації методу використовують дію додаткового, зовнішнього впливу на об'єкт дослідження, в результаті якого відбувається зміна форми меніска і перехід одного з параметрів меніска, що варіюється, через екстремум. Такі методи є більш інформативними, ніж статичні. Зовнішнім впливом може бути електростатичне або магнітне поле, тиск струменю газу, обертовий рух тощо. Реакція зміни геометричних параметрів лежачої краплі на дію електричного та магнітного полів є найменш інертною.

На основі проведеного аналізу прийшли до висновку, що оптимальним є метод лежачої краплі. Він має високу точність, технічну простоту та вимагає невелику кількість досліджуваної рідини.

1.8 Постановка задачі на магістерську роботу

Із вище наведених методів визначення поверхневого натягу простим і ефективним у застосуванні є метод профілю висячої краплі. Його застосування можливе без обмеження на певні види речовин, оскільки даний метод не залежить від кольору і густини речовини, тобто можна досліджувати і нафтові продукти і поверхнево активні речовини.

Тому в магістерській роботі вважається доцільним вибір для визначення поверхневого натягу саме метод профілю висячої краплі. При такому методі є можливим одержання інформації про більшість параметрів досліджуваної речовини.

В процесі виконання магістерської роботи ставились такі задачі:

1. Вибір і обґрунтування і удосконалення методики визначення динамічного поверхневого натягу методом профілю висячої краплі.
2. Розробка методики для визначення поверхневого натягу.
3. Отримання та аналіз профілю досліджуваної поверхні.
4. Розробка методики обробки зображення і виділення контуру.
5. Розробка алгоритму практичної реалізації методу та розробка структурної схеми установки для реалізації цього методу.
6. Метрологічна оцінка розробленого методу.

2 РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПАР

На даний час використання різноманітних методик визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР знайшло широке застосування у багатьох галузях промисловості. Широко застосовується для таких цілей метод висячої краплі, як порівняно простий в реалізації і дослідженнях. В даному розділі виконано удосконалення методики визначення поверхневого натягу на базі методу висячої краплі.

2.1 Теоретичне обґрунтування методу висячої краплі для визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР

Творцями методу висячої краплі прийнято вважати Ендреаса, Хаусера і Такера, що уперше отримали з аналізу профілю висячої краплі, значення поверхневого натягу з прийнятною точністю [10]. Раніше подібні, але безуспішні спроби робилися рядом авторів, зокрема Уортінгтоном і Ферпосоном [11].

Використовувалися висячої краплі з екватором, на профілі яких вимірювали екваторіальний діаметр $2x_e$ і діаметр $2x_{(m)}$ на відстані mx_e (при $m=2$) від вершини краплі (рис. 2.1). Очевидно, що для точного отримання капілярної сталої (і відповідно поверхневого натягу) по цих величинах необхідно вирішити завдання, для чого слід задати дві додаткові умови - в даному випадку умови[^]

$$\varphi|_{x=x_e} = \pi/2, \quad z|_{x=x_e} = z_e$$

Конкретна процедура розрахунку здійснювалася на основі таблиць залежності $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ (остання величина знаходиться з експерименту). Ця залежність була знайдена емпіричним шляхом, а саме, з вимірів діаметрів $2x_e$ і $2x_m$ для різних за розміром і формою крапель води. При цьому величина $x_{(m)}/x_e$ варіювалася від 0,70 до 1,00.

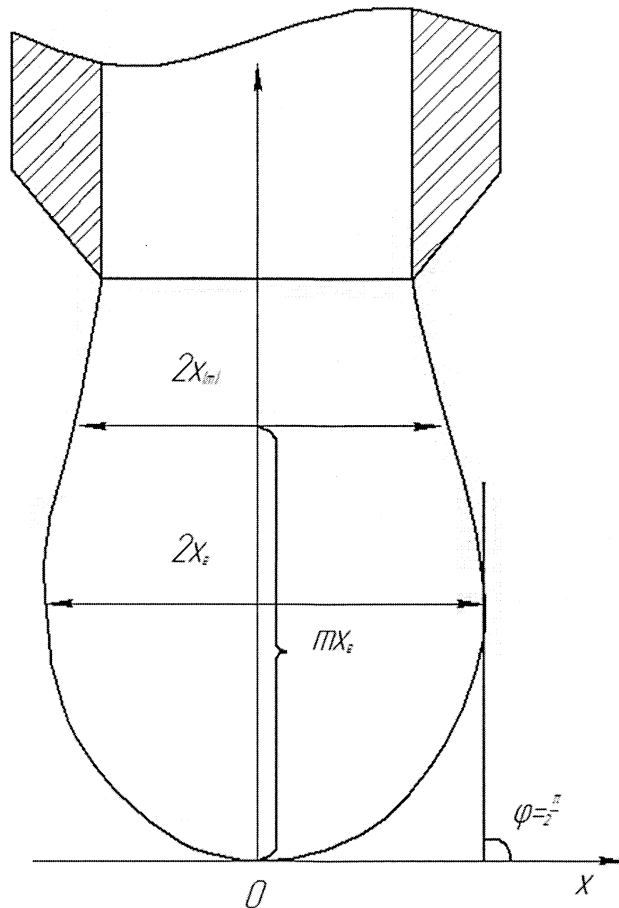


Рисунок 2.1 - Профіль висячої краплі з капіляром

Пізніше отримання залежності $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ також для $m=2$ здійснювалося вже на основі чисельної інтеграції диференціального рівняння

$$d\varphi/d(s/b) + \sin \varphi/(x/b) = 2 + \beta(z/b) \quad (2.1)$$

записаному в відповідному безрозмірному вигляді [12].

Точність отриманих таблиць була вища; крім того, охоплювалась ширша область зміни $X_{(m)}/x_e$: 0,660-1,003; 0,460-0,660; 0,300-0,669.

Мисак на основі табличних залежностей $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ (для $m=2$) отримав набір апроксимаційних формул, кожна з яких добре працює у відповідному інтервалі. Пізніше отримання залежності $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ також для $m=2$ здійснювалося вже на основі чисельної інтеграції диференціального рівняння [13]:

$$T = (0,32720/S^{2,56651}) - 0,97553S^2 + 0,84059S - 0,18069$$

$$\text{(для } 0,401 \leq S \leq 0,46), \quad (2.2)$$

$$T = (0,31968/S^{2,59725}) - 0,46898S^2 + 0,50059S - 0,13261$$

$$\text{(для } 0,46 \leq 5 \leq 0,59\text{)}, \quad (2.3)$$

$$T = (0,31522/S^{2,62435}) - 0,11714S^2 + 0,15756S - 0,05285$$

$$\text{(для } 0,59 \leq 5 \leq 0,68\text{)}, \quad (2.4)$$

$$T = (0,31345/S^{2,64267}) - 0,09155S^2 + 0,14701S - 0,05877$$

$$\text{(для } 0,68 \leq 5 \leq 0,90\text{)}, \quad (2.5)$$

$$T = (0,30715/S^{2,84636}) - 0,69116S^2 + 1,08315S^2 - 0,18341S - 0,20970$$

$$\text{(для } 0,90 \leq 5 \leq 1,00\text{)}, \quad (2.6)$$

де $T = 1/4cx_e^2$, $S = x_{(m)}/x_e$.

Можливості описаного підходу у методі висячої краплі були розширені: разом з екваторіальним діаметром $2x_e$ пропонувалося вимірювати діаметр $2x_{(m)}$ на відстані tx_e від вершини краплі для $m=1,6; 1,8; 2,2$ і $2,4$.

Інший варіант методу краплі, що висить, запропонований Уінкелом. Для його реалізації потрібна крапля з "шийкою", а вимірюваними величинами служать екваторіальний діаметр краплі $2x_e$ і діаметр "шийки" $2x_n$ (рис. 2.2) [14]:.

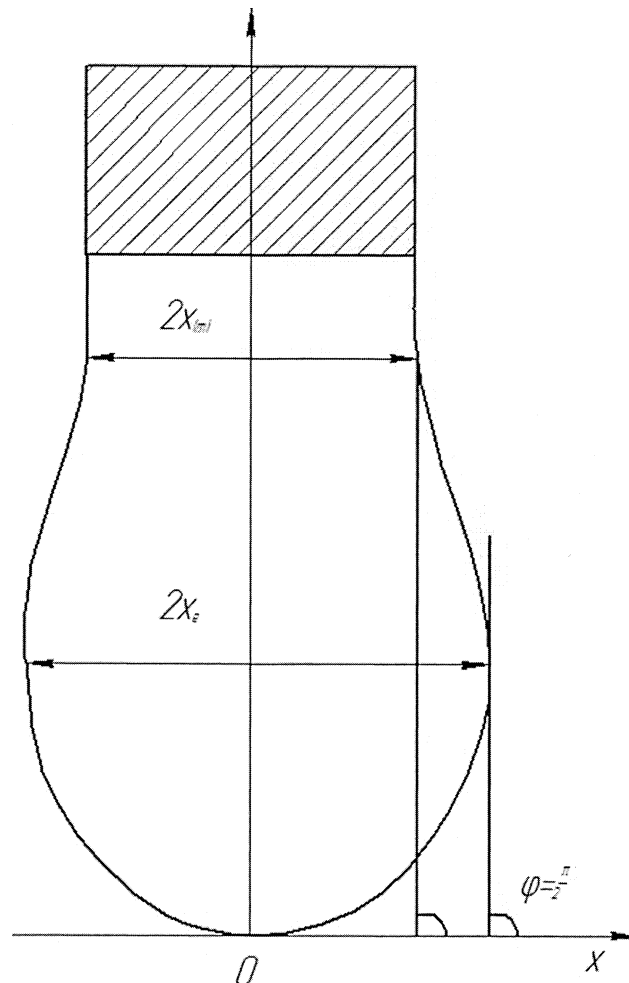


Рисунок 2.2 - Профіль висячої краплі з шийкою

Очевидно, характеризуючи цей варіант умови матимуть вид

$$\varphi|_{x=x_e} = \pi/2, \quad \varphi|_{x=x_n} = \pi/2 \quad (2.7)$$

Схема пошуку величини γ з $2x_e$ і $2x_n$: спочатку знаходиться відношення вимірних в досліді діаметрів, а потім із залежності, пов'язуючої це відношення і безрозмірний екваторіальний діаметр, визначається c і в кінцевому рахунку γ . У зв'язку з тим що сам Уінкел розрахункову таблицю не опублікував, для знаходження γ можна використовувати табличну залежність x_n/x_e від $x_e\sqrt{c}$.

Порівнюючи два варіанти методу, слід зазначити, що варіант Уінкела, незважаючи на труднощі у формуванні стійкої краплі з "шийкою", з експериментальної точки зору точніший, бо вимірювані в ньому незалежні один від одного відрізки $2x_e$ і $2x_n$ мають однакову похибку. У першому ж варіанті діаметр $2x_{(m)}$ визначається з більшою помилкою, ніж екваторіальний діаметр, оскільки до власної помилки $2x_{(m)}$ додається подвоєна помилка вимірів $2x_e$.

Обидва розглянуті варіанти вимагають наявності у краплі екватора. Як і у разі лежачої краплі, на профілі висячої краплі будь-якої форми, визначаються дві пари декартових координат двох довільно вибраних точок 1 і 2: x_1, z_1 і x_2, z_2 (рис. 2.3).

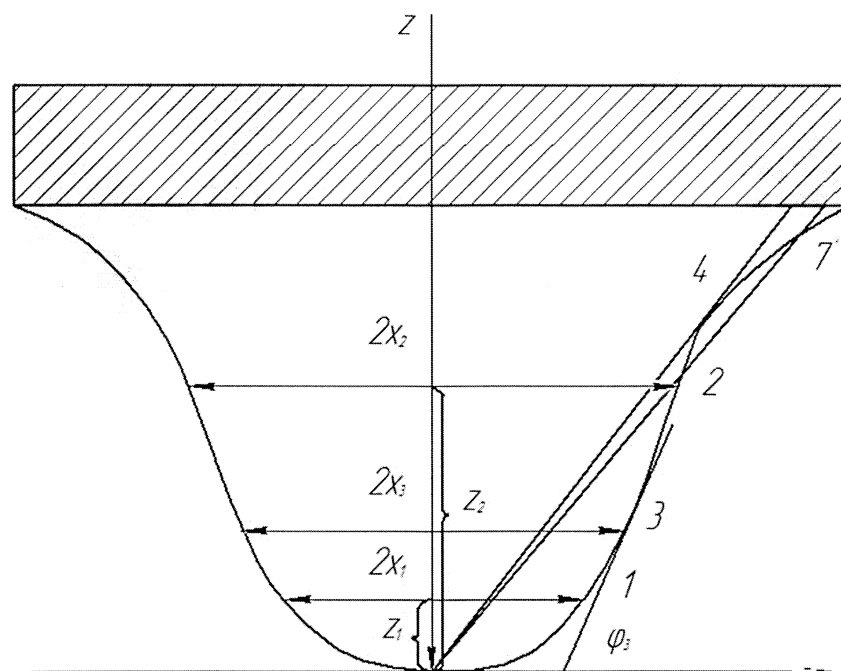


Рисунок 2.3 – Профіль висячої краплі під горизонтальною поверхнею

Крім того, також вибирається деяка точка 3, приблизно відомі координати якої служать як початкові величини для запуску ітераційного механізму пошуку u . Загальна схема розрахункового алгоритму співпадає з описаною в методі лежачої краплі. Зауважимо увагу на специфічну для висячих крапель, особливість. Як неважко помітити з рис. 2.3, на профілі краплі може існувати не одна, а дві точки (2 і 2'). Цей факт, хоча і не відбивається на єдиність рішення задачі, може затрудняти процедуру пошуку γ . Тому у разі наявності на профілі точки 4 (точки торкання профілю прямою, проведеною з вершини краплі) ітераційне коригування параметра B повинно відбуватися у наступному напрямі: якщо в якості другої точки виступає точка 2 (що лежить нижче за точку 4), то при $\zeta_2/\zeta_1 < z_2/z_1$ B повинно збільшуватися; якщо точка 2' - то при $\zeta_2/\zeta_1 < z_2/z_1$ B зменшується.

Для оцінки початкового значення параметра $B^{(0)}$ в загальному випадку (при довільному виборі точки 3) запропоновано використовувати наближене співвідношення [15]:

$$B = 2 \cdot J_1(x\sqrt{c}) / \sin \varphi_3 \quad (2.8)$$

що, очевидно, вимагає оцінок величин φ_3 , $2x_3$ і γ . Зручніше, проте, використовувати в якості 3 точку перегину на профілі із залученням лише наближеного значення кута нахилу дотичної в цій точці φ . Тоді початкове значення $B^{(0)}$ можна оцінити за допомогою формули

$$B = (0,90330 - 0,32144 \cdot \cos A) \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_t/2), \quad (2.9)$$

де

$$A = \varphi_t - 22,77431^\circ \sin \varphi_t. \quad (2.10)$$

Розглянемо ще один варіант методу висячої краплі, який незвичайний тим, що в ньому, на відміну від традиційного способу формування краплі на кінці круглої трубки, використовується конічна насадка [16]. Автор цього варіанту запропонував вимірювати в ході досліду величини x_t і z_t - декартові координати вершини конуса (рис. 2.4).

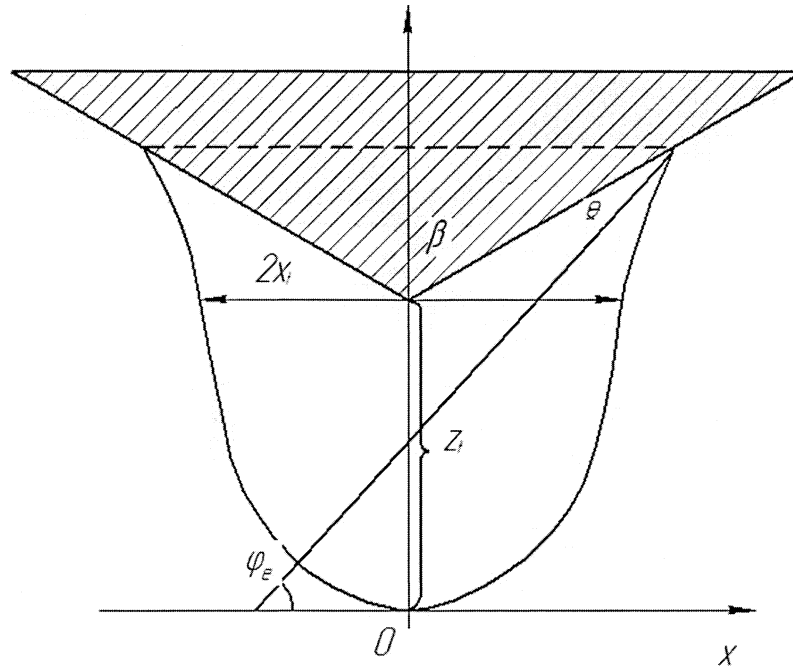


Рисунок 2.4 - Профіль висячої краплі на конічній насадці

При цьому мають бути відомі також крайовий кут змочування θ і характеризуючий форму конуса кут у вершині конуса 2β . З урахуванням згаданих величин пари додаткових умов, що характеризують даний варіант методу, матиме вигляд

$$z \Big|_{x=x_t, z_t, [x/(z-z_t)]} \Big|_{\varphi=\varphi_c=\frac{\pi}{2}-\beta+\theta} = \operatorname{tg} \beta \quad (2.11)$$

Незважаючи на неявний характер умов (2.11), нескладно показати, що вони однозначно забезпечують єдине можливе рішення завдання.

Інколи розглядався випадок, коли досліджувана рідина змочувала матеріал конуса ($\theta = 0$). Тому і розрахункові залежності, за допомогою яких можна знайти c , представлені у вигляді функцій $x_t \sqrt{c}(z_t/x_t)$ і $z_t \sqrt{c}(z_t/x_t)$ для різних значень кута β (30° , 45° , 60° і 75°), даються лише для $\theta = 0$.

Для спрощення розрахунків (правда, з деякою втратою точності) Бабу отримав інтерполяційні поліноміальні формули, що охоплюють велику частину табличного діапазону зміни z_t/x_t [16]:

$$x_t \sqrt{c} = d_1 + d_2(z_t/x_t) + d_3(z_t/x_t)^2 \quad (2.12)$$

$$z_t \sqrt{c} = e_1 + e_2(z_t/x_t) + e_3(z_t/x_t)^2 + e_4(z_t/x_t)^3 + e_5(z_t/x_t)^4 + e_6(z_t/x_t)^5 \quad (2.13)$$

Розглянемо спочатку процес утворення висячої краплі і її відриву від торця товстостінного капіляра, матеріал якого змочується рідиною у краплі, а внутрішній і зовнішній діаметри якого є такими, що в процесі утворення і відриву краплі лінія трьохфазного контакту або досягне зовнішню кромку торця капіляра (рис. 2.5,а), або її не досягне (рис. 2.5,б).

Нехай у початковий момент меніск рідини займає пол. 1. При подачі рідини із відповідною витратою буде переміщення вниз, зберігаючи постійний кут натікання $\theta_{\text{нат.}}$, який в цьому випадку є меншим 90° , досягне внутрішню кромку капіляра (пол.3). Після цього лінія трьохфазного контакту переміститься на горизонтальну поверхню торця капіляра і меніск прийме пол. 5, в якому буде зберігати кут $\theta_{\text{нат.}}$. В подальшому, наприклад, в пол.6 на меніску появиться перегин (т.А) при тому ж куті $\theta_{\text{нат.}}$. Виникнення т. А обумовлено ПЕс, різницею густин $\Delta\rho = \rho_p - \rho_c$, значення кута $\theta_{\text{нат.}}$ і іншими факторами. Можливі ситуації, що навіть до досягнення зовнішньої кромки капіляра на поверхні меніска т. А з перегином в ній профілю не появиться. При подальшій подачі рідини у краплю лінія трьохфазного контакту може дотягнути зовнішньої кромки капіляра (рис. Г. 1 ,а), або її не дотягнути (рис. Г. 1, б). Це також буде залежати від вказаних вище факторів. Допустимо, що лінія трьохфазного контакту досягне зовнішньої кромки. Тоді ця кромка стає “шарніром”, на якому “зависне” крапля, збільшуючись в об’ємі і зберігаючи весь час постійний кут $\theta_{\text{нат.}}$. При цьому на краплі утвориться перешийок, діаметр якого буде меншим від зовнішнього діаметра капіляра і екваторіального діаметра краплі нижче перешийку.

В момент, який обумовлений вказаними вище факторами, а також об’ємомвисячої краплі, переміщення вверх лінії трьохфазного контакту на зовнішній кромці капіляра припиняється, а кут змочування рідиною у краплі матеріалу капіляра почне зменшуватися від $\theta_{\text{нат.}}$ до кута відділення $\theta_{\text{відт.}}$. Як тільки кут змочування стане рівним куту $\theta_{\text{відт.}}$ (рис Г. 1, поз. 10) подальша незначна подача рідини у висячу краплю приведе до початку переміщення лінії трьохфазного контакту до внутрішньої кромки капіляра. Однак цей процес спонтанно приведе до різкого зменшення діаметра перешийку, перетікання певної кількості рідини із верхньої частини висячої краплі у нижню, в

результаті чого всяка крапля “розірветься” на відокремлену краплю і залишковий меніск, який із торцем капіляра утворить кут змочування $\theta_{\text{відт.}}$, а його трьохфазна лінія контакту буде займати теж положення, яке займала всяка крапля у момент її “розриву” на дві частини.

У випадку, коли вказані вище фактори не сприятимуть досягнення лінією трьохфазного контакту зовнішньої кромки капіляра (рис. Г. 1, б) і вона зупиниться на кільцю Б на торці капіляра, тоді кут змочування почне змінюватися від $\theta_{\text{нат.}}$ до кута $\theta_{\text{відт.}}$. Як тільки наступить момент рівності кута змочування куту $\theta_{\text{відт.}}$, аналогічно вказаному вище спонтанно всяка крапля “розірветься” на дві частини: відокремлену краплю і залишковий меніск, площа контакту якого із нижнім торцем капіляра буде такою ж, якою була в момент розриву всякої краплі, а кут змочування буде рівним куту $\theta_{\text{відт.}}$. Утворення наступних всяких крапель і їх “розриви” на дві частини буде відбуватися без зміни площі контакту рідини у краплі з торцем капіляра, тобто по одній трьохфазній лінії контакту.

Процес утворення всякої і відокремленої краплі із рідини, яка не змочує матеріал стінок товстостінного капіляра (рис. 2Г. 2), відбувається таким чином.

При подачі рідини у капіляр меніск із пол.1 переміститься на внутрішню кромку (пол.2) зберігаючи кут $\theta_{\text{нат.}}$, який в даному випадку є більшим 90° . При подальшій подачі рідини у капіляр меніск рідини буде переміщатися по нижньому торці капіляра зберігаючи постійним кут $\theta_{\text{нат.}}$ і може досягти, або не досягти зовнішньої кромки капіляра (фактори, що впливають на такі ситуації, аналогічні для рідин у краплі, що змочує стінки капіляра).

При досягненні зовнішньої кромки остання стає „шарніром”, на якому крапля „зависає”, збільшуючись в об’ємі і за розмірами. При цьому кут змочування також зменшується від $\theta_{\text{нат}}$ до $\theta_{\text{відт.}}$. Як тільки настає момент, коли кут змочування стає рівним куту $\theta_{\text{відт.}}$, незначне поступлення рідини у краплю приводить до її „розриву” на дві частини як і у випадку гідрофільної рідини у краплі з тією лише різницею, що лінія трьохфазного контакту спонтанно відступає до внутрішньої кромки капіляра.

Слід відмітити, що у більшості випадків впливаючі фактори на процес

утворення і „розриву” висячої краплі гідрофобної рідини на дві частини приводять до того, що утворення висячої краплі і її „розрив” відбувається на внутрішній кромці капіляра, або при малих товщинах стінок капілярів рідко на їх зовнішніх кромках. Причому на краплях перешийки, по яких крапля після відступу до внутрішньої кромки „розривається” на дві частини, утворюються спонтанно в момент „розриву” висячої краплі.

Процес утворення наступних висячих крапель із гідрофобних рідин на торцях товстостінних капілярів відбувається аналогічно.

Прилади для вимірювання поверхневої енергії натягу рідин методом лежачої краплі після відповідного доопрацювання їх програмного забезпечення з успіхом можна використовувати і для вимірювання ПЕс рідин методом висячої краплі.

2.3 Розроблення ітераційного методу визначення динамічного поверхневого натягу за методом висячої краплі

Поверхневий натяг широко застосовується, щоб отримати властивості рідких адсорбційних шарів. Розглядуваний метод для визначення поверхневого натягу (ПН) профілю краплі має ряд переваг в порівнянні з іншими методами із таких причин:

а) є безконтактним методом і, отже, має більш високу точність у порівнянні з контактними методами;

б) охоплює дуже великий діапазон формування поверхні від декількох секунд до декількох годин і більше, таким чином, дозволяє досягти рівноважного стану адсорбційних шарів;

в) не вимагає дуже великої кількості досліджуваної рідини і забезпечує легкий контроль температури.

Форма меніска рідини в рідині інтерфейс описується рівнянням, отриманим з рівняння капілярності Лапласа [17]:

$$\sigma \left(\frac{d\varphi}{ds} + \frac{\sin\varphi}{x} \right) = \frac{2\sigma}{b} + \Delta\rho gZ \quad (2.14)$$

де σ - поверхневий натяг; b - радіус кривизни в вершині краплі; $\Delta\rho$ - це різниця щільності між рідиною краплі та навколишнім середовищем; g - гравітаційна

стала прискорення; X, Z - горизонтальною і вертикальною осі, відповідно; S - довжина профілю; ϕ - це кут профілю дотичній по відношенню до горизонтальної осі, як показано на рис. 2.5.

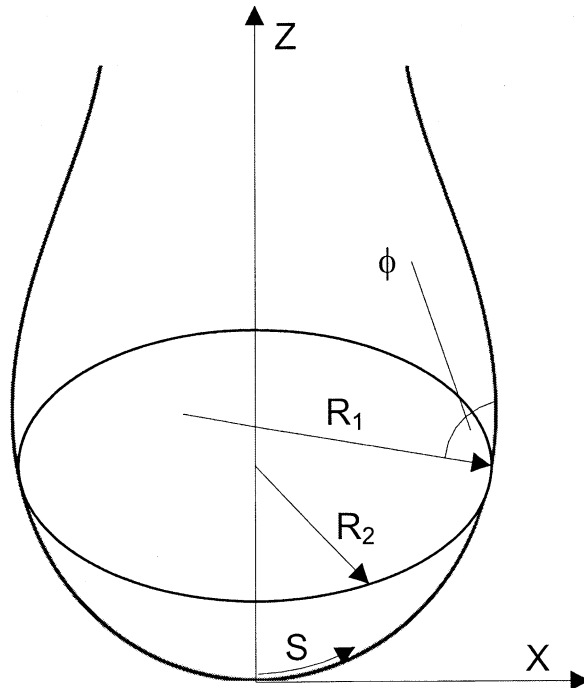


Рисунок 2.5 - Схематичне зображення висячої краплі з осями координати і радіусами кривих

Формула (2.14) являє собою диференціальне рівняння і його для його розв'язання необхідно задати початкові умови:

$$X(0) = 0, Z(0) = 0; \phi(0) = 0. \quad (2.15)$$

Розділивши обидві частини рівняння (2.14) на a/b , ми отримаємо вихідне рівняння для алгоритму розрахунку:

$$\frac{d\phi}{ds} = 2 + \beta z - \frac{\sin\phi}{x} \quad (2.16)$$

де

$$s = \frac{S}{b}, \quad x = \frac{X}{b}, \quad z = \frac{Z}{b} \quad (2.17)$$

є безрозмірними довжиною дуги, горизонтальною і вертикальною координатами відповідно, і

$$\beta = \frac{\Delta\rho g b^2}{\sigma} \quad (2.18)$$

являє собою безрозмірне число Бонда. Воно визначає форму краплі, в той час як b служить коефіцієнтом масштабування. Величина β вважається додатнім

для плоских форм крапель і негативним для видовжених форм [12]. Отже, якщо β і b відомі значення σ визначається як:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho g b^2}{\beta} \quad (2.19)$$

Крім того, будь-яка крива поверхні описується рівняннями

$$\frac{dx}{ds} = \cos\varphi \quad (2.20)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin\varphi \quad (2.21)$$

Формула (2.16) не має точного аналітичного розв'язку. Першу числову інтерпретацію залежності (2.16) було виконано Башфортом і Адамсом [18], які розрахували таблиці профілів для різних значень β . Вони розв'язали тільки пряму задачу розрахунку профілів для заданих значень β , b , $\Delta\rho$, g , яка на даний час розв'язується на комп'ютері за кілька мілісекунд або навіть швидше. Але зворотна задача знаходження значень β і b , які найкращим чином відповідають вихідному профілю ($\Delta\rho$ і g , як передбачається, відомі) є набагато складнішою, хоча інтерполяції з використанням таблиць Башфорта і Адамса можуть бути використані тут також.

Більшість сучасних методів вимірювання поверхневого натягу за аналізом форми меніска ґрунтуються на вирішенні зворотної задачі. Одним із найвідоміших методів є осесиметричний аналіз форми краплі, розроблені в групі А. Неймана [19].

Удосконалений алгоритм визначення поверхневого натягу рідин за аналізом профілю їх меніска зображений на рис. 2.6.

Робота алгоритму починається із формування висячої краплі досліджуваної рідини (блок 1). Після цього йде зчитування зображення з камери комп'ютером. Далі шляхом перетворення зображення фільтрування підвищення контрасту і застосування методики виділення границь отримуємо координати профілю краплі з точністю 1 піксель. За допомогою аналізу границі профілю краплі отримуємо координати профілю (x_e , y_e) із субпіксельною точністю (блок 4).

Для пришвидшення пошуку теоретичного контуру, який найбільш точно відповідає контуру, отриманому експериментально використовується сімейство наперед обчислених теоретичних контурів із відомими значеннями β . Це дає

зможу перед запуском ітераційного циклу оперативно визначити найбільш близькі значення β і b .

В кожному ітераційному циклі по значеннях β і b будується теоретичний профіль (блок 6). Шляхом використання інтерполяційних методів відбувається наближення кожної точки теоретичного контуру до експериментального і обчислюється відхилення точок теоретичного профілю від експериментального. Після застосування інтерполяційних методів відбувається обчислення середнього значення відхилення теоретичного контуру від експериментального:

$$F = \frac{\sqrt{\sum d_i^2}}{N} \quad (2.22)$$

де d_i - відхилення i -тої точки; N - кількість точок.

Числове значення відхилення зберігається і після цього порівнюється із відхиленням із попередньої ітерації. Якщо різниця поточного і попереднього відхилень менша, за задане значення ϵ (блок 10), то відбувається вихід із циклу і обчислюється значення ПН. У іншому випадку відбувається корекція коефіцієнтів β і b , а також параметрів оптимізації і проводиться повторний розрахунок теоретичного профілю і виконання оптимізації (блоки 6-9).

Для подальшого підвищення швидкості розрахунку пропонується використовуватися таблиці попередньо розрахованих профілів у вигляді списку масивів (кожен елемент масиву містить x , t , z). Для нелінійної оптимізації і пропонується алгоритм Левенберга-Марквардта [20]. В якості параметру, по якому відбувається оптимізація використовується середнє значення сум відхилень теоретичного профілю від експериментального:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2 \quad (2.23)$$

Для генерування профілів поверхонь висячої краплі була розроблена програма в середовищі MATLAB, яка приведена в додатку А. Блок-схема роботи програми приведена на рис. 2.9. де було згенеровано серію профілів поверхні краплі для параметрів $\sigma=60$ мН/м, і параметром $b=1-5$ мм. Програма дає можливість генерувати теоретичні профілі профілю краплі і використовувати їх для оптимізаційних алгоритмів.

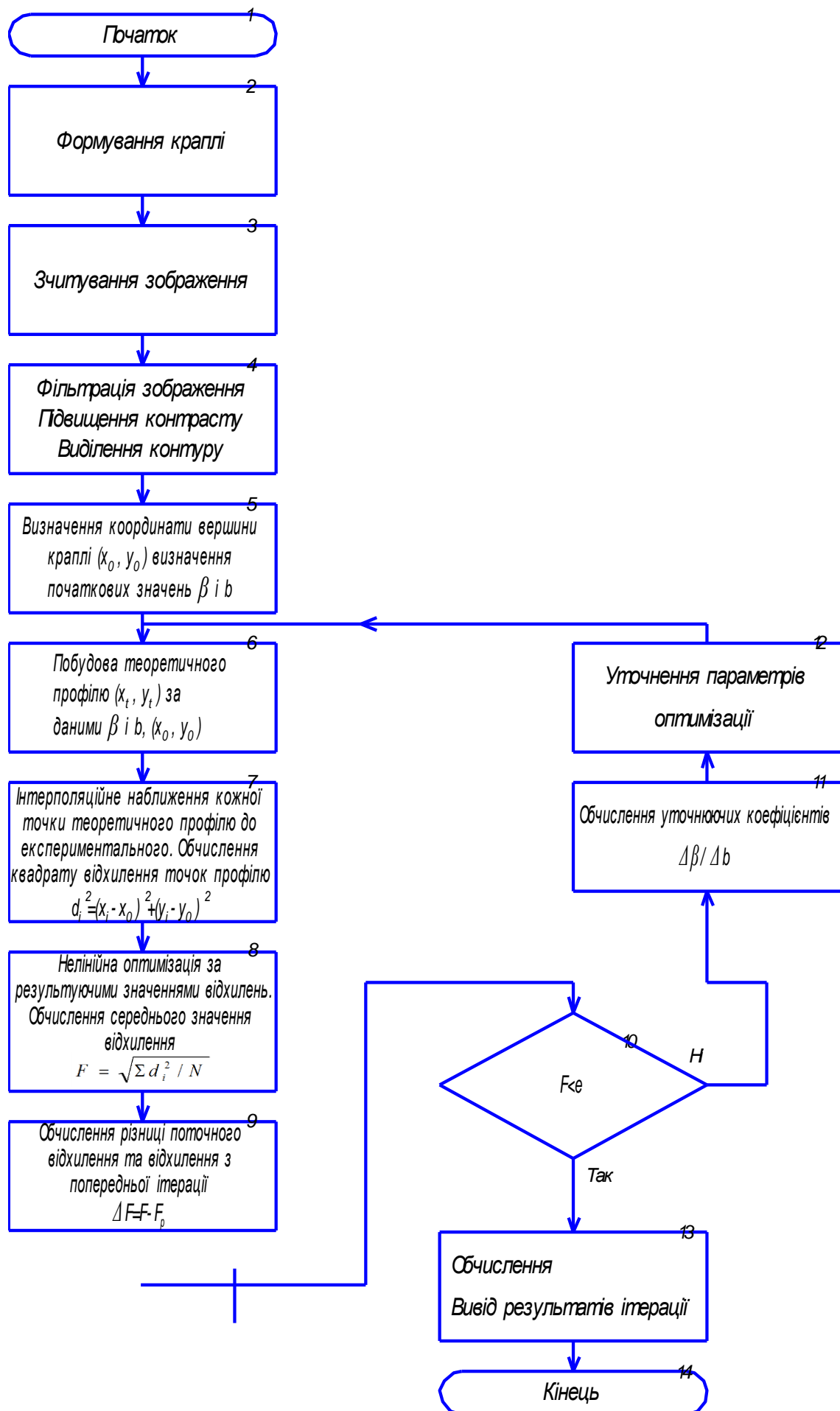


Рисунок 2.6 - Блок-схема роботи методу визначення ПН рідин і розчинів ПАР

2.4 Розробка алгоритму обробки зображення висячої краплі

Використання цифрової фотокамери дозволяє отримувати цифрове зображення краплі, що має такі переваги: можливість комп'ютерної обробки; висока точність вимірювання геометричних параметрів краплі; архівування та збереження зображень краплі, автоматизація процесу вимірювання поверхневого натягу рідини.

Однак зображення висячої краплі, яке фіксується за допомогою цифрової фотокамери, потребує попередньої обробки за допомогою ЕОМ перед проведенням визначення координат точок її профілю [21]. Алгоритм обробки зображення висячої краплі такий :

- виділення необхідного фрагмента;
- фільтрація зображення;
- підвищення контрасту;
- виділення контуру;
- бінаризація;
- згладжування.

На сьогоднішній день відомо ряд методів обробки зображення, які призначені для вирішення конкретних задач. В зв'язку з цим необхідно проаналізувати ці методи обробки зображення лежачої краплі та вибрати найкращі.

2.4.1 Виділення необхідного фрагмента та фільтрація зображення висячої краплі

Для скорочення інформаційної надлишковості зображення, необхідно виділити фрагмент краплі, яка знаходиться у кюветі. Виділення здійснюється по нижній кромці та зовнішньому діаметру кювети (рис. Д.1).

Для приглушення шуму, що має місце на зображенні, використовуються низькочастотні фільтри. Існують лінійні та нелінійні фільтри [22]:.

Лінійні фільтри реалізуються лінійним перетворенням у вигляді прямокутної матриці форматом $N \times N$. N може дорівнювати 3, 5, 7, і т. д. Наприклад, при $N=3$

$$H = 1K \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix},$$

де K - множник, що нормує, a_{kl} -ваговий множник.

З фізичної точки зору лінійні фільтри є фільтрами нижніх частот (фільтрами, що усереднюють), які знижують величину високочастотних гармонік як шуму, так і корисного зображення. Це приводить не лише до послаблення шуму, але і до розмиття контурів зображення. Для усунення ефекту розмиття контурів при зниженні величини шуму необхідно переходити до нелінійної обробки.

Прикладом нелінійного фільтра є медіанний фільтр. Медіанна фільтрація здійснюється шляхом руху деякої апертури (маски) вздовж дискретного зображення та заміни значення центрального елемента маски медіанним значенням вихідних елементів всередині апертури. Медіаною дискретної послідовності x_1, x_2, \dots, x_L для непарного L називають такий її елемент, для якого існують $(L - 1)/2$ елементів, менших або рівних йому за величиною, та $(L - 1)/2$ елементів, більших або рівних йому за величиною. Тобто, медіаною є середній по порядку член ряду, який отримується при впорядкуванні вихідної послідовності. Наприклад, при використанні маски 3×3 медіаною дискретної послідовності є значення п'ятого елемента. При медіанній фільтрації значення, спотворене шумовим викидом, замінюється на медіанне - викид на зображенні повністю придушений.

На рис. Д.2 наведений фрагмент лінійної та нелінійної фільтрації.

Характерною особливістю медіанного фільтра є збереження перепадів яскравості (контурів). При цьому, якщо перепади яскравості великі в порівнянні з дисперсією адитивного білого шуму, то медіанний фільтр дає менше значення СКВ в порівнянні з оптимальним лінійним фільтром. Особливо ефективним медіанний фільтр є у випадку імпульсного шуму. Отже, для обробки зображення краплі обрано медіанну фільтрацію, оскільки вона має такі переваги перед лінійною: зберігає різкі перепади (границі); ефективно згладжує імпульсний шум; не змінює яскравість фону.

2.4.2 Підвищення контрасту та виділення контуру висячої краплі

Слабий контраст - найбільш поширений дефект фотографічних і телевізійних зображень, зумовлений обмеженістю діапазону відтворених яскравостей. Під контрастом розуміють різницю між максимальним і мінімальним рівнями півтонів у деякій області зображення, наприклад, у вікні (локальна контрастність) або всього зображення (глобальна контрастність). Шляхом збільшення контрастності можна покращити роздільну здатність окремих елементів зображення або зменшити спотворення, викликані впливом умов отримання зображень в оптико-електронних перетворювачах [23, 24].

Одним з методів покращення контрасту є лінійне розтягування гістограми, коли рівням вихідного зображення, що лежать в інтервалі $[L_{\min}, L_{\max}]$, присвоюються нові значення, щоб охопити весь можливий інтервал зміни яскравості, в цьому випадку $[0, 255]$.

Контраст можна покращити, використовуючи нормалізацію гістограми [25]. При цьому на весь максимальний інтервал рівнів яскравості $[0, 255]$ розтягується не вся гістограма, що лежить в межах від L_{\min} до L_{\max} , а її найбільш інтенсивна ділянка $[L_{\min}', L_{\max}']$

Метою вирівнювання гістограми (цю процедуру також називають лінеаризацією та еквалізацією) є таке перетворення, щоб, в ідеалі, всі рівні яскравості набули б однакової частоти, а гістограма яскравостей відповідала би рівномірному закону розподілу.

На основі проведеного аналізу відомих джерел для підвищення контрасту зображення краплі обрано метод нормалізації гістограми.

Задача виділення контуру полягає в побудові зображення границі об'єкта та контурів однорідних областей. Методи виділення контурів можна класифікувати на методи високочастотної фільтрації, просторового диференціювання та функціональної апроксимації. Спільним для всіх цих методів є розгляд межі як області різкого перепаду функції яскравості зображення, відрізняються вони математичною моделлю поняття границі та алгоритмом пошуку граничних точок. У відповідності з поставленими задачами до алгоритмів виділення контурів ставляться такі вимоги: виділені контури

повинні бути найтоншими, без розривів та замкнутими. Однак це не завжди досягається, в більшості випадків контури отримуються незамкнутими і, як наслідок, не придатними для ряду процедур аналізу.

Існує велика кількість операторів, які здійснюють виділення контуру. До них відносяться оператор Робертса, Лапласа, Собела, Кені, Уоллеса, Кірша тощо [26]. Робота цих операторів була реалізована програмним шляхом і показана на рис. Д.3.

Отже, на основі проведеного аналізу операторів виділення контуру, видно, що оператор Собела реалізує найбільший перепад яскравості, що забезпечує вибір порогу бінаризації на основі знаходження піків шляхом порівняння всіх локальних максимумів. Але цей оператор не дозволяє виділити контур із субпіксельною точністю

В роботі запропоновано метод субпіксельного визначення координат краплі в результаті використання однонаправлених масок низькочастотних гауссових фільтрів відповідної орієнтації, що дозволяє отримати характерні точки перетину ліній межі контуру, які отримані до початку фільтрування і після фільтрування точок.

В способах встановлення визначення межі контурів вона встановлюється за великим градієнтом зміни яскравості контуру меніска.

Тобто, треба знайти такі точки, для яких Суть такого підходу полягає в пошуку точок, в яких градієнт зміни яскравості контуру меніска є максимальним.

Щоб задовольнити цю умову використовують оператор т. зв. лапласіан. Тільки використання лапласіана дозволяє визначати координати точок контуру меніска з похибкою 0,5 пікселя (пкс).

Тому у запропонованому методі використовуємо градієнт для того, щоб встановити область максимального градієнта зміни яскравості контуру меніска, а також для встановлення градієнта, тобто, характеру кривизни поверхні.

Модуль градієнта зображення межі контуру меніска $f(x,y)$ у точці (x,y) можна визначити згідно виразу [25]:

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2.24)$$

а напрям вектора градієнта, тобто кут $a(x,y)$ між напрямом вектора ∇f в точці (x, y) і віссю x визначається

$$a(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (2.25)$$

Це визначає орієнтацію градієнта зміни яскравості контуру меніска: горизонтальну, вертикальну чи під кутом.

Похідна від яскравості світла $I(x)$ на межі зображення (у точці x_0) описується

$$\frac{dl(n)}{dn} = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_n^2}} \quad (2.26)$$

де A - константа, що характеризує максимальне значення перепаду яскравості відбитого світла; σ_n - середньоквадратичний розподіл перепаду яскравості відбитого світла на межі; x_0 - координати межі.

З іншої сторони зображення на практиці, як правило, згладжується гауссовим фільтром. Гауссіан не є єдиним ядром розмивання, але має ряд важливих особливостей. По-перше, ядра гауссіана є розділяючими, тобто згортка з ядром фільтра еквівалентна згортці з двома одновимірними ядрами - за напрямком x та за напрямком y . Отже, гауссіан можна факторизувати, отримавши добуток двох одновимірних гауссіанів. По-друге, виконуючи згортку гауссіана з гауссіаном, можна отримати ще один гауссіан. Тобто, можна отримати дуже згладжене зображення, повторно згладивши згладжене зображення. І по-третє, в результаті згладжування зображення можна отримати спільні точки перетину ліній межі контуру меніска вхідного та фільтрованого зображення.

Тоді функція розсіювання за законом Гаусса для такої примежової кривої буде мати вигляд

$$G(x) = \frac{\Delta I}{(I_{max} - I_{min})\Delta x} \exp\left(-\frac{x^2 \pi \Delta I^2}{(I_{max} - I_{min})^2 \Delta x^2}\right) \quad (2.27)$$

де I_{max} - максимальне значення яскравості ліній межі контуру меніска;
 I_{min} - мінімальне значення яскравості ліній межі контуру меніска;

ΔI - максимальна зміна яскравості ліній межі контуру меніска між двома сусідніми пікселями матриці опто-електронного перетворювача, відстань між якими рівна $\Delta x = 1$.

За допомогою виразу (2.27) можна визначити функцію розсіювання для довільного лінії межі, а сама лінія межі контуру меніска визначається:

$$H^*(x) = \frac{\Delta I}{(I_{max} - I_{min}) \Delta x_{-\infty}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2 \pi \Delta I^2}{(I_{max} - I_{min})^2 \Delta x^2}\right) dx \quad (2.28)$$

Відповідно функцію (2.27) можна зобразити як маску розмірністю 3 x 3, 5x5 і т. д., що має згладжувальні властивостями з невід'ємними коефіцієнтами та одночасно фільтрує низькі частоти згідно виразу.

$$g(x, y) = \frac{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x+s, y+t)}{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t)} \quad (2.29)$$

де $a=(m-1)/2$ та $b=(n-1)/2$; $W(S, T)$ - коефіцієнти маски з відносними значеннями координат.

Щоб сусідні пікселі до лінії межі контуру меніска не впливали на саму лінію межі застосовують одиничні однонаправлені маски, які отримують з (2.27), що дозволяє згладжувати лінію межі по всіх напрямках.

Використання функцій (2.27)– (1.29) дозволяє одержати спільні точки перетину x_0 ліній межі контуру меніска вхідного та фільтрованого зображення, що ілюструє рис. Е1.

Координати точки x_0 перетину ліній межі контуру меніска визначаються за виразом :

$$X_0 = Nd_n + \frac{(I_N^1 - I_N) \cdot dn}{(I_{N+1} - I_N) - (I_{N+1}^1 - I_N^1)} \quad (2.30)$$

де d_n - відстань між пікселями, n – номери пікселів.

Аналогічно визначаються точки y_0 перетину ліній межі контуру меніска в поперечному перерізі $f(t-l)$ і $f(t+l)$.

Таким методом можна визначати геометричні параметри профілів менісків, використовуючи вищенаведену методику. При цьому виконуються такі етапи:

-реєстрація зображення менісків за допомогою опто-електронного перетворювача і запам'ятовування їх в пам'яті комп'ютера з одночасним відображенням на екрані монітора;

-визначення функції інтенсивності сигналу по координатах на екрані;

- встановлення області максимального градієнта зміни яскравості контуру меніска;
- здійснення фільтрування низьких частот, використовуючи вираз (2.29);
- визначення спільних точок перетину ліній межі контуру меніска вхідного та фільтрованого зображення координати спільної точки;
- визначення координат точок лінії профілю меніска.

Проблема отримання контура меніска полягає в побудові бінарного зображення в результаті порогової обробки, яка передбачає розділення всіх відліків зображення на два класи, за ознакою яскравості: об'єкт і фон [8, 25, 26]. Вибір порога можна робити вручну і автоматично.

При автоматичному виборі використовується гістограму, яка є діаграмою густини ймовірностей яскравостей спільних точок перетину ліній межі контуру меніска після фільтрації зображення. Так як в крайніх точках, що є спільними точками перетину ліній межі контуру меніска після фільтрації зображення, градієнт є максимальним, то його використовують як порогове значення.

На рис. Д.4, а наведена гістограма яскравості зображення точки на лінії межі контуру, де окремо є фон та точка. На рис Д.4, б - гістограма вже фільтрованого зображення точки тв. фону, вони мають меншу густину яскравості, але форма гістограми подібна. На рис. Д.4, в наведена гістограма спільних точок перетину ліній межі контуру меніска після фільтрації, але після визначення порога. Після вибору порог I_0 , отримують зображення точок за формулою

$$g(x, y) = \frac{f^2(x, y)}{I_0} \quad (2.31)$$

Встановлення ліній межі контуру меніска здійснюється на перетині лінії вхідного зображення та зображення, що було отримане за формулою (2.31)

$$h(x, y) = \begin{cases} 1, \text{ при } g(x, y) = f(x, y) \\ 0, \text{ при } g(x, y) \neq f(x, y) \end{cases} \quad (2.32)$$

Вищенаведені етапи дозволяють здійснити виділення лінії контура краплі, чи іншого меніска.

На рис. Д.5 а-г показано зображення профілів краплі та етапи одержання контуру, а також виділений контур краплі за допомогою оператора Собела (рис.

Д.5,д). Отриманий таким способом профіль краплі є чіткою тонкою лінією (рис. Д.5.в),

2.4.3 Бінаризація зображення висячої краплі.

Більшість задач обробки зображення пов'язані з перетворенням напівтонового зображення в бінарне (двоградаційне). Таке перетворення здійснюється для того, щоб скоротити інформаційну надлишко-вість зображення, залишити в ньому лише ту інформацію, яка потрібна для подальшої обробки та для перетворення напівтонового зображення (що має багато градацій яскравості) в бінарне. В бінарному зображенні повинні бути збережені деталі, що нас цікавлять (наприклад, контур зображених об'єктів), та виключені несуттєві моменти (фон). Бінарне зображення отримується в результаті порогової обробки напівтонового зображення. Воно полягає в розділенні всіх елементів зображення на два класи за ознакою яскравості: об'єкт і фон. При цьому виконується поелементне перетворення виду:

$$Lg(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \text{при } Lg(n_1, n_2) \geq L_0 \\ 0 & \text{при } Lg(n_1, n_2) < L_0 \end{cases} \quad (2.33)$$

де $L_g(n_1, n_2)$ - вихідне значення яскравості в точці з координатами n_1, n_2 ; $L(n_1, n_2)$ - вхідне значення яскравості; L_0 - деяке „порогове” значення яскравості.

Широкий клас процедур обробки зображень називається препаруванням, яке полягає в перетворенні зображення до вигляду, зручного для машинного аналізу. Операції препарування здійснюються за допомогою поелементних перетворень спеціальних видів. Так, окремим випадком препарування є бінаризація. Використовується і багато інших функцій поелементного перетворення.

До функцій поелементного перетворення відноситься перетворення „зрізу” яскравості, яке дозволяє виділити певний інтервал діапазону яскравостей вхідного зображення. Переміщуючи „робочий” інтервал по шкалі та змінюючи його ширину, можна визначити, які значення яскравості є на зображенні (і в яких точках), а яких не має, провести візуальний аналіз окремих зображень об'єктів, що відрізняються за яскравістю. Деталі, що не потрапляють у вказаний

інтервал, тобто які відносяться до фону, відкидаються. Для препарування зображень також використовують такі по-елементні перетворення: зріз яскравості із збереженням фону, неповну порогову обробку, контрастне масштабування, пилкоподібне контрастне масштабування.

На основі проведеного аналізу поелементних перетворень при препаруванні встановлено, що найбільш ефективним є бінаризація.

На сьогоднішній день існують потужні пакети для обробки зображення (Photoshop, Photostyler, Coral тощо), які дозволяють виділяти контур об'єктів, використовуючи фільтри, принцип дії яких заснований на розглянутих вище та інших відомих методах. Проте ці фільтри не виконують одночасно з виділенням контура бінаризацію зображення. Для реалізації такої процедури була розроблена програма побудови бінарного зображення контурів краплі, яка здійснює медіанну фільтрацію, підвищення контрасту шляхом нормалізації гістограми, виділення контуру методом низькочастотної фільтрації та бінаризацію. При цьому важливим є правильний вибір порога. При надто високому порозі можуть з'явитися розриви контурів, а слабкі перепади яскравості не будуть виявлені. При надто низькому порозі через шуми та неоднорідності областей можуть з'явитися хибні контури. Визначення порога бінаризації пропонується проводити за алгоритмом вибору порога, заснованому на знаходженні основних піків гістограми шляхом порівняння всіх локальних максимумів. Після знаходження глобального максимуму M_0 для всіх локальних максимумів розраховується співвідношення:

$$p_6 = \frac{M_1}{m_1 - 1}$$

де M_1 - значення першого локального максимуму; m_1 - значення глобального мінімуму в діапазоні між глобальним максимумом та розглядуваним локальним.

Той з локальних максимумів, для якого значення p_6 виявиться найбільшим, вибирається в якості другого основного піку гістограми, після чого знаходиться поріг бінаризації. Бінаризація здійснюється по порозу з використанням співвідношення (2.32).

Згладжування виділених контурів дозволяє усувати розриви та виключати хибні контурні лінії. Таким чином, шляхом використання сучасних методів обробки зображення існує можливість отримання контура висячої краплі, а отже підвищити точність знаходження геометричних параметрів меніска.

2.4 Розроблення структурної схеми приладу

Функціональна схема пристрою складається з: блоку живлення БЖ, блоку комутації БК, блоку формування краплі БФК, вимірювальної камери ВК, джерела освітлення ДЖ, камери К, капіляра КАП, мікрошприца МК і персонального комп'ютера ПК (МР.МТТм-01.00.000С2). Блок формування краплі, який включає 2 крокових двигуна, разом з мікрошприцом формує на нижньому торці капіляра каплю досліджуваної рідини. Крапля знаходиться у вимірювальній камері, яка складається з резервуара з прозорого скла і кришки для запобігання зовнішнього впливу на краплю. Резервуар розміщується на предметному столику.

Складальне креслення мікрошприца запропоноване, він складається з корпусу та кришки, які кріпляться один до одного різьбовим з'єднанням. Також є 2 фіксатора з'єднані з корпусом гвинтами. Посередині вал який обертається з зовнішньою різьбою зверху для під'єднання крокового двигуна і виступами збоку для запобігання витягування вала. Всередині знаходиться виступ з різьбою який з'єднаний з циліндром. Він здійснює обертово-поступальний рух і тисне на поршень. Один оберт циліндра дорівнює одному міліметру просуванню поршня. Через особливу конструкцію поршня він не здійснює обертальний рух. Внизу мікрошприца знаходиться кріплення для капіляра, через отвір якого і поступає досліджувана рідина.

Для отримання якісного зображення краплі використовується джерело рівномірного освітлення. Зміна яскравості джерела світла впродовж вимірювання викликатиме неоднорідність окремих кадрів зображення, що небажано з метрологічної точки зору. В якості джерела світла запропоновано лампу розжарювання, яка розташовується паралельно головній осі камери. Створення паралельного пучка променів здійснюється за допомогою

коліматора та матового світлофільтра, який приєднується до джерела світла і складають разом оптичну систему джерела освітлення.

Для реєстрації зображення використовується камера, яка розміщується на штативі для зняття профілю зображення краплі. Штатив забезпечує статичне положення камери, а, отже, точне наведення на різкість зображення.

Блок формування, камера і джерело освітлення з'єднані з блоком комутації, який, у свою чергу, з'єднаний з персональним комп'ютером. Програмне забезпечення на комп'ютері дозволяє бачити краплю і значення поверхневого натягу в реальному часі.

Реалізація удосконаленого методу визначення поверхневого натягу полягає у циклічному визначенні поверхневого натягу з дискретністю 0.5-1 с. Це дає змогу досліджувати рідини з малою концентрацією ПАР. В результаті досліджень отримуємо графік залежності ПН від часу. За цим графіком можна судити про вміст ПАР та характер процесу адсорбції молекул ПАР на поверхню рідини. Шляхом визначення площі або об'єму краплі можна реалізовувати контроль за об'ємом досліджуваної краплі і в разі потреби виконувати корекцію цього об'єму дозуючим пристроєм. Це дає змогу проводити дослідження тривалістю до декількох годин.

2.5.1 Розробка програмного забезпечення

Застосунок MatLab - засіб для роботи з математичними матрицями, малювання функцій, роботи з алгоритмами, створення робочих оболонок з програмами в інших мовах програмування. Дане програмне середовище забезпечує швидке отримання результатів завдяки своїй багатофункціональності.

Робота з MatLab зводиться до реалізації сукупного алгоритму обробки зображення краплі за визначеною методикою та послідовним виконанням функцій, які реалізують дану методику.

Алгоритм реалізує обробку зображення краплі, яке реєструється в момент, що передуює настанню нестійкого стану, та має екстремальні геометричні параметри. Обробка зображення полягає у фільтрації з використанням

медіанного фільтра, підвищення контрасту шляхом нормалізації гистограми, бінаризації та виділення контура методом низькочастотної фільтрації.

Останній крок - методом оптимізації підбираються параметри теоретичних кривих таким чином щоб теоретичний профіль і експериментальний співпадали. Таким чином визначається ПН та інші інформативні параметри краплі.

Інтерфейс; програми показано в додатку Є.

2.7 Використання поверхневого натягу для визначення адсорбції в розчинах ПАР

Одним з найбільш актуальних способів використання поверхневого натягу - дослідження адсорбції в рідинах.

У рідких розчинах поверхневий натяг σ є функцією від концентрації розчиненого речовини. На рис. 2.7 представлені три можливих залежності поверхневого натягу від концентрації розчину (т.зв. ізотерми поверхневого натягу). Речовини, додавання яких до розчинника зменшує поверхневий натяг, називають поверхнево-активними (ПАР), речовини, додавання яких збільшує або не змінює поверхневий натяг - поверхнево-неактивними (ПНАР).

Зменшення поверхневого натягу і, отже, поверхневої енергії відбувається в результаті адсорбції ПАР на поверхні поділу рідина - пара, тобто того, що концентрація поверхнево-активної речовини в поверхневому шарі розчину виявляється більше, ніж у глибині розчину.

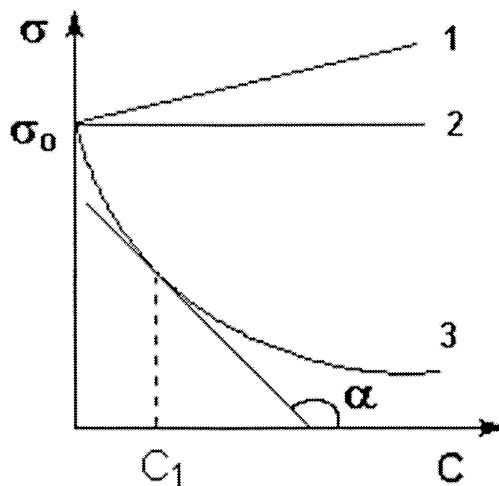


Рисунок 2.7 - Ізотерми поверхневого натягу розчинів ПНАР (1,2) і ПАР (3)

Кількісною мірою адсорбції на кордоні розчин-пар є поверхневий надлишок Γ (гамма), рівний числу молей розчиненої речовини в поверхневому шарі. Кількісне співвідношення між адсорбцією (поверхневим надлишком) розчиненої речовини і зміною поверхневого натягу розчину із зростанням концентрації розчину визначає ізотерма адсорбції Гіббса:

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial c} \quad (2.61)$$

Графік ізотерми адсорбції ПАР представлений на рис. 2.8.

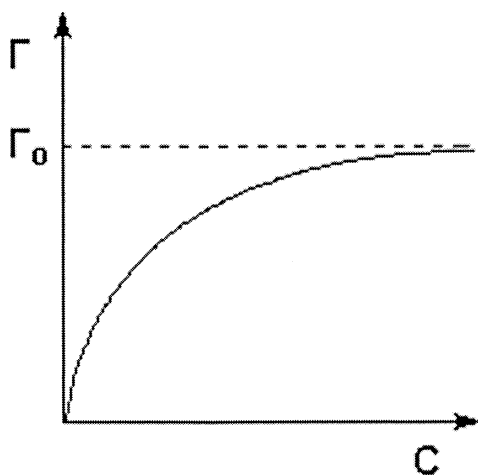


Рисунок 2.8 - Ізотерма адсорбції ПАР на межі розчин – ПАР

З рівняння (2.61) випливає, що напрямок процесу - концентрування речовини в поверхневому шарі або, навпаки, знаходження його в обсязі рідкої фази - визначається знаком похідної $d\sigma/dc$. Негативна величина даної похідної відповідає накопиченню речовини в поверхневому шарі ($\Gamma > 0$), позитивна - меншій концентрації речовини в поверхневому шарі в порівнянні з його концентрацією в об'ємі розчину.

Величину $g = -d\sigma/dc$ називають також поверхневою активністю розчиненої речовини. Поверхневу активність ПАР при деякій концентрації C_1 визначають графічно, проводячи дотичну до ізотерми поверхневого натягу в точці $C = C_1$ при цьому поверхнева активність чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної до осі концентрацій:

$$g = -\frac{\partial \sigma}{\partial c} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.62)$$

Неважко помітити, що із зростанням концентрації поверхнева активність

ПАР зменшується. Тому поверхневу активність речовини зазвичай визначають при нескінченно малій концентрації розчину, В цьому випадку її величина, що позначається g_0 , залежить тільки від природи ПАР і розчинника. Досліджуючи поверхневий натяг водних розчинів органічних речовин, Траубе і Дюкло встановили для гомологічних рядів поверхнево-активних речовин наступне емпіричне правило: у будь-якому гомологічному ряду при малих концентраціях подовження вуглецевого ланцюга на одну групу CH_2 збільшує поверхневу активність в 3 - 3.5 рази.

Для водних розчинів жирних кислот залежність поверхневого натягу від концентрації описується емпіричним рівнянням Шишковського:

$$\Delta\sigma = b \cdot \ln\left(\frac{c}{K} + 1\right) \quad (2.63)$$

де b і K - емпіричні постійні, причому значення b однаково для всього гомологічного ряду, а величина K збільшується для кожного наступного члена ряду в 3 - 3,5 рази.

Молекули більшості ПАР володіють дифільною будовою, тобто містять як полярну групу, так і неполярний вуглеводневий радикал. Розміщення таких молекул в поверхневому шарі енергетично найбільш вигідно за умови орієнтації молекул полярної групою до полярної фази (полярної рідини), а неполярної - до неполярної фази (газу або неполярної рідини). При малій концентрації розчину тепловий рух порушує орієнтацію молекул ПАР, при підвищенні концентрації відбувається насичення адсорбційного шару і на поверхні розділу фаз утворюється шар "вертикально" орієнтованих молекул ПАР (рис. 2.9). Утворення такого мономолекулярного шару відповідає мінімальній величині поверхневого натягу розчину ПАР і максимальному значенню адсорбції Γ (рис. 2.7 - 2.8); при подальшому збільшенні концентрації ПАР в розчині поверхневий натяг і адсорбція не змінюються.

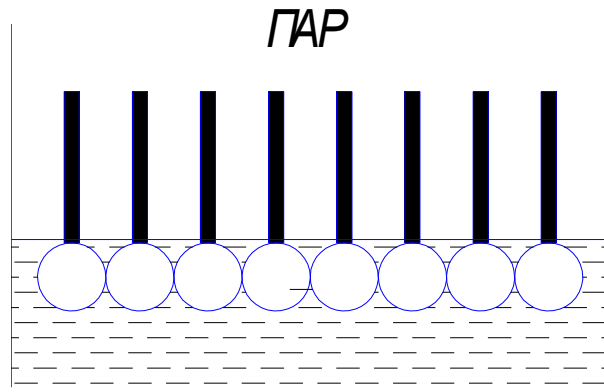


Рисунок 2.9 - Орієнтація молекул ПАР в поверхневому шарі при досягненні рівноважного стану

3 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДОМИХ МЕТОДУ І ПРИБЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН ТА РОЗЧИНІВ ПАР

Кожний новий розроблений засіб вимірювання мусить бути оцінений з точки зору, яку похибку він внесе у вимірювальний результат. Похибка приладу може визначатися шляхом порівняння результатів, одержаних з його використанням, із результатами, які одержані з використанням засобу вимірювання, точність якого відома і невідома вища. Якщо ж такого взірцевого приладу немає, то для метрологічних досліджень використовують метод структурного аналізу, що полягає в розкладанні сумарної похибки на окремі складові, які визначаються аналітично або експериментально.

Однією із основних характеристик вимірювального приладу є його точність, що оцінюється похибкою, що являє собою різницю між показами приладу і істинним значенням вимірюваної величини $y_0(t)$, тобто

$$\Delta y(t) = y(t) - y_0(t) \quad (3.1)$$

Для оцінки похибок введемо поняття істинного значення вимірюваної величини

$$y_0(t) = F[x, \xi_0, q_0, (v_0, \eta_0), v_0] \quad (3.2)$$

де x, q, ξ, v, η, v - збурюючі фактори.

Розкладаючи функцію (3.2) у ряд Тейлора за малими приростами $\Delta q, \Delta \xi, \Delta v, \Delta \eta, \Delta v$ знайдемо похибку [30]

$$\Delta y = \frac{\partial F}{\partial \xi} \Delta \xi + \frac{\partial F}{\partial q} \Delta q + \frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \eta} \Delta \eta + \frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial F}{\partial v} + f(t), \quad (3.3)$$

де $f(t)$ - частина загальної похибки, що включає динамічну похибку і неточне задання функції перетворення.

Похибки приладів у залежності від ознак, що покладаються в основу класифікації, можна розділити на наступні групи:

Якщо в основу класифікації закласти повторюваність похибок при багатократних вимірюваннях, то усі похибки можна розділити на систематичні і випадкові.

Систематичні похибки при багатократних вимірюваннях в однакових

умовах залишаються постійними або змінюються закономірно. їхня поява може бути викликана недосконалістю методів вимірювання, схем і конструкцій приладів. Вплив систематичних похибок може бути наперед встановлений і врахований. У сучасних приладах систематичні похибки компенсуються автоматично або враховуються при обробці результатів вимірювань.

Випадковою називають похибку, що змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Виникнення випадкових похибок зумовлене випадковими змінами параметрів приладів, впливом зовнішніх випадкових збурень, недосконалістю технології вимірювання і т. д.

У залежності від причин, що породжують похибки, розрізняють методичні та інструментальні похибки. Перші виникають внаслідок недосконалості методу вимірювання, тобто неоднозначного зв'язку між вимірюваною величиною і величиною, що сприймається чутливим елементом приладу. Інструментальні похибки породжуються зміною параметрів і характеристик матеріалів, з яких зроблено прилад, недосконалістю технології (відмінність параметрів і розмірів від розрахункових, впливом зовнішніх збурень на параметри приладів і т. д.

Похибки можуть бути абсолютними і відносними. Абсолютною називається похибка Δy , представлена рівнянням (3.3). Якщо розділити її на покази приладу y , то отримаємо відносну похибку $\gamma = \Delta y / y$, тобто абсолютна похибка являє собою відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного (дійсного) значення вимірюваної величини і виражається у відсотках або долях вимірюваної величини. При віднесенні абсолютної похибки Δy до діапазону вимірювання y_{∂} , тобто $\gamma = \Delta y / y_{\partial}$, отримаємо приведену відносну похибку, %, виражається клас точності приладу A , тобто

$$A = (\Delta y_n / y_{\partial}) \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

У залежності від характеру зв'язку між похибкою і рівнем вимірюваного сигналу розрізняють адитивну і неадитивну похибки. Похибки називаються адитивними, якщо їхні значення не залежать від рівня вимірюваних сигналів. Вони виникають внаслідок зсуву статичної характеристики (рисунок 3.1, а) без зміни нахилу. Неадитивні похибки залежать від рівня вимірюваного сигналу і

виникають при зміні нахилу статичної характеристики при зміні нахилу статичної характеристики. Неадитивні похибки поділяють на мультиплікативні, степеневі і періодичні. Похибку називають мультиплікативною, якщо нахил статичної характеристики отримує постійний приріст. У цьому випадку чутливість приладу змінюється на постійну величину ΔS , тобто

$$\Delta S = S - S_0, \quad (3.5)$$

а мультиплікативна похибка

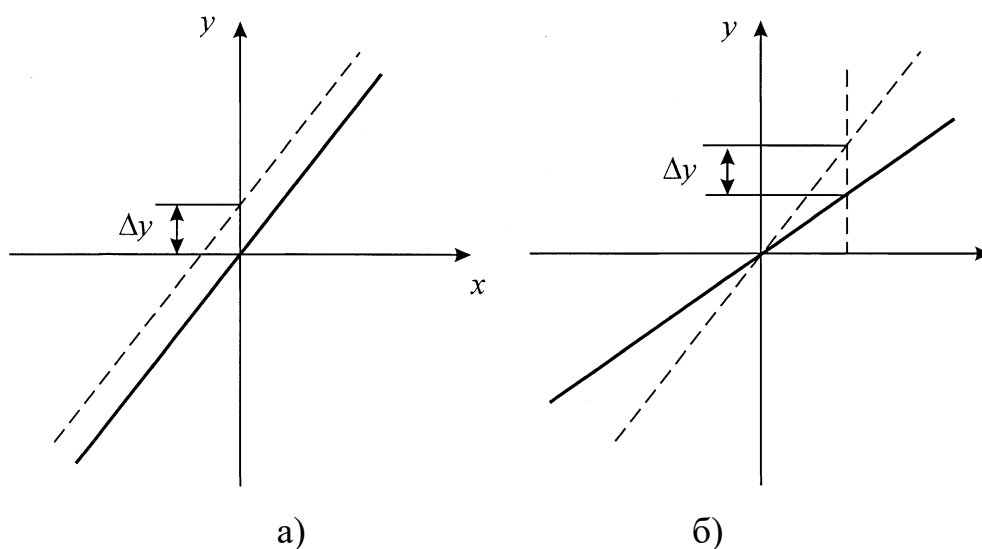
$$\Delta y_m = (\Delta S/S)y \quad (3.6)$$

У деяких випадках чутливість S може бути степеневою функцією сигналу y . Тоді похибка, що викликається зміною нахилу характеристики, буде пропорційною сигналові y ступені вище 1. Такі похибки називають степеневими.

Якщо в основу класифікації закласти характер зміни похибки і часі, то усі похибки можна розділити на статичні і динамічні. Перші є постійними величинами, інші - функціями часу.

Похибки приладів можна розділити на основні, що виникають у приладах при нормальних умовах роботи, і додаткові, що виникають при відхиленні умов роботи від нормальних.

Слід відзначити, що похибки приладу єдині, і поділ їх проводять з урахуванням тих чи інших особливостей і властивостей. Наприклад,



а) адитивна похибка; б) мультиплікативна похибка

Рисунок 3.1 - Утворення адитивної і мультиплікативної похибок похибки

інструментальні похибки можуть бути систематичними і випадковими, адитивними і мультиплікативними тощо.

Основними факторами, які впливають на сумарну похибку вимірювання поверхневого натягу є наступні:

- похибка нестабільності живлення $\gamma_{ж}$;

Оскільки апаратура для визначення динамічного поверхневого натягу може бути портативна (додаток А), вона може мати живлення від акумуляторів, які протягом процесу контролю зменшують віддачу енергії, тобто напруга живлення знижується. Спад напруги призводить до зниження чутливості давачів, вносить похибку в коефіцієнт підсилення.

- температурна похибка γ_t , виникає у зв'язку із зміною умов праці, людським фактором;

Температурна похибка належить до додаткових похибок. Температура навколишнього середовища - один із основних факторів, що визначають параметри радіоелементів. Зміна температури впливає на їхню характеристику.

У загальному випадку методика розрахунку температурної похибки полягає у визначенні зміни параметрів, які входять до статичної характеристики перетворювальних елементів або всього засобу вимірювань. Запишемо в загальному вигляді статичну характеристику:

$$y = f(x, a, b, \dots, m), \quad (3.7)$$

де y і x - відповідно вхідний і вихідний сигнали;

a, b, \dots, m - параметри, які визначають статичну характеристику і залежать від зміни температури.

Будемо вважати, що температура змінюється в порівняно невеликому інтервалі і температурна зміна параметрів описується лінійним законом:

$$a = a_0(1 + \alpha_a \Delta\Theta);$$

$$b = b_0(1 + \alpha_b \Delta\Theta),$$

$$m = m_0(1 + \alpha_m \Delta\Theta),$$

де a_0, b_0, m_0 — значення параметрів при нормальній температурі; $\alpha_a, \alpha_b, \dots, \alpha_m$ - температурні коефіцієнти параметрів, $\Delta\Theta$ - зміна температури від номінального значення.

Похибка вхідних параметрів, зумовлена зміною температури, має вигляд

$$\Delta a = a - a_0 = a_0 \alpha_a \Delta \Theta;$$

$$\Delta b = b - b_0 = b_0 \alpha_b \Delta \Theta;$$

.....

$$\Delta m = m - m_0 = m_0 \alpha_m \Delta \Theta .$$

Підставляючи ці значення в загальну формулу (3.4), запишемо

$$\Delta_{\Theta} = \left[\frac{df}{da} a_0 \alpha_a + \frac{df}{db} b_0 \alpha_b + \dots + \frac{df}{dm} m_0 \alpha_m \right] \Delta \Theta$$

або

$$\Delta_{\Theta} = f_0 \Delta \Theta$$

де f_0 - температурний коефіцієнт блоку вимірювання.

Температурної похибки не буде, якщо блок вимірювання буде експлуатуватися при номінальній температурі, при якій він настроєний. Температурну похибку можна компенсувати, якщо в передавальну функцію блоку ввести елементи з негативними температурними коефіцієнтами достатньої значущості:

- результуюча похибка дозуючого пристрою $\gamma_{дп}$, яка присутня завжди, коли йдеться про рідину чи газ, завдяки дискретності дозування речовин та залежності від позиціонування самого дозуючого пристрою;
- результуюча похибка оптико - електронного пристрою $\gamma_{ОЕП}$, обумовлена складністю фокусування зображення краплі у камері, що є першочерговим носієм інформації та спотворення самого зображення у зв'язку із виникненням додаткових шумів;
- похибка γ_k калібрування, виставлення початкових параметрів;
- похибка методики нелінійної оптимізації $\gamma_{но}$, де оптимізація використовується середнє значення сум відхилень теоретичного профілю від експериментального визначення лінійних розмірів;
- похибка, викликана малим діаметром краплі $\gamma_{мд}$, оскільки інформативних координат для досліджень не буде достатньо для виведення прецезійного результату.
- похибка вибору джерела освітлення $\gamma_{до}$, завдяки якому можна отримати

більш точніше зображення.

На рис. 3.2 наведена схема нагромадження похибок, яка дає узагальнене поняття про джерела виникнення похибок. Для визначення числових значень кожної складової похибок треба їх проаналізувати, встановити причини їхнього виникнення.

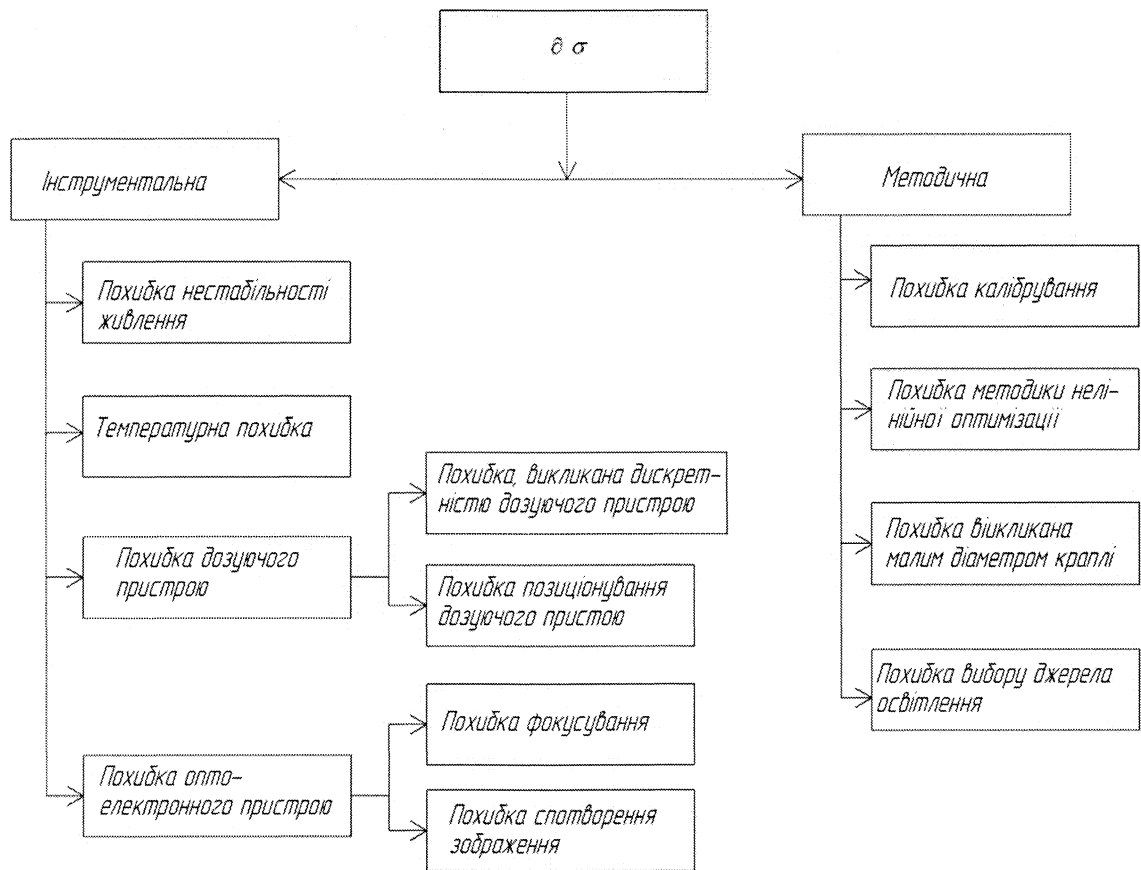


Рисунок 3.2 - Узагальнена схема нагромадження похибок при вимірюванні поверхневого натягу

Термоелектричний термометр, що базується на непрямому методі вимірювання, характеризується методичною похибкою.

При вимірюванні температури T термоелектричним термометром ТЕРС (термо ЕРС) буде $e = k(T - T_1)$, де T_1 - температура холодного кінця спаю; k - коефіцієнт пропорційності.

Варіації температури холодного кінця T_1 викликають зміни ТЕРС, тобто з'являється методична похибка.

Методичні похибки виникають завжди, коли параметри l_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), що

входять до рівняння методу вимірювання

$$x = f(x', l_i), \quad (3.8)$$

де x - вимірювана величина; x' - величина, на котру реагує чутливий елемент, не залишаються постійними.

Нехай прилад градуований при l_{i0} , а у процесі вимірювання параметри методу приймають значення $l_i = l_{i0} + \Delta l_i$. Тоді методична похибка як різниця $x_0 = f(x', l_i) - f(x', l_{i0})$ після розкладу у ряд Фур'є буде:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial l_i) \Delta l_i \quad (3.9)$$

Методичні похибки можуть бути скомпенсовані повністю або частково, для чого у вимірювальний прилад вводять додаткові чутливі елементи, що реагують на зміну параметрів l_i . Якщо за допомогою таких параметрів утворити сумарний $\sum_{i=1}^n k_i \Delta l_i$ сигнал і відняти його від суми (3.9), то отримаємо:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial l_i - k_i) \Delta l_i \quad (3.10)$$

У випадку відповідності умовам

$$df / dl_i - k_i = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.11)$$

методичні похибки будуть скомпенсовані.

У зв'язку з тим, що параметри l_i являються випадковими величинами, точне задоволення умови (3.11) неможливе. Тому слід говорити про задоволення цих умов в середньому.

Інструментальна похибка залежить від наступних факторів.

По-перше, зменшення віддачі енергії при застосуванні акумуляторів - напруга живлення знижується. Спад напруги призводить до зниження чутливості давачів, похибку в коефіцієнт підсилення.

По-друге, для досліджень використовують невелику кількість досліджуваної речовини і в залежності від пори року, кількості людей в приміщенні та освітленості лабораторії великий вплив створюватиме температура. При збільшенні температури значення поверхневого натягу розчину зменшуватиметься, що дасть спотворення результатів.

По-третє, дозуючий пристрій працює за принципом дискретизації, тобто за певний час пристрій здійснить певну кількість операцій по утворенні краплі, що утворить похибку. Крім цього тут є важливим позиціонування, оскільки

йдеться про утворення краплі і визначення її контурів поверхні.

По-четверте, при використанні кожного оптико - електронного пристрою присутні фактори, які викликатимуть відхилення. Автоматизована чи механізована частина визначення фокусу, оскільки йдеться про невеликі розміри об'єкта, фокусування по контуру є однією із основних чинників точних результатів. Спотворення зображення присутнє завдяки растровій картинці. Поп'яте, на величину крайового кута і, як наслідок, на форму нижньої частини краплі можуть впливати умови утворення поверхні.

Аспекти, які слід врахувати:

1. Неточність виготовлення капіляра може зумовити відхилення форми його торці від колової. Це може призвести до радикального збільшення похибки аж до повної неможливості використання такого капіляра, оскільки усі розрахунки базуються на припущенні, що крапля має осесиметричну форму.

2. Відхилення вісі симетрії краплі від вертикалі також порушує симетричність форми краплі, що може призвести до наслідків, аналогічних дії фактора п. 1.

3. Оскільки для проведення визначення поверхневого натягу необхідне значення густини досліджуваної рідини, то похибка його визначення впливатиме на остаточний результат.

4. Крім цього, потрібно врахувати зміну густини рідини із зміною температури.

5. Важливим є точне визначення координат точок профілю, оскільки вони є джерелом інформації про досліджуваний об'єкт.

Похибка нестабільності живлення $\gamma_{\text{ж}}=0,05\%$.

Температурну похибку приймемо $\gamma_{\text{т}}=0,25\%$.

Результуюча похибка дозуючого пристрою $\gamma_{\text{дп}}$, в загальному становитиме: $0,025\%$.

Результуюча похибка оптико - електронного пристрою $\gamma_{\text{ОЕП}}=0,0\%$.

Похибку калібрування приймемо $\gamma_{\text{к}}=0,25\%$.

Похибка методики нелінійної оптимізації становить $\gamma_{\text{но}}=0,1\%$.

Похибка, викликана малим діаметром краплі $\gamma_{\text{мд}}=0,5\%$.

Похибка вибору джерела освітлення становить $\gamma_{до} = 0,1\%$.

Всі вище приведені похибки впливають на визначення динамічного поверхневого натягу рідин та розчинів ПАР, оскільки всі ці похибки є відхиленнями від «ідеального» результату і не корелюються між собою. Визначаємо відносну похибку динамічного поверхневого натягу з формули:
[31]

$$\gamma_p = \sqrt{\gamma_{ДП}^2 + \gamma_{ОЕМ}^2 + \gamma_K^2 + \gamma_{НО}^2 + \gamma_{ДМ}^2 + \gamma_{ж}^2 + \gamma_t^2 + \gamma_{до}^2} \quad (3.12)$$

$$\gamma_p = \sqrt{0.025^2 + 0.1^2 + 0.25^2 + 0.1^2 + 0.5^2 + 0.05^2 + 0.25^2 + 0.1^2} = 0.408\%$$

З розрахунків можна сказати, що сумарна похибка, яка складає 0,408% не перевищує допустимого значення, а, отже, дана методика є вагомим у визначенні динамічного поверхневого натягу.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі було здійснено аналіз методик для визначення динамічного поверхневого натягу, зокрема методу висячої краплі та обґрунтували принцип роботи приладів, які основані на даній методиці. Було створено методику обробки зображення з субпіксельною точністю, що дозволяє визначати динамічний поверхневий натяг з меншими відхиленнями.

У процесі розробки пристрою були вирішені такі задачі:

1. Вдосконалено метод висячої краплі для безконтактного вимірювання поверхневого натягу рідин з урахуванням впливу електричного поля, в якому реєструють екстремальні геометричні параметри краплі у кюветі із загостреною кромкою, що дозволило знизити поріг чутливості вимірювання до 0,05 мН/м і підвищити вірогідність контролю.

2. Розроблено алгоритм зчитування та обробки зображення лежачої краплі, в якому передбачена паралельність виконання операцій в часі: переходу краплі в стаціонарний стан при зміні напруги на один крок, реєстрація зображення фотокамерою та обробка зображення попереднього стану, що скорочує тривалість вимірювання поверхневого натягу в одному циклі до 1,5 с. Розроблено програмне забезпечення для визначення геометричних параметрів меніска та поверхневого натягу досліджуваної рідини, що дозволяє зберігати в пам'яті перший і останній кадр, який передує нестійкому стану краплі, що забезпечує використання мінімального об'єму оперативної пам'яті.

3. Розробка структурної схеми вимірювального пристрою.

4. Побудова алгоритму реалізації методики.

5. Розробка методики обробки зображення.

6. Визначення похибок розробленого методу.

Методика виділення контуру об'єкта на зображенні, заснована на знаходженні спільних точок приміжових кривих фільтрованих зображень, дала змогу отримати безпосередньо стоншений контур і з більш високою точністю локалізувати область знаходження крайової точки та виділити контур у цілому.

Розроблена методика характеризується можливістю дослідження зміни поверхневих властивостей рідин в часі, тобто поверхневого натягу. Це досягається шляхом використання можливості обробки зображення з субпіксельною точністю, завдяки чому, досягається більша точність у результатах вимірювань.

Обробка зображення краплі з субпіксельною точністю дозволила краще оцінювати значення поверхневого натягу із зменшеним відхиленням. Завдяки наближенням експериментальних значень до теоретичних і з наступним підбором значень для вибору результату .

Динамічний поверхневий натяг залежить від адсорбції у зв'язку з тим, що з часом концентрація досліджуваної речовини зменшується внаслідок сорбування молекул ПАР на поверхню рідини. Тому за допомогою ізотерм Гіббса можна спостежити за динамікою концентрації поверхнево - активних речовин .

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцков М.В., Буденкова Н.М., Мисіна О.І. Я92 Фізична та колоїдна хімія. Навч. посібник. – Рівне : НУВГП, 2016. – 164 с.
2. Копилов В.І., Смирнов І.В. Поверхневі фізико-хімічні процеси. Навчальний посібник.– Київ: Вид. «КПІ», 2012.–230 с.
3. Кісіль І.С., В.О. Горелов Вибір методу для вимірювання динамічного поверхневого натягу // Методи і прилади контролю якості. - 2000. -№5. – С. 92-99.
4. Іващенко Ю.М., Єрмоменко В.Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів металів за методом лежачої краплі / Ю.М. – К.: Наукова думка, 1972. - іл.
5. Кісіль І.С. Визначення поверхневого натягу рідин на основі вимірювання максимального тиску в газовому меніску // Методи і прилади контролю якості . 1997. № 1. С.50-55.
6. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні: підручник / Київ: наук. Думка, 2007.–558 с.
7. Великонська Н.М., Надточій А.А. Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 78 с.
8. Біліщук В.Б., Кісіль І.С., Боднар Р.Т. Методика оброблення зображення обертової краплі при вимірюванні міжфазного натягу рідин // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", серія "Приладобудування", 2008 р., №36, с.76-82
9. Tawde N.R. and Parvatikar K.G. A Table for Calculation of Surface Tension from Measurements of Sessile Drop // Indian J. of Phys., 1954, 28, 7. P, 345-348
10. Andreas J.M., Hauser E.A., Tucker W.B. // J. Phys. Chem. 1938. V.42. № 8. P. 1001-1019.
11. Ferguson A. // Phil. Mag. Ser. 6. 1912. V. 23. № 135/ P. 417-430.
12. Кісіль І. С., Кісіль Р. І. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Монографія у 2-х т. Т.1. Методи максимального тиску у

бульбашці, лежачої та висячої краплі, та об'єму краплі.– м. Івано-Франківськ: Вид. ІФНТУНГ.– 2010, 298 с.

13. Misak M.D. // J. Colloid Interface Sci. 1968. V. 27. №1. P. 141-142.

14. Winkel D. // J. Phys. Chem. 1965. V.69. № 1. P. 348-350.

15. Lyons C.J. , Elbing E. , Wilson I.R. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 2 1985. V. 81. № 3. P. 327-329.

16. Babu S.R. Alternative methods for the determination of surface tension using drop- weight data // J. Colloid Interface Sci. 1987. V. 115. № 2. P. 551-554.

17. Дурягіна З.А. Фізика та хімія поверхні. Монографія / – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2009.– 208 с.

18. Bashforth F. and Adams J.C. An attempt to test the theories of capillary action. Cambridge at the University Press, 1883.

19. Rio O. I., Neumann A. W. Axisymmetric Drop Shape Analysis: Computational Methods for the Measurement of Interfacial Properties from the shape and Dimensions of Pendant and Semile Drops // Journal of Colloid and interface Science, № 196, 1997. P. 136-147.

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

21. Кісіль І.С., Горелов В.О. Використання відеотехніки для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі // Методи і прилади контролю якості. - 2000. - № 6. - С. 37-39.

22. Порєв В.А. Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи.— К.: 2015 – 218 с.

23. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів : навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с

24. Розробка телевізійної оптико-цифрової системи для визначення

капілярних характеристик розплавів / Л.І. Муравський, Я.П. Кулинич [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. - 2001. - №7. - С. 36-42.

25. Біліщук В.Б., Кісіль І.С., Боднар Р.Т. Методика оброблення зображення обертової краплі при вимірюванні міжфазного натягу рідин // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", серія "Приладобудування", 2008 р., №36, с.76-82

26. Боднар Р.Т., Біліщук В.Б., Костів Б.В. Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії.// Методи та прилади контролю якості", № 2 (33), м. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2014, с. 59–65

27. Cheng P. Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurements of interfacial tensions and contact angles / P.Cheng, D.Li, L.Boruvka et al. // Colloids and Surfaces. - 1990. Vol. 43. -P. 151-168.

28. Pallas N.R. An automated drop shape apparatus and the surface tension of pure water / N.R. Pallas, Y.Harrison // Colloids and Surfaces - 1990. Vol. 43. - P. 169-194.

29. Havelock D.I. Geometric precision in noise-free digital images / Havelock D.I. // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. - 1989. Vol. 11, N 10. - P. 1065 - 1075.

30. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. пос. для студентів вищ. навч. закл. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.

31. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2001. –219с.

32. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення : навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 214 с. ISBN 978-9

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОГРАМА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ПРОФІЛЮ ВИСЯЧОЇ КРАПЛІ

```
function varargout = MPprog(varargin)
% MPPROG M-file for MPprog.fig
%     MPPROG, by itself, creates a new MPPROG or raises
the existing % singleton*.
%
%     H = MPPROG returns the handle to a new MPPROG or
the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     MPPROG('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
calls the local
%     function named CALLBACK in MPPROG.M with the given
input arguments.
%
%     MPPROG('PropertyValue',...)     creates a new
MPPROG or raises the
%     existing singleton*. Starting     from the left,
property value pairs are
%     applied to the GUI before MPprog_OpeningFcn gets
called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes
property application
%     stop. All inputs are passed to MPprog_OpeningFcn
via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE'S Tools menu. Choose
"GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
```

```

%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help MPprog
% Last Modified by GUIDE v2.5 03-May-2012 13:38:04
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct ('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @MPprog__OpeningFcn,
                  ...'gui_OutputFcn', @MPprog_OutputFcn,
                  .....
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% -- Executes just before MPprog is made visible.
function MPprog_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to MPprog (see VARARGIN)
% Choose default command line output for MPprog handles.output = hObject;
% Update handles structure guidata(hObject, handles);

```

```

% UIWAIT makes MPprog wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1) ;

% --- Outputs from this function are returned to the
command line.
function varargout = MPprog_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure varargout{1} =
handles.output;
    Відкриття файлу і перетворення у ЧБ
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
[FileName, PathName] =
uigetfile('*.*jpg;*.jpeg;*.bmp','Виберіть зображення меніска' );
set(handles.text2,'String',streat(PathName,FileName));
[Im, map] = imread(streat(PathName,FileName));
imshow(Im)
handles.Im = Im;
guidata(hObject, handles);
ImBWOrig = imadjust(rgb2gray(Im)); handles.ImBWOrig = ImBWOrig;
guidata(hObject, handles);
%figure, imshow(ImBW)

```

```

% Медіанна фільтрація
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
ImBWOrig = handles.ImBWOrig;
xval = str2double(get(handles.edit1, 'String')); %      10;
yval = str2double(get(handles.edit2, 'String')); ImBW=medfilt2(ImBWOrig,
[xval,yval], 'symmetric'); handles.ImBW = ImBW; guidata(hObject, handles);
imshow(handles.ImBW);

```

```

% Виділення меж
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
ImBW = handles.ImBW;
BWedge = edge(ImBW, 'sobelstr2double(get(handles.edit3,
'String'))); handles.BWedge = BWedge; guidata(hObject, handles);
imshow(handles.BWedge);

```

```

% Виділення меніска
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Виділення початкової точки BW1 = handles.BWedge;
out = zeros (480, 640);
BWsums=sum(BW1);
for i=1:640

```

```

        if (BWsums(i)>0) xs=i; break;
    end
end
for i=1:4 8 0
    if (BWl(i,xs)>0) ys=i; break;
    end
end

%Виділення меніска out(ys,xs)=1;

outmas=[];

nm= 1 ;
outmas(nm,1)=xs; outmas(nm,2)=ys;

directionf="";

while (1)
    %imshow(out)

    if ((ys<=5)    ||  (xs>=635))
        break;
    end

    if (xs>2)
        if ((BWl(ys-1,xs-1)==1) && (strcmp(directionf,
'rd')~=1) )
            ys=ys-1;
            xs=x-1;
            out(ys,xs)=1;
            nm=nm+1;
        end
    end
end

```

```

        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys;
        directionf='lu';
        continue;
    end
end
    if (BW1(ys-1,xs)==1)
        ys=ys-1;
        out(ys,xs)=1;
        nm=nm+1;
        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys;
        directionf='u';
        continue;
    end
    if (BW1(ys-1,xs+1)==1)
        ys=ys-1;
        xs=x+1;
        out(ys,xs)=1;
        nm=nm+1;
        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys;
        directionf=' ru' ;
        continue;
    end
    if (BW1(ys,xs+1)==1) xs=x+1;
        out(ys,xs)=1;
        nm=nm+1;
        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys ;
        directionf='r';

```

```

        continue;
    end
    if (BW1(ys+1,xs+1)==1)
        ys=ys+1;
        xs=xs+1;
        out(ys,xs)=1;
        nm=nm+1;
        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys;
        directionf='rd';
        continue;
    end
    if ((BW1(ys+1,xs)==1) && (strcmp(directionf,'lu')~=1
&& (strcmp(directionf, 'u')~=1) && (strcmp(directionf,
'ru')~=1))
        ys=ys+1;
        out(ys,xs)=1;
        nm=nm+1;
        outmas(nm,1)=xs;
        outmas(nm,2)=ys;
        directionf='d';
        continue;
    end
    break;
end
handles.outmas=outmas;
handles.out=out;
guidata(hObject, handles);
imshow(handles.out);

% Перетворення координат точок і графік function pushbutton6__Callback

```

(hObject, eventdata, handles)

```
% hObject handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
outmas=handles.outmas;
```

```
outmasconv(:,2)=abs(outmas(:,2)-max(outmas(:,2)));
```

```
outmasconv(:,1)=outmas(:,1)-min(outmas(:,1));
```

```
outmasconv=outmas conv.*0.026833976833977;
```

```
plot(outmasconv( :, 1 ),outmasconv( :, 2 )
```

```
handles.outmasconv=outmasconv;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
% Виведення даних.
```

```
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to pushbutton8 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
%[FileName, PathName] =
```

```
uigetfile('*.*jpg;*.jpeg;*.bmp','Виберіть зображення меніска');
```

```
[FileName,PathName,FilterIndex] =
```

```
uigetfile('*.*txtЗбереження координат точок меніска'); outmasconv-  
handles.outmasconv;
```

```
%export(outmasconv,'file',strcat(PathName,FileName),'delimiter', 'space')
```

```
%save(strcat(PathName,FileName), 'outmasconv');
```

```
fid = fopen(strcat(PathName,FileName), 'wt');
```

```
outmasconv=outmasconv';
```

```
fprintf(fid, '%8.6f %8.6f\n', outmasconv); fclose(fid);
```

```

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

function editl_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to editl (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of editl as text
%   str2double(get(hObject, 'String')) returns
contents of editl as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function editl_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to editl (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit2 as text
%   str2double(get(hObject, 'String')) returns
contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get (0,
'defaultUicontrolBackgroundColor')) set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit3 as text
%   str2double(get(hObject, 'String')) returns
contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all

```

properties.

```
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,  
'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

ДОДАТОК Б

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПН

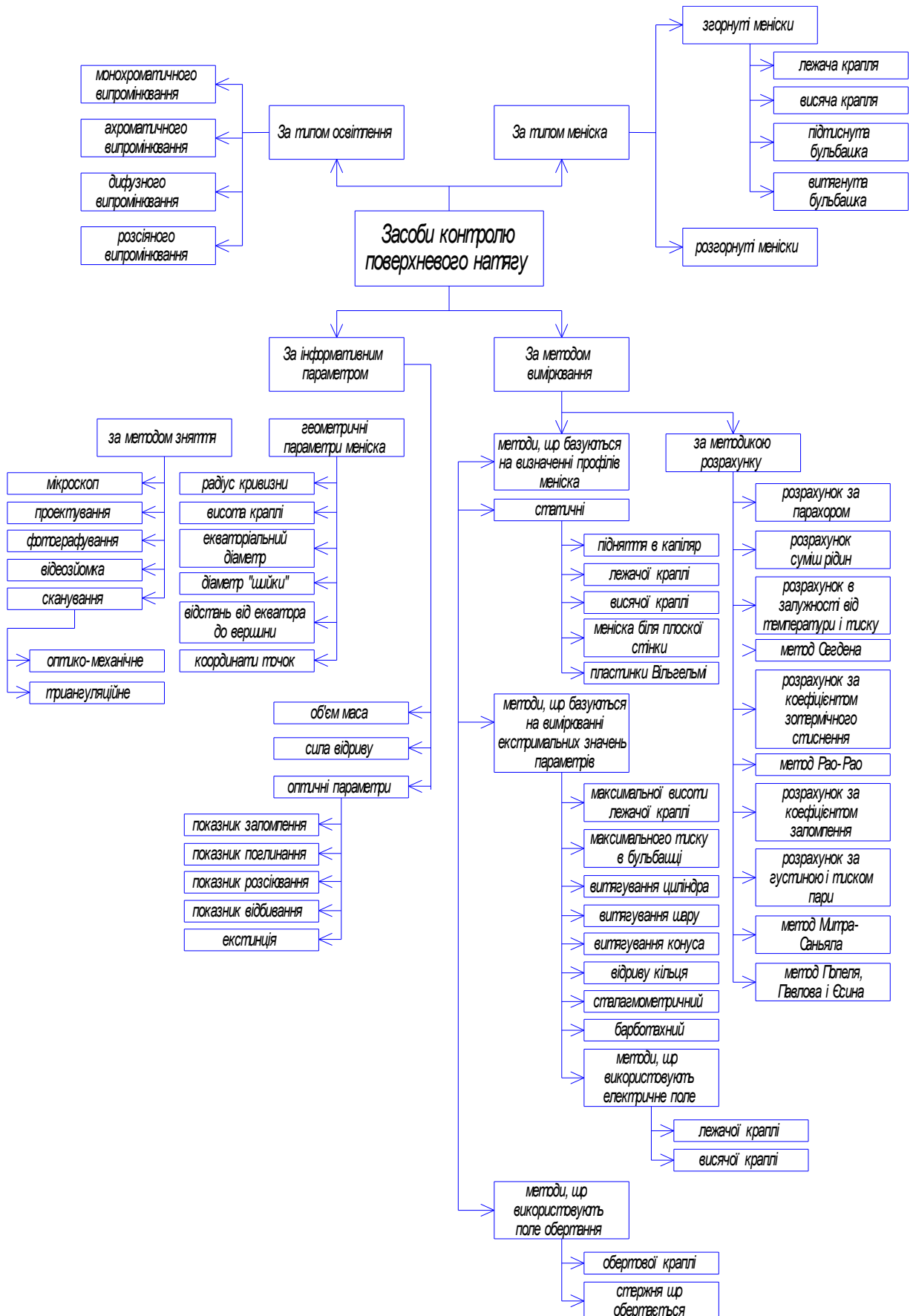
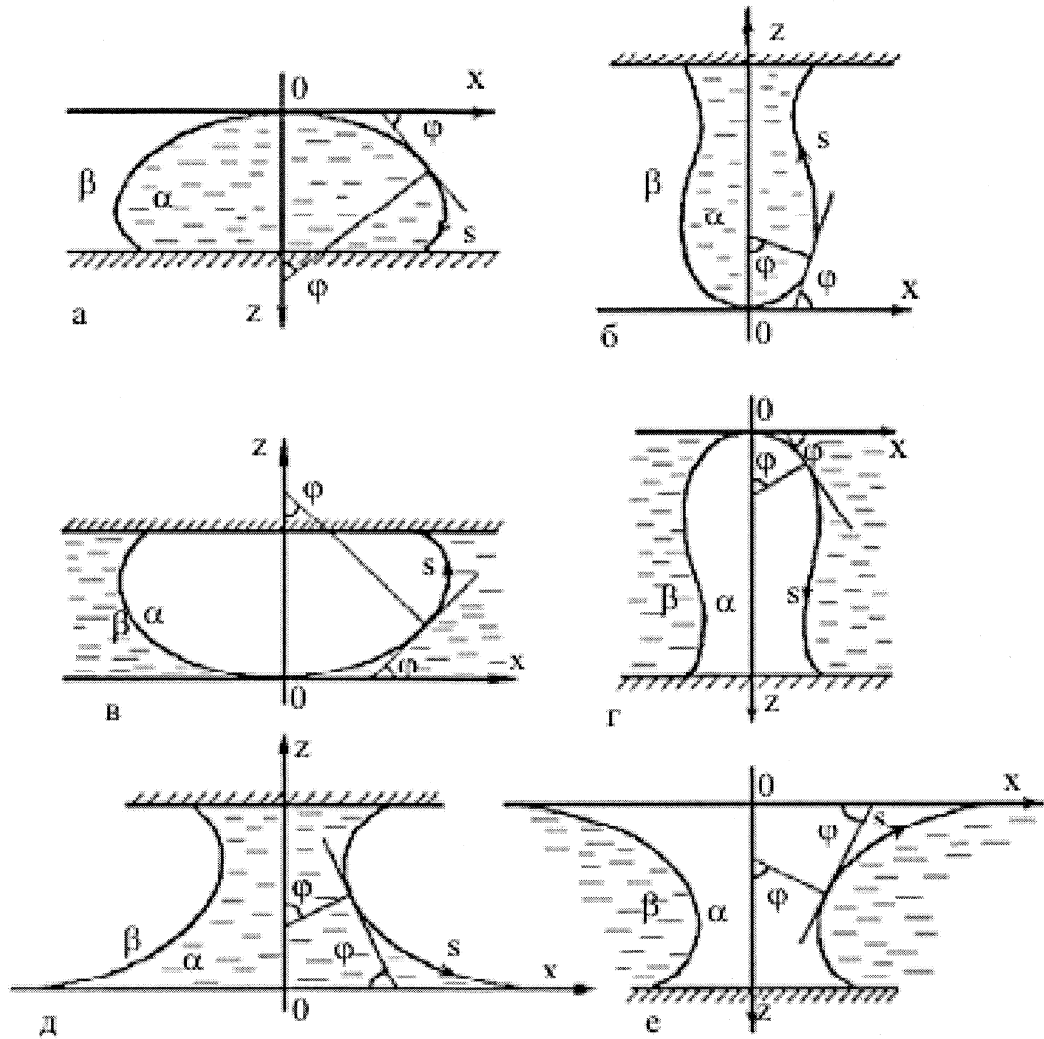


Рисунок А - Класифікація засобів контролю поверхневого натягу

ДОДАТОК В
ПРОФІЛІ МЕНІСКІВ



Згорнуті меніски: а - лежача крапля; б - висяча крапля; в - підтиснула бульбашка; г - витягнута бульбашка. Розгорнуті меніски: д - рідинний; е - газовий

Рисунок В.1- Профілі менісків основних типів.

ПРОДОВЖЕННЯ ДОДАТКУ В

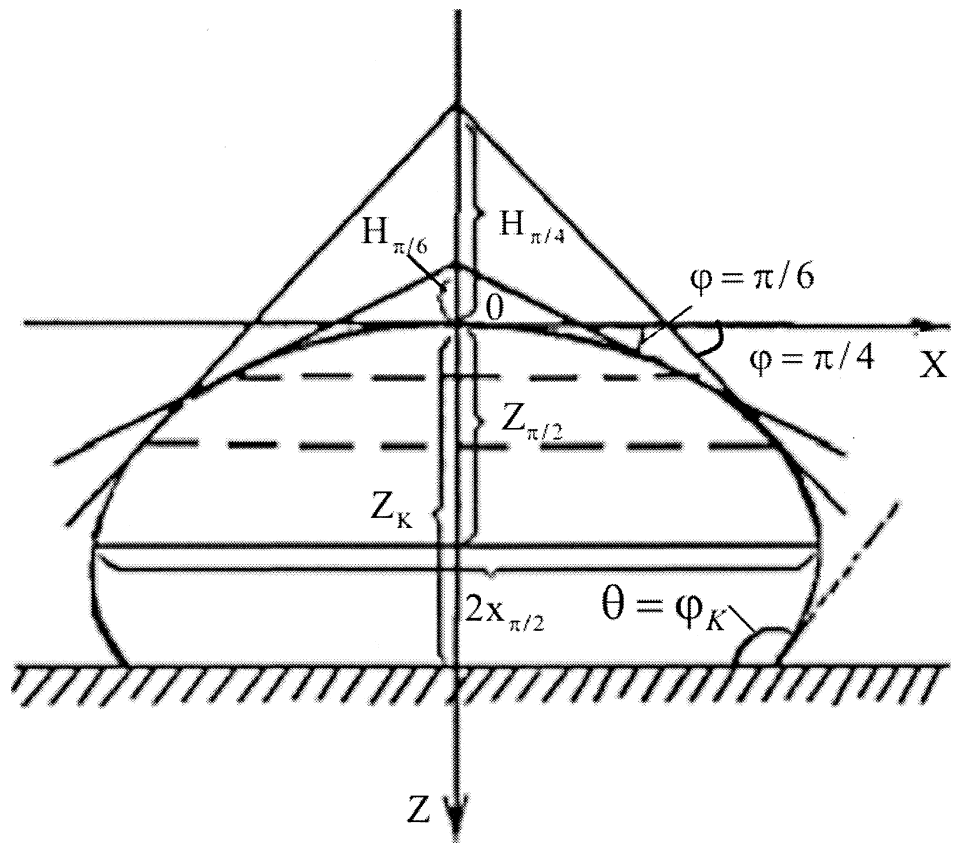


Рисунок В.2 – Профіль лежачої краплі

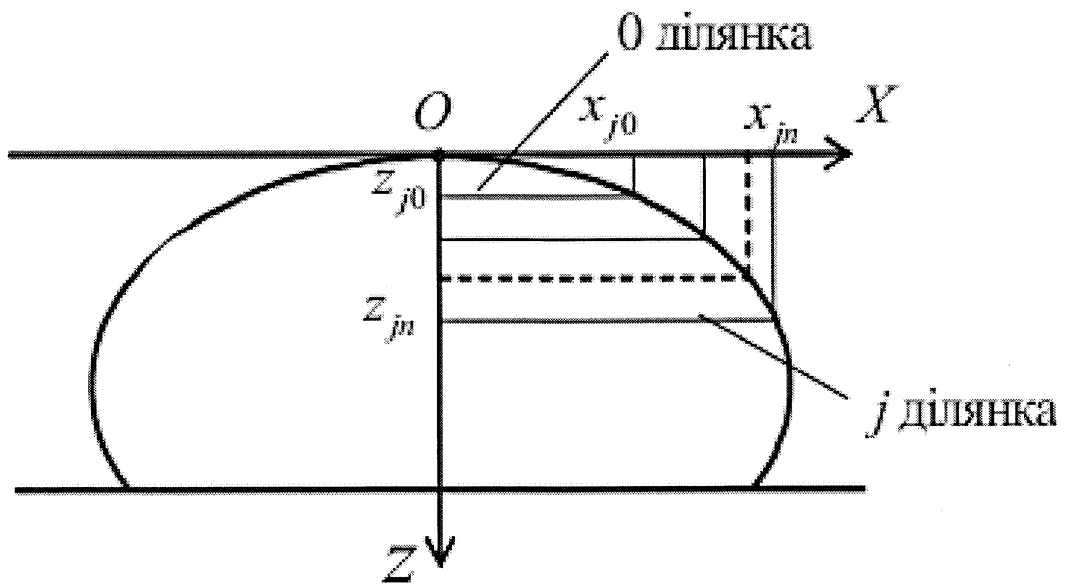
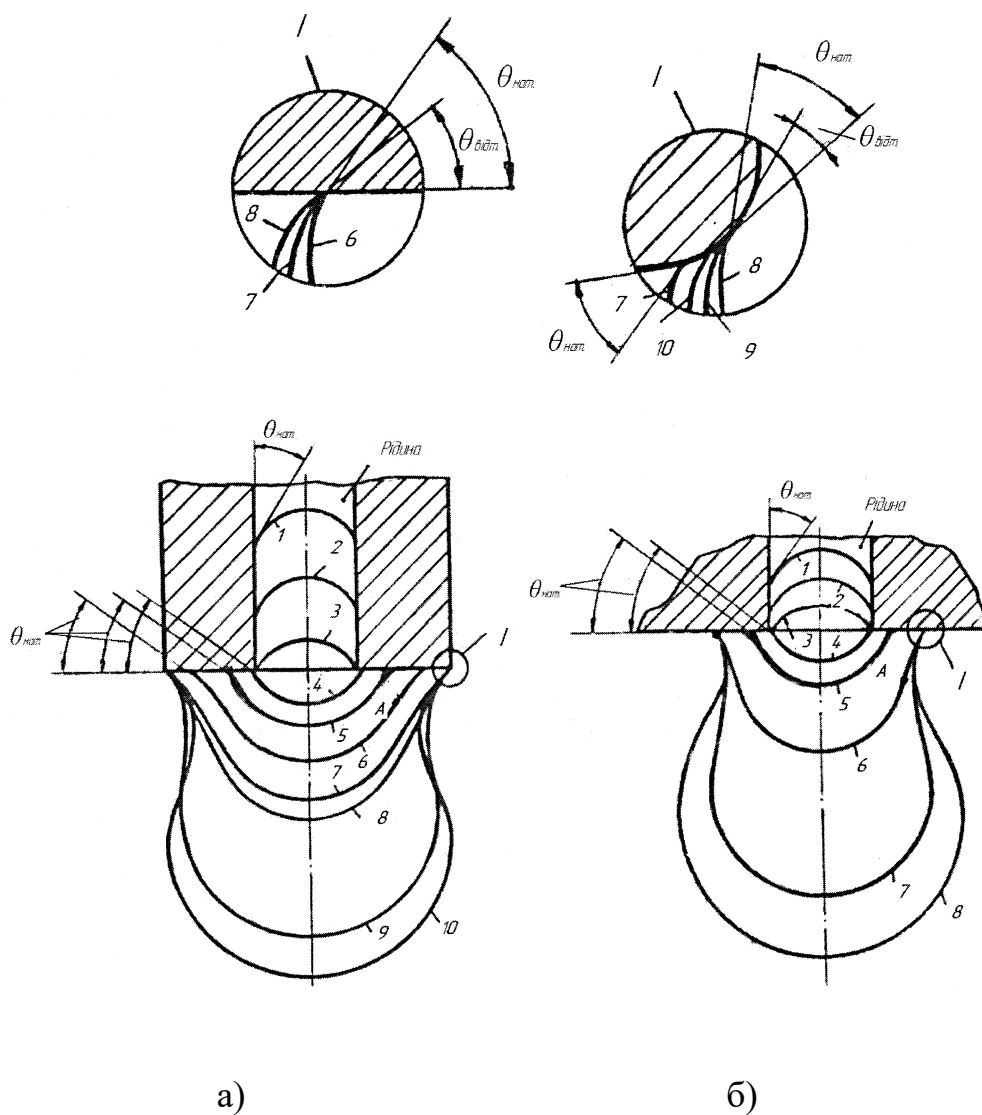


Рисунок В.3 - Профіль лежачої краплі

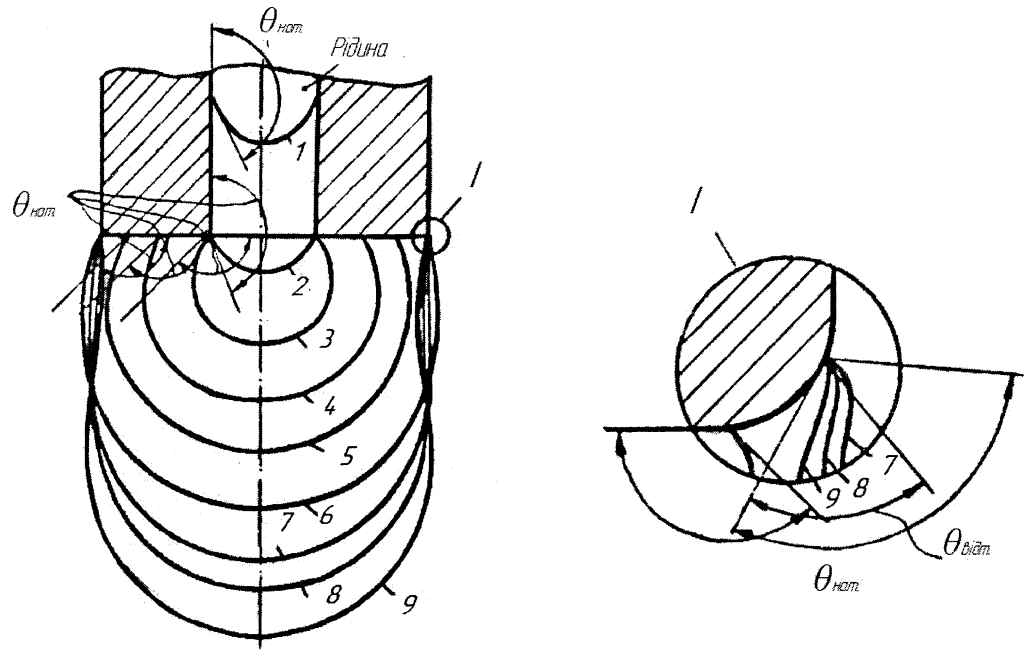
ДОДАТОК Г
ПРОФІЛІ ВИСЯЧИХ КРАПЕЛЬ



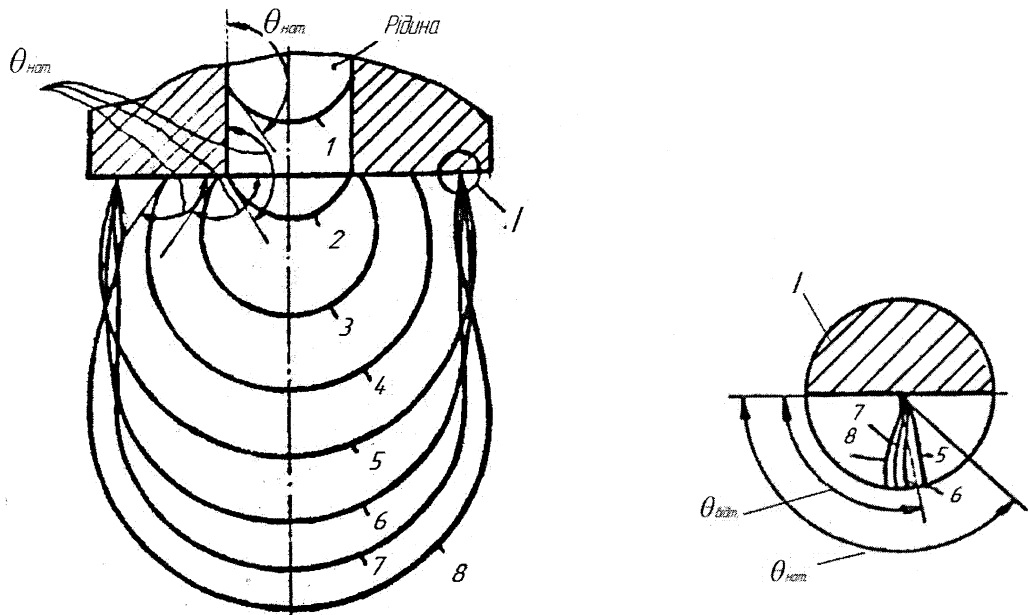
а) при досягненні лінією трьохфазного контакту зовнішньої кромки капіляра; б) при недосягненні лінією трьохфазного контакту зовнішньої кромки капіляра.

Рисунок Г.1 - Утворення краплі гідрофільної рідини на торці товстостінного капіляра

ПРОДОВЖЕННЯ ДОДАТКУ Г



а)

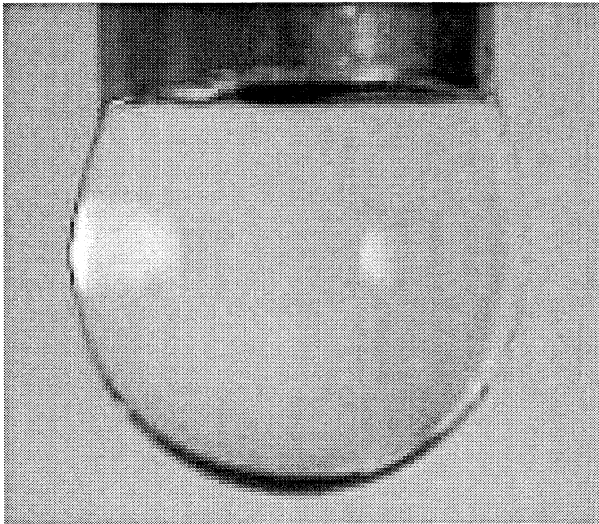


б)

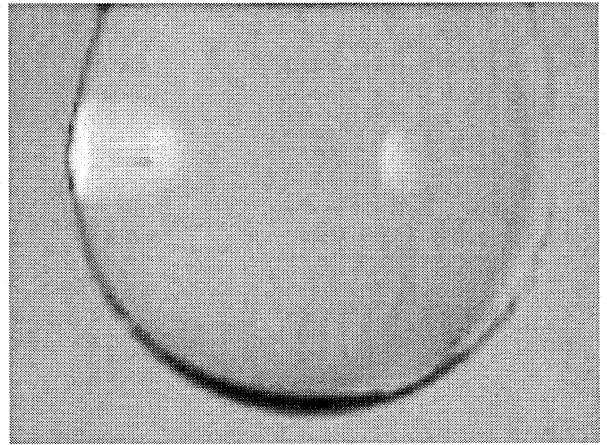
а) при досягненні лінією трьохфазного контакту зовнішньої кромки капіляра; б) при недосяганні лінією трьохфазного контакту зовнішньої кромки капіляра.

Рисунок Г.2 - Утворення краплі гідрофобної рідини на торці товстостінного капіляра

ДОДАТОК Д
ПРИКЛАДИ ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ



а)

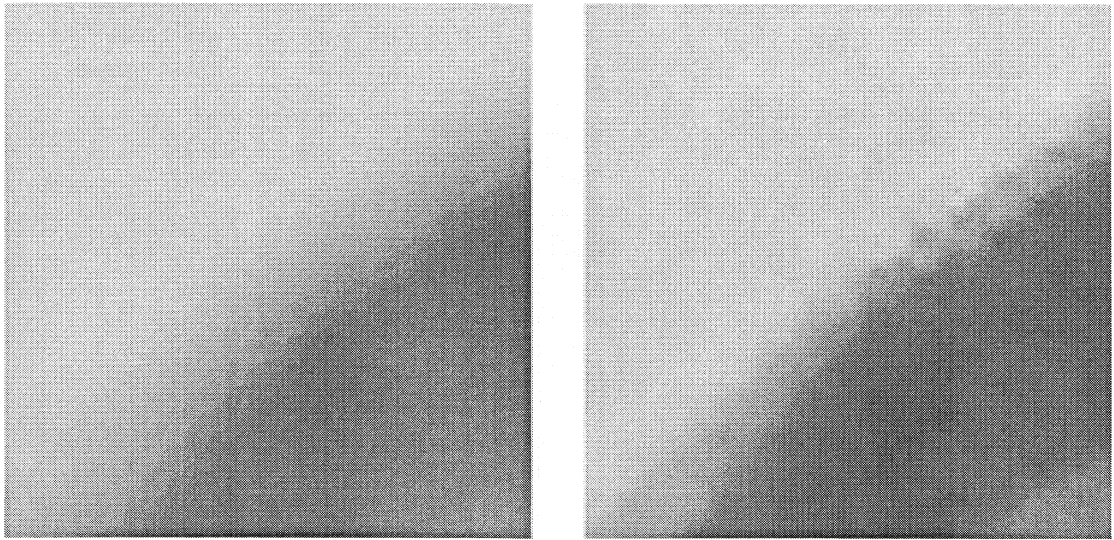


б)

а) початкове зображення; б) виділений необхідний фрагмент краплі.

Рисунок Д. 1 - Виділення потрібного фрагмента краплі

ПРОДОВЖЕННЯ 1 ДОДАТКУ Д

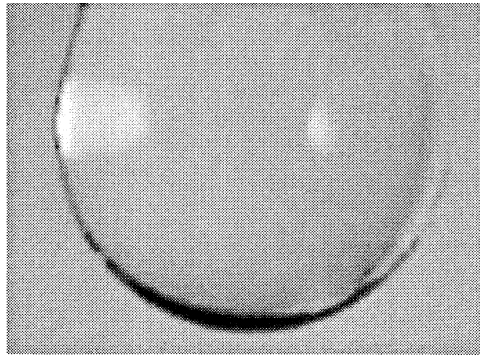


а) лінійна фільтрація

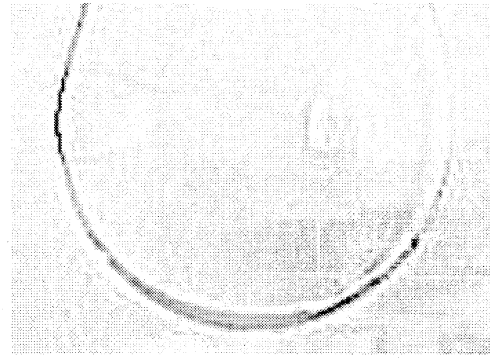
б) нелінійна фільтрація (медіанна)

Рисунок Д.2 - Фрагмент лінійної та нелінійної фільтрації зображення
висячої краплі

ПРОДОВЖЕННЯ 2 ДОДАТКУ Д



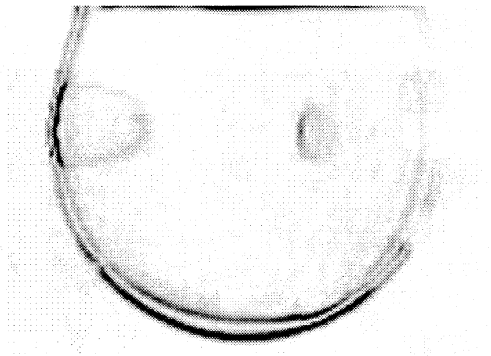
а)



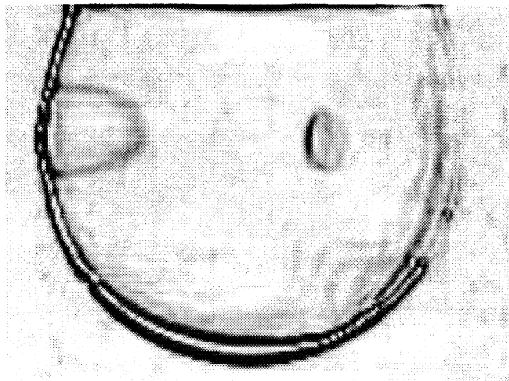
б)



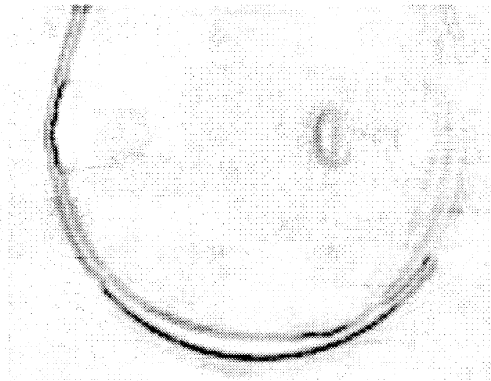
в)



г)



д)



е)

а) вихідне зображення; б) оператор Робертса; в) оператор Лапласа; г) оператор Собела; д) оператор Кірша; е) оператор Превітта

Рисунок Д.3 - Результати використання різних операторів виділення контуру.

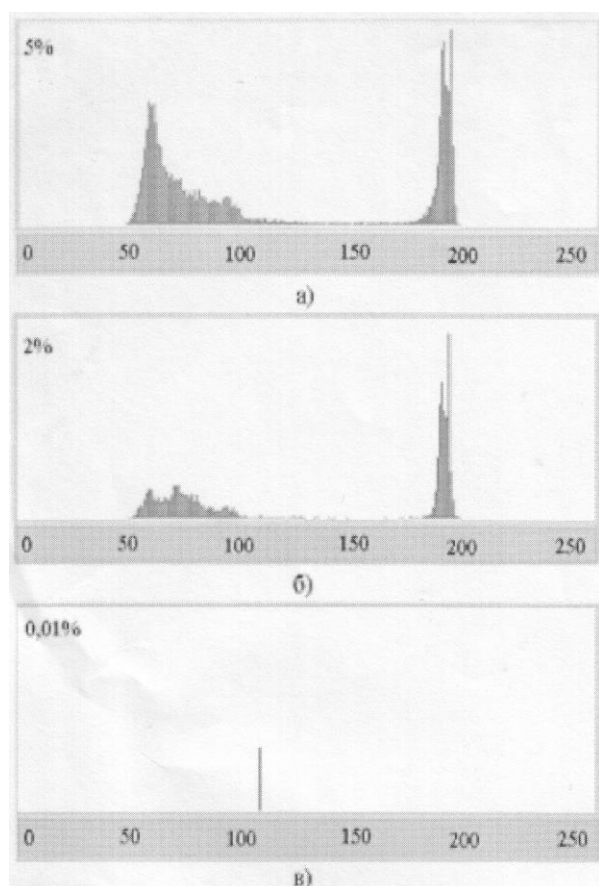


Рисунок Д.4 - Гістограми зображення краплі: а) вхідного зображення; б) спільних точок двох фільтрованих зображень; в) спільних точок двох фільтрованих зображень з урахуванням значеннь порога градієнта

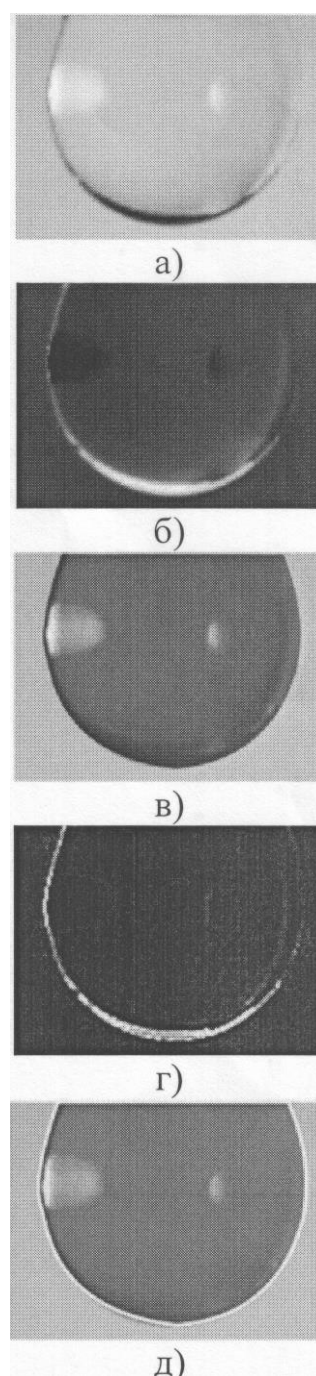


Рисунок Д.5 - Виділення контура зображення краплі: а) вхідне; б) зображення в результаті перетворення; в) виділення контура; г) округлювання; д) оператором Собеля

ДОДАТОК Е
ОТРИМАННЯ ХАРАКТЕРНОЇ ТОЧКИ

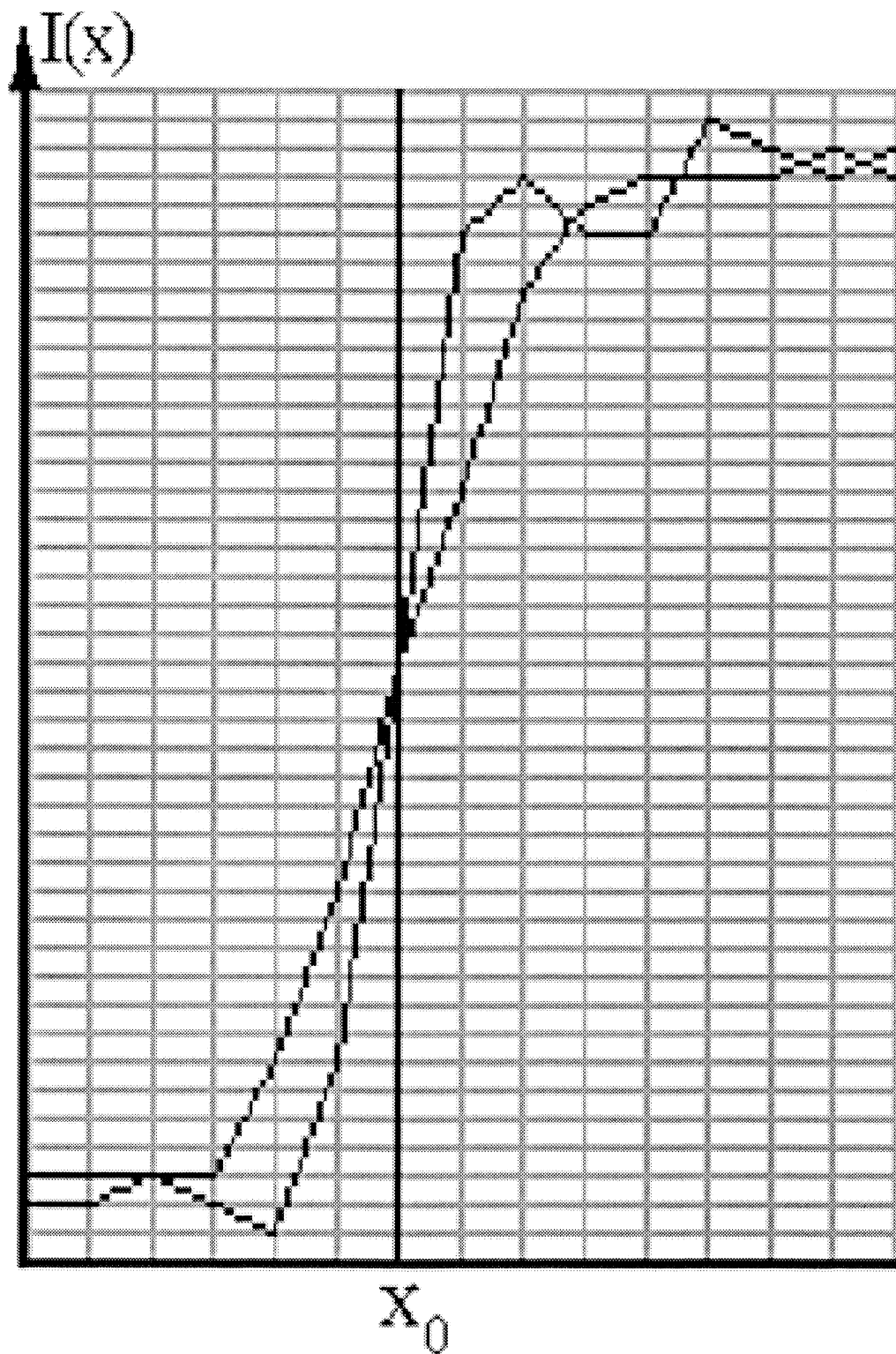


Рисунок Е1 - Зображення примежової кривої до та після фільтрації

ДОДАТОК Є

Вікно інтерфейсу

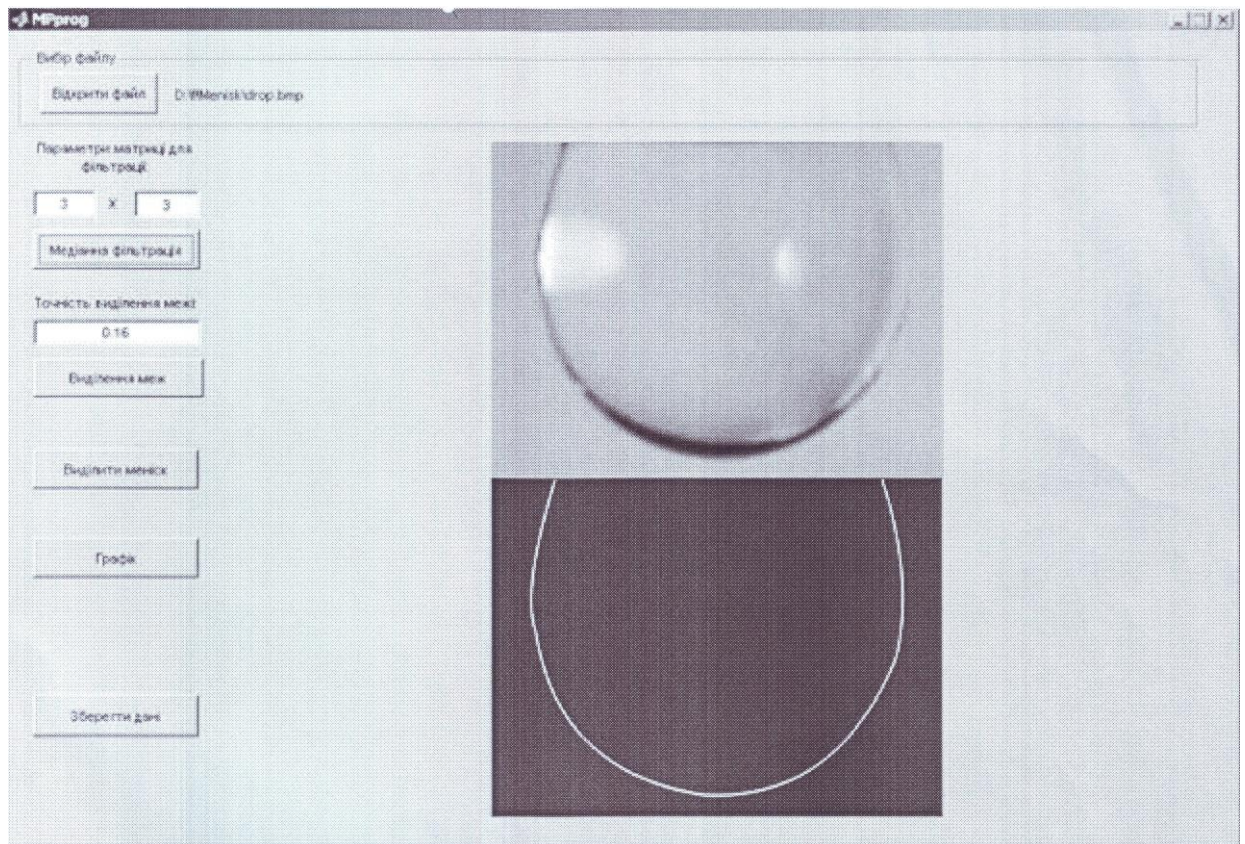


Рисунок Є - Вікно інтерфейсу програми реалізованої в системі MatLab з вхідним і вихідним зображенням краплі