

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

На правах рукопису



Білицук Віктор Борисович

УДК 532.61

УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОДИ ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ
ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та
визначення складу речовин

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
доктор технічних наук,
професор Кісіль І. С.



Івано-Франківськ – 2011

ЗМІСТ

Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1	
Аналіз відомих методів і засобів для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	10
1.1 Характерні властивості розчинів поверхнево-активних речовин і особливості їх використання.....	10
1.2 Класифікація відомих методів дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	12
1.3 Аналіз відомих пристроїв для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	18
Обґрунтування і вибір напрямку дослідження.....	28
РОЗДІЛ 2	
Розроблення удосконалених методів для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	31
2.1 Вплив крайового кута змочування на форму контуру фіксованої обертової краплі під час її обертання.....	31
2.2 Методика розрахунку параметрів контурів обертових крапель і аналіз отриманих результатів.....	36
2.3 Критерії подібності експериментального і розрахованого контурів обертових крапель.....	41
2.4 Методики порівняння координат точок експериментального і розрахованого контурів обертових крапель.....	45
2.4.1 Порівняння експериментального і розрахованого контурів фіксованих обертових крапель.....	46
2.4.2 Порівняння експериментального і розрахованого контурів вільних обертових крапель.....	47
2.5 Оцінка коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з досліджуваними рідинами.....	49
2.6 Удосконалені методи дослідження динамічного міжфазного натягу	

розчинів поверхнево-активних речовин.....	55
2.6.1 Метод вільної обертової краплі для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	55
2.6.2 Метод фіксованої обертової краплі для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	57
Висновки до розділу	60
РОЗДІЛ 3	
Розроблення удосконаленого приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	62
3.1 Структурна схема приладу	62
3.2 Розроблення конструкції вузлів приладу для утворення фіксованої і вільної обертових крапель легшої рідини	65
3.3 Розроблення і опис конструкції блоків приладу	68
3.4 Опис роботи електричної схеми вимірювального блоку приладу для визначення динамічного міжфазного натягу	72
3.5 Визначення координат точок контуру обертової краплі із її зображення	74
3.5.1 Спосіб оброблення зображення з непрозорою краплею	76
3.5.2 Спосіб оброблення зображень із прозорою краплею.....	81
3.6 Дослідження динамічного міжфазного натягу удосконаленим приладом методом вільної обертової краплі.....	83
3.7 Дослідження динамічного міжфазного натягу удосконаленим приладом методом фіксованої обертової краплі.....	85
3.8 Калібрування оптичної системи приладу	86
Висновки до розділу	89
РОЗДІЛ 4	
Метрологічний аналіз розроблених методів і приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	91
4.1 Аналіз інструментальних похибок приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	91

4.2 Аналіз методичних похибок приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	98
4.3 Розроблення методики перевірки приладу для дослідження міжфазного натягу рідин.....	107
Висновки до розділу	110
РОЗДІЛ 5	
Лабораторні випробування розробленого приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин.....	112
5.1 Розроблення методики проведення лабораторних випробувань.....	112
5.2 Аналіз результатів лабораторних випробувань.....	114
5.3 Результати натурних випробувань приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу і їх аналіз	125
Висновки до розділу	128
Висновки	130
Список використаних джерел	132
Додатки.....	137

ВСТУП

Актуальність теми. Поверхнево-активні речовини (ПАР) використовують практично в усіх галузях народного господарства. Особливістю при цьому є те, що невелика їх кількість у розчині дає можливість змінювати характер взаємодії контактуючих твердих тіл і рідин та розчинів при наявності в них ПАР. Завдяки цьому виникає можливість керувати процесами, пов'язаними із використанням таких ПАР, як миючі засоби, флотореагенти, піноутворювачі, стабілізатори емульсій, деемульгатори, антистатиками, інгібітори корозії тощо.

Однак актуальною задачею залишається вибір типу ПАР, основи його розчину і концентрації в ньому ПАР з урахуванням характерних особливостей і умов таких технологічних процесів, де мають місце відповідні технологічні рідини і де передбачається використання ПАР. Одним із найбільш визначальних параметрів, який характеризує якість підібраних ПАР у розчині є міжфазний натяг (МН) на межі розділу фаз розчин ПАР–технологічна рідина. Дослідження динамічного (змінного в часі) МН (ДМН) на межі розділу розчин ПАР–технологічна рідина дозволяє на основі отриманих результатів здійснювати оптимальний підбір ПАР і його концентрації у розчинах з урахуванням параметрів контактуючої з ним технологічної рідини і особливостей технологічного процесу.

Широко розповсюдженим методом для вимірювання низьких значень МН на межі розділу розчин ПАР-технологічна рідина є метод обертової краплі. Значну увагу розробленню різних варіантів цього методу і приладів для вимірювання МН методом обертової краплі приділяли і приділяють Г. Прінсен, Дж. Слаттері, С. Чен, М. Вільямс, В. Городнов, Р. Кісіль та інші. Тим не менше підвищення точності отриманих результатів при дослідженні ДМН, підвищення надійності роботи приладів для вимірювання МН методом обертової краплі залишаються актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичного плану виконання науково-

дослідної держбюджетної теми ІФНТУНГ Д1-07Ф "Дослідження нових енергоресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій видобування та транспортування вуглеводнів" (0107U001558), теми Д6-10П "Нові технології видобування вуглеводнів із родовищ з важковилучуваними запасами" (0110U000116), держбюджетної теми "Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрати та контролю обладнання і технологічних параметрів у нафтогазовій галузі" (0109U008878), де автор був виконавцем відповідних розділів, пов'язаних із розробленням методів і засобів для вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності визначення ДМН розчинів ПАР шляхом розроблення методу фіксованої і удосконалення методу вільної обертових крапель з регресійним визначенням координат точок контурів таких обертових крапель.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

– здійснити аналіз відомих варіантів методу обертової краплі і технічних засобів визначення ДМН розчинів ПАР цими варіантами і виявити шляхи удосконалення методу обертової краплі і технічних засобів, що його реалізують;

– розробити метод фіксованої обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом визначення координат точок контуру цієї краплі;

– удосконалити метод вільної обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом визначення координат точок контуру цієї краплі;

– отримати залежності для визначення коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з досліджуваними контактуючими рідинами по всьому діаметру трубки в процесі її обертання;

– розробити, виготовити і провести лабораторні і натурні випробування приладу для визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої і удосконаленим методом вільної обертових крапель з регресійним способом визначення координат точок контурів таких крапель;

здійснити метрологічний аналіз розробленого методу фіксованої і удосконаленого методу вільної обертових крапель для визначення ДМН розчинів

ПАР і приладу, що реалізує ці методи, а також розробити методику метрологічного забезпечення цього приладу.

Об'єктом дослідження є процес підбору ПАР і їх концентрацій у розчинах, які використовують в різних технологічних процесах.

Предметом дослідження є удосконалені методи обертової краплі для визначення динамічного МН розчинів ПАР.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися теорія капілярності Лапласа, числові методи Рунге-Кутта розв'язку диференційних рівнянь, теорія подібності для порівняння теоретичних і експериментальних капілярних поверхонь, методи теорії похибок та невизначеності вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблений метод фіксованої обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом визначення координат точок контуру цієї краплі, який дозволяє підвищити точність отриманих результатів, виключає неконтрольоване переміщення краплі легшої рідини у трубці з важчою рідиною під час їх обертання і дозволяє проводити дослідження ДМН розчинів ПАР при малих частотах обертання краплі;

- удосконалено метод вільної обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом визначення координат точок контуру цієї краплі, який підвищує точність отримуваних результатів і дозволяє проводити дослідження ДМН розчинів ПАР при малих частотах обертання краплі;

- вперше отримано залежності для визначення коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з досліджуваними рідинами, що дозволило підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої і удосконаленим методом вільної обертових крапель.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено конструкцію вузла для утворення фіксованої обертової краплі;
- розроблено прилад ВМН-2 для визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої і удосконаленим методом вільної обертових

крапель, за допомогою якого можна здійснювати підбір ПАР і їх концентрацій у розчинах, які використовують в різних технологічних процесах;

– розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє визначати координати точок експериментальних контурів фіксованої і вільної обертових крапель, розраховувати подібні до експериментальних теоретичні контури обертових крапель і шляхом їх порівняння визначати значення ДМН розчинів ПАР;

– впроваджено прилад ВМН-2, який реалізує розроблений метод фіксованої і удосконалений метод вільної обертових крапель для вибору ПАР і їх оптимальної концентрації у розчинах для інтенсифікації нафтовилучення на родовищах ВАТ "Укрнафта".

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: запропоновано метод фіксованої обертової краплі для отримання зміни МН в часі; проаналізовано вплив матеріалу пробки, до поверхні якої фіксують обертову краплю, на форму цієї краплі; розроблено методики порівняння теоретичного і експериментального контурів обертових крапель; зроблений аналіз ходу променів через скляну трубку з рідинами і отримані залежності для розрахунку коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з рідинами; розроблена методика визначення ДМН розчинів ПАР за допомогою удосконаленого приладу; запропонована конструкція пристрою для утворення фіксованої обертової краплі; здійснено метрологічний аналіз приладу ВМН-2 і запропонована методика його калібрування; розроблено алгоритм програми для визначення координат точок контуру обертової краплі на основі її зображення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: VI, VII, VIII і IX науково-практичних конференціях „Приладобудування 2007 (2008, 2009, 2010): Стан і перспективи” (м. Київ) – 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2010 р.; IV Всеросійській науково-практичній конференції "Нафтопромислова хімія" (м. Москва) – 2008р; конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків) – 2008р.; II і III

Всеукраїнських науково-технічних конференціях студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє приладобудування" (м. Київ) – 2009р., 2010р.; XXI Відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів "Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи" (м. Львів) – 2009р.; Міжнародній н/т конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми і перспективи" (м. Івано-Франківськ) – 2009 р.; 2-й науково-практичній конференції студентів і молодих учених "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ) – 2009р.; IV Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (м. Вінниця) – 2009 р.; V і VI Науково-практичних конференціях студентів та аспірантів «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (м. Київ) – 2009р., 2010 р., Науково-практичній конференції "Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України" (м. Івано-Франківськ) – 2010 р.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 24 наукові роботи, з яких 6 статей у фахових наукових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 1 патент України на винахід, 1 патент України на корисну модель, 16 тез доповідей на н/т конференціях.

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та 11 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 216 сторінок, з яких основний зміст викладено на 131 сторінці друкованого тексту, 39 рисунках і 18 таблицях. Список використаних джерел складається із 56 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО- АКТИВНИХ РЕЧОВИН

1.1 Характерні властивості розчинів поверхнево-активних речовин і особливості їх використання

Для збільшення нафтовіддачі і темпів розроблень нафтових покладів використовують водорозчинні ПАР [1]. Деякі з цих речовин, навіть при малій концентрації, знижують МН води на межі з нафтою і твердою поверхнею. Причиною цьому є адсорбція молекул ПАР на межі розділу вказаних фаз.

Адсорбція є результатом дії молекулярних сил, що неврівноважені на поверхні. Властивості ПАР залежать в значній мірі від характеристик гідрофільної та гідрофобної групи та їх балансу в молекулі.

По своєму складу і хімічних властивостях ПАР діляться на два класи: неіоногенні та іоногенні. Ці назви пов'язані з властивістю ПАР дисоціювати на іони у водних розчинах. Іоногенні ПАР діляться на аніонні та катіонні.

ПАР адсорбуються на твердих поверхнях. Розрізняють два види адсорбції — фізичну і хімічну. В першому випадку молекули ПАР пов'язані з молекулами твердої поверхні вандерваальсовими силами, в другому випадку молекули входять в хімічну взаємодію з молекулами твердої поверхні.

Адсорбція може бути мономолекулярною — одношаровою і полімолекулярною — багат шаровою.

Перевагою неіоногенних ПАР в нафтовидобутку є порівняно більша поверхнева активність і мала адсорбованість на пісчаниках і карбонатних породах в порівнянні з іоногенними.

Теорія Гіббса пов'язує зміну складу поверхневого шару і об'єму зі зміною поверхневого (міжфазного) натягу такою залежністю [2]:

$$-d\sigma = \Gamma_1 d\mu_1 + \Gamma_2 d\mu_2 + \dots, \quad (1.1)$$

де σ — поверхневий (міжфазний) натяг;

Γ — адсорбція;

μ — хімічний потенціал.

Для розрахунків адсорбції використовують спрощене рівняння, яке отримують вважаючи адсорбцію однієї речовини при низькій концентрації:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \frac{d\sigma}{dC}, \quad (1.2)$$

де R — газова стала;

C — концентрація;

T — температура.

Залежність МН від концентрації ПАР можна подати ізотермою в координатах σ – $\ln C$ (рис. 1.1), яка має 3 ділянки [1]. На криволінійній ділянці 1 ізотерми відбувається адсорбція у відповідності з рівнянням Гіббса, після досягнення граничної адсорбції, при концентрації C_m , залежність σ – $\ln C$ лінійна, так як $d\sigma/d\ln C = \Gamma_m RT = \text{const}$ (ділянка 2). Якщо ПАР змішується у всіх співвідношеннях з обома фазами, то із збільшенням концентрації ПАР МН зменшується до нуля. Якщо ПАР обмежено розчиняється в рідинах фаз (випадає як осад або утворює міцели), то МН знижується до моменту припинення розчинення (ділянка 3).

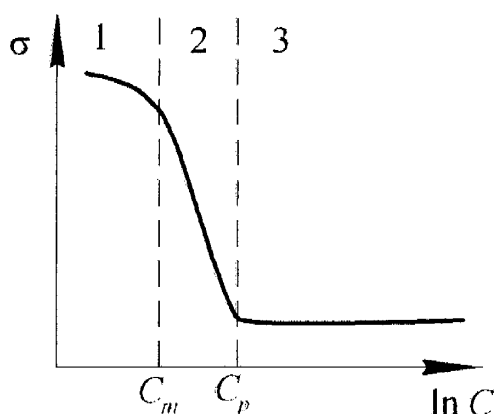


Рис. 1.1. Залежність МН від концентрації ПАР

Адсорбція в системі рідина-рідина має деякі особливості порівняно з

адсорбцією рідина-газ, що обумовлено тим, що ПАР може розчинятися в обох фазах, а значить, адсорбція відбувається з обох сторін границі розділу фаз.

На хід ізотерми МН здійснює вплив поведінка ПАР в об'ємі розчину — властивість ПАР утворювати міцели. По досягненню критичної концентрації міцелоутворення (ККМ) різкий спад МН припиняється. І при подальшому збільшенні концентрації ПАР ($C > C_p$) МН залишається практично постійним (ділянка 3 рис. 1.1) (фактично МН зменшується і за ККМ, але дуже слабо, так як основна маса ПАР в розчині і адсорбція практично не змінюються). Якщо в ПАР присутня поверхнево-активна добавка, то на ізотермі МН розчину ПАР в районі ККМ появляється мінімум.

Використання ПАР в нафтовидобутку залежить у великій мірі від їх адсорбційних властивостей. ПАР використовують в різних технологічних процесах нафтовидобування для покращення їх ефективності. В процесах буріння ПАР полегшують руйнування порід долотом, викликаючи зниження твердості. Добавляння неіоногенних ПАР у воду, що закачують в пласт, значно збільшує нафтовіддачу, зменшує строк розроблення покладів і знижує витрату води, яку закачують в пласт.

МН на границі розділу двох фаз може змінюватись в діапазоні 10^{-4} – 50 мН/м. Низькі значення МН властиві поверхням контакту нафти і розчину ПАР. На основі результатів визначення МН можна підбирати компоненти розчинів ПАР, оптимальний кількісний склад кожного з компонентів у ньому, що дає змогу ефективніше проводити відповідний технологічний процес.

1.2 Класифікація відомих методів дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

Великі значення рівноважного і динамічного МН (більші 0,1 мН/м) визначають методом ваги крапель [3]. Фізичною основою методу ваги крапель є взаємозв'язок МН і розміру крапель, що відриваються під дією гравітації:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g V}{2\pi f \left(\frac{V}{r^3}\right)}, \quad (1.3)$$

де $\Delta \rho$ — різниця густин рідин;

V — об'єм краплі, що відірвалася;

$f\left(\frac{V}{r^3}\right)$ — протабульована функція.

Якщо утворення краплі відбувається в рідині, в такому випадку визначають МН. Змінюючи об'ємну витрату досліджуваної рідини, можна змінювати час існування поверхні і при протіканні процесів адсорбції отримувати динаміку зміни МН в часі. При застосуванні методу до чистих рідин його точність складає 0,1 % [3]. Така висока точність пояснюється високою емпіричною обробкою методу.

Що стосується розчинів ПАР, то для них виникають затруднення, пов'язані з повільністю встановлення адсорбційної рівноваги і зміною площі поверхні краплі в процесі її росту. Коли визначають ДМН розчинів ПАР необхідно додатково враховувати вік поверхні τ . Величина τ не співпадає з часом формування краплі t , тому що в ході формування краплі адсорбція ПАР проходить в умовах утворення нової поверхні. Для ПАР, що суттєво зменшують МН між досліджуваними рідинами, використання методу ваги крапель утруднене через його малу чутливість.

Для визначення низьких значень МН (до 0,001 мН/м) використовують метод обертової краплі. Суть методу полягає в наступному. Нехай всередині рідини β (рис. 1.2), що знаходиться в запаяній трубці, присутня крапля більш легшої рідини α . Якщо почати обертати трубку навколо її осі, то більш важча рідина буде витіснятися до периферії, таким чином витісняючи краплю легшої рідини до осі трубки. В результаті крапля легшої рідини приймає видовжену вздовж осі обертання форму, цей ефект залежить від швидкості обертання. Даний процес проходить проти сил МН, які намагаються зробити краплю з меншою площею поверхні. Таким чином, при певній швидкості обертання, формі краплі і по її лінійних розмірах можна визначити величину МН.

Б. Воннегут [4] запропонував використовувати метод обертової краплі визначення МН при великих кутових швидкостях обертання, вважаючи, що крапля має форму циліндра із заокругленими краями. Він таким чином пов'язав МН з діаметром циліндричної частини краплі:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 D^3}{32}, \quad (1.4)$$

де $\Delta\rho$ — різниця густин рідин;

ω — швидкість обертання;

D — діаметр краплі.

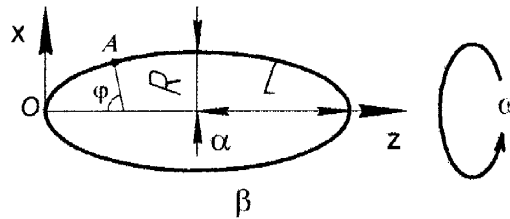


Рис. 1.2. Профіль краплі при обертанні навколо горизонтальної осі z

Звідси видно, що для визначення МН при відомих різниці густин фаз і заданій швидкості обертання, необхідно виміряти тільки одну величину — діаметр циліндричної частини краплі.

Чим менший МН, тим легше досягається циліндрична форма краплі. Якщо МН великий, то крапля при великій швидкості обертання може не бути циліндричною. В даному випадку для визначення МН необхідно зробити аналіз всієї форми краплі в обертовому полі.

Ще одним затрудненням є вимірювання діаметру краплі через скляну стінку капіляра, що відіграє роль сферичної лінзи і спотворює видимий контур краплі. Тому в [5] було запропоновано замінити вимірювання діаметру краплі на легко і точно вимірювану довжину краплі. Суть методу полягає в тому, що вимірюють довжину L (рис. 1.2) обертової краплі заданого об'єму V і знаходять відношення L/r_0 , де

$$r_0 = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.5)$$

Потім за допомогою відповідних таблиць знаходять значення параметру $c_r \cdot r_0^3$. Для більших значень L/r_0 , що не увійшли в таблицю (у випадку циліндричних крапель), параметр c_r знаходять з виразу:

$$L = \frac{2 \cdot c_r \cdot r_0^3 + 1}{3 \cdot c_r^{\frac{1}{3}}}. \quad (1.6)$$

Далі значення МН знаходять з виразу:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho \cdot \omega^2}{4 \cdot c_r}. \quad (1.7)$$

Подібний метод розробили Дж. Слаттері та С. Чен [6] для безрозмірних величин:

$$\begin{aligned} R^* &= R(2c_r)^{\frac{1}{3}}; \\ L^* &= L(2c_r)^{\frac{1}{3}}; \\ V^* &= V \cdot 2c_r. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Використовуючи розкладення для еліптичних інтегралів, вони розраховали відношення $R/L = R^*/L^*$ і V^* як функції R^* . На основі чого склали відповідні таблиці.

Щоб визначити МН за допомогою таблиць Дж. Слаттері та С. Чена необхідно виміряти R і L і по відношенню R/L знайти в таблиці значення R^* , після чого, знаючи R^* і R , визначити c_r з (1.8). Далі з (1.7) визначають значення МН. Вказані різновиди методу обертової краплі вимагають використання наперед розрахованих таблиць, які при визначенні МН інтерполюють або апроксимовують, що не забезпечує необхідної точності визначення МН.

З метою усунення необхідності попереднього визначення коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки Р. Кісілем був запропонований метод [7], який полягає в наступному. Вимірюють видимий радіус краплі $u_{\text{вим}0}$ і відстань x_0 від омбілічної точки до січення краплі, в якому вимірюють радіус $u_{\text{вим}0}$. Вимірюють радіус краплі $u_{\text{вим}1}$ на певній відстані x_1 від омбілічної точки O (рис. 1.2). При цьому відношення відстаней приймають наступним $x_1/x_0=0,1$. Розраховують теоретичні контури обертової краплі шляхом числового розв'язку

системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dl_c} = K_c - \frac{x_c^2}{2} - \frac{\sin \varphi}{x_c}, \\ \frac{dx_c}{dl_c} = \cos \varphi, \\ \frac{dz_c}{dl_c} = \sin \varphi, \\ \frac{dV_c}{dl_c} = \pi x_c^2 \sin \varphi, \\ \frac{dS_c}{dl_c} = 2\pi x_c, \end{cases} \quad (1.9)$$

де φ — кут між віссю обертання капіляра та нормаллю, проведеною до контуру обертової краплі в точку з координатами x_c, z_c (точка A на рис. 1.2);

l_c — безрозмірна довжина дуги меридіана профілю обертової краплі від її вершини;

x_c, z_c — безрозмірні координати точок теоретичного контуру обертової краплі;

V_c, S_c — безрозмірні об'єм і площа поверхні частини краплі, що розміщена між вершиною краплі і площиною, яка проведена через довільну точку поверхні краплі перпендикулярно осі z ;

K_c — кривизна поверхні обертової краплі в омбілічній точці.

Зв'язок між безрозмірними параметрами в (1.9) і розмірними наступний:

$$l_c = \frac{l}{c}, \quad x_c = \frac{x}{c}, \quad z_c = \frac{z}{c}, \quad V_c = \frac{V}{c^3}, \quad S_c = \frac{S}{c^2}, \quad K_c = K \cdot c, \quad (1.10)$$

де c — обертова стала:

$$c = \sqrt[3]{\frac{\sigma}{\Delta\rho\omega^2}}. \quad (1.11)$$

Для кожного розрахованого контуру визначають безрозмірну половину довжини контуру x_0/a і відповідний радіус y_0/a . З теоретичного контуру визначають y_1/a , яке відповідає довжині $x_1/a=0,1x_0/a$. Для всіх розрахованих контурів отримують апроксимаційну залежність виду $x_0/a=f(y_1/a)$.

МН σ визначають за виразом:

$$\sigma = \Delta\rho\omega^2 \left(\frac{x_0}{f(y_{\text{вим1}}/y_{\text{вим0}})} \right)^3. \quad (1.12)$$

Запропонований метод виключає визначення коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з рідинами. При цьому вважається, що значення коефіцієнта оптичного збільшення не залежить від радіусу краплі. В наступних розділах даної дисертаційної роботи буде показано, що тільки при певних умовах значення коефіцієнта оптичного збільшення залишається постійним для різних радіусів обертової краплі. При невиконанні потрібних умов коефіцієнт оптичного збільшення залежить від радіуса краплі, необхідність апроксимування залежності $f(y_1/y_0)$ і використання тільки чотирьох точок експериментального контуру обертової краплі для розрахунку теоретичного контуру не дозволяє використати всіх можливостей, закладених в запропонований метод. Якщо використовувати координати усіх точок контуру обертової краплі, то шляхом зменшення відхилень теоретичного контуру від дійсного можна зменшити вплив випадкових похибок на отриманий результат.

В методі, який запропонував Д. Джозефсон із співробітниками з метою стабілізації положення обертової краплі в трубці з важчою рідиною було запропоновано фіксувати краплю на тонкій дротині, яку закріплюють на осі трубки (рис. 1.3) [8, 9].

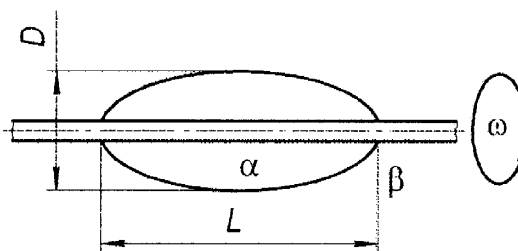


Рис. 1.3. Обертова крапля на дротині

МН σ визначають за такою залежністю:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 D^3}{8J_D(L/D)}, \quad (1.13)$$

де $J_D(L/D)$ – параметр, який розраховують за допомогою відповідної таблиці.

Для витягнутих крапель з $L/D > 5$ $J_D(L/D) = 4$ залежність (1.13) перетворюється на формулу Б. Воннегута (1.4).

Недоліком даного методу є вплив змочування легшою рідиною матеріалу дротини на форму обертової краплі. При повному змочуванні легшою рідиною дротини крапля розтікається по дротині тонкою плівкою, що затрудняє вимірювання її довжини L . При частковому змочуванні розтікання краплі по дротині відбувається з утворенням кута натікання, який не є рівноважним, що впливає на розміри краплі і отриманий результат. Відхилення дротини від осі обертання трубки призводить до того, що частина краплі також відхиляється разом з дротиною від осі обертання внаслідок чого форма краплі спотворюється.

Запропонований метод придатний для визначення МН при довготривалих (довших декількох хвилин) спостереженнях. Але цей метод не може бути використаний для дослідження ДМН розчинів ПАР, в яких зміна МН до рівноважного значення відбувається за декілька хвилини. Це обмеження пов'язане із способом заповнення трубки досліджуваними рідинами – краплю легшої рідини, яка знаходиться на дротині, поміщують в трубку з важчою рідиною до початку вимірювань. Таким чином границя розділу фаз рідин, на якій відбувається адсорбція ПАР, утворюється до приведення трубки в обертання. І в момент початку визначення МН після приведення трубки з рідинами в обертових рух процес адсорбції ПАР встигає відбутись частково або повністю, що обмежує використання цього методу для дослідження ДМН розчинів ПАР.

1.3 Аналіз відомих пристроїв для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

Вперше, крім теоретичних досліджень, певні використання вимірювальних пристроїв, які реалізували метод обертової краплі, виконав А. Зільберберг ще в 1952 р. [10]. За допомогою запропонованого пристрою він визначав низькі значення МН у полімерних системах. При цьому діаметр краплі вимірювався

оптичним методом з врахуванням фокусуєної дії скляної трубки як циліндричної лінзи, яка знаходилася в контактi з рідиною. Запропоновано в процесі градування системи з метою визначення коефіцієнта заломлення використовувати калібровані по діаметру стержні із пластмаси малої густини або пустотілі циліндри, які самоцентруються в рідині, яка знаходиться в трубці, що обертається. А. Зільберберг вперше запропонував обчислювати коректуючий коефіцієнт заломлення як відношення коефіцієнтів заломлення оточуючої краплю рідини і оточуючого трубку середовища по відношенню до вакууму.

Г. Принсен та співробітники [5] в розробленому ними пристрої для контролю МН різних систем використовують скляну трубку з внутрішнім діаметром $10 \pm 0,01$ мм і довжиною 220 мм. Верхній діапазон швидкостей обертання – 10 тис. об/хв, похибка вимірювання швидкості обертання – 1 об/хв. Об'єм краплі більш легкої рідини задавався за допомогою мікробюретки з медичною голкою з похибкою $0,0001 \text{ см}^3$. При цьому вказану краплю вони вводили через капіляр діаметром 1,5 мм і довжиною близько 40 мм, яка знаходилася в одній з двох притертих скляних пробок трубки. Після введення краплі заданого об'єму (в межах $0,1 \div 0,2 \text{ см}^3$) шляхом дотягування другої пробки без капіляра, частина більш важкої рідини витіснялась з трубки через вказаний капіляр у першій пробці. В подальшому процесі обертання трубки капіляр залишався постійно відкритим, однак це не сприяло утворенню повітряних бульбашок у середині трубки, що оберталася. З іншого боку, наявність вказаного капіляра на осі обертання трубки дозволяє в середині неї, при введенні краплі, а також дотисканні двох пробок, не створювати надлишкових тисків. Діапазон значень МН, виміряних розробленим Г. Принсеном пристроєм, склав $26 \div 66 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Теоретично досліджували вплив товщини стінок труби, а також діаметра обертової краплі на коефіцієнт заломлення М. Коуколас і ін. [11]. Вони показали, що при паралельному розповсюдженні світла величину M можна обчислювати відношення коефіцієнтів заломлення оточуючої краплю рідини і оточуючого трубку середовища до вакууму лишень тоді, коли зовнішній діаметр трубки в 3 і більше раз більший її внутрішнього діаметру, або внутрішній діаметр трубки в

два і більше раз більший діаметра обертової краплі.

Вперше повітряні підшипники в пристроях для визначення МН рідин застосував С. Торца [12]. При цьому скляна трубка (довжиною 180 мм, $R_{зовн.}=6$ мм і товщиною стінки 1,6 мм) мала припаяні металічні (коварові) наконечники з різьбовими отворами, які закривалися тефлоновими гвинтами. В одному з гвинтів був виготовлений осьовий канал діаметром 1 мм, через який в трубку вводять точно відому кількість легшої рідини. Цей канал можна щільно закривати, якщо обидві фази рідкі, а якщо більш легкою фазою є газ, канал повинен залишатись відкритим, бо в протилежному випадку об'єм газової бульбашки змінювався при закорковуванні капілярного отвору. Привідний механізм приладу С. Торца складається із магнітної муфти щеплення, прецизійного регулятора кутової швидкості і електромагнітної муфти включення. Робоча швидкість обертання трубки в приладі С. Торца змінювалася в межах від 0 до 7000 об/хв. При великих швидкостях обертання виникають вібрації краплі. Завдяки використанню повітряних підшипників, прилад міг довгий час працювати при великих кутових швидкостях обертання без помітного перегріву. Це дозволило використовувати такий прилад для контролю МН систем з дуже в'язкими рідинами і в яких рівновага встановлюється дуже повільно.

Значні теоретичні і експериментальні дослідження щодо гіроскопічної рівноваги (стан, при якому швидкість обертання краплі строго рівна швидкості обертання трубки, в якій знаходяться дві досліджувані рідини) провели С. Маннінг і Л. Скрівен [13]. З цією метою в краплю більш легкої рідини вони вводили тонкодисперсійні частинки вуглецю і спори лікоподію, а після цього спостерігали за їх поведінкою в світлі стробоскопа при обертанні трубки. При цьому автори вважали, що якщо має місце відставання швидкості обертання краплі на 1 об/хв від кутової швидкості обертання трубки, то гіроскопічна рівновага вже порушується. Проведені експериментальні дослідження показали, що практично при $f \approx 5000$ об/хв гіроскопічна рівновага з вказаним вище відставанням $\Delta f \leq 1$ об/хв має місце. Крім того, автори також значну увагу приділили досліджуванню стійкості форми обертової краплі. Вони показали, що

на форму обертової краплі впливають розміри трубки, форма використовуваних пробок, тепловий градієнт по довжині трубки в процесі її обертання, збалансованість всіх деталей, що обертаються разом з трубкою.

На основі рекомендацій С. Маннінга та Л. Скрівена [13] Я. Сіто та Л. Скрівен [14] створили вдосконалений прилад для контролю МН методом обертової краплі. Тримач зразків рідини у вказаному приладі виготовлений з скляної трубки подвійної точності. В результаті цього значно зменшено в азимутальному напрямі оптичне спотворення трубки, яка обертається, а уявний діаметр всіх крапель, крім дуже малих, можна також вимірювати при неперервному, а не тільки стробоскопічному освітленні. Робочу кутову швидкість обертання трубки в приладі можна плавно регулювати від нуля до 15 тис. об/хв, при чому варіації швидкості не перевищують 0,3 %. В приладі застосовані повітряні підшипники, які гідродинамічно центрують вал, що обертається, а також дозволяють уникнути небажаних ефектів, пов'язаних з виділенням тепла в підшипниках при довготривалій роботі приладу (до 40 годин). На прецизійний вал з виточеним на його кінці шпинделем постійно надіта скляна трубка. Це забезпечує співпадання осьової лінії внутрішньої поверхні трубки з віссю обертання, а також дає можливість зверху трубки одягти термостатуючий корпус і подавати в нього повітря відповідної температури, яка значно відрізняється від кімнатної.

В іншому варіанті приладу скляну трубку встановлюють з ковзаючою посадкою в прецизійне гніздо, яке виготовлене в торці вала і обладнане кільцевими гумовими прокладками. Це дозволяє легко міняти трубку, однак точність співвісності при цьому гірша, ніж у випадку вала з виточеним на його кінці шпинделем. Привід від двигуна здійснюється за допомогою реміневої зубчатої передачі, натяг якої ретельно регулюють. Крім того, Я. Сіто та Л. Скрівен також пропонують коефіцієнт заломлення трубки із заповненими рідинами визначати згідно пропозиції А. Зільберберга [10] як рівний показнику заломлення рідини з більшою густиною по відношенню до повітря. Для цієї мети пропонують використовувати рефрактометри. Методична похибка при цьому складає всього 0,03 %, а також відсутні ті труднощі, які зв'язані з встановленням у

трубки плаваючих пустотілих предметів каліброваного діаметра.

З приладів, які реалізують метод обертової краплі і які виготовлені в Росії, відома конструкція, розроблена під керівництвом проф. В. Городнова [15]. Прилад складається з механічної і електричної частин. Механічна частина містить вузол обертання, привідний двигун, регулювальний гвинт нахилу вузла обертання, мікроскоп МБС-2, імпульсну лампу стробоскопа, а також давач лічильника обертів. При цьому вузол обертання скляної трубки складається з корпусу з двома протилежними прорізами, в середині якого на підшипниках вмонтована латунна гільза з такими же прорізами. Заповнену досліджуваними рідинами скляну трубку з одним запаяним кінцем встановлюють в латунну гільзу, після чого закривають пробкою з гумовими ущільнювачами. Передавання обертового моменту від двигуна латунній гільзі здійснюється за допомогою жорсткого співвісного з'єднання.

Вимірювання діаметра обертової краплі здійснюють за допомогою мікроскопа МБС-2, кутову швидкість обертання вимірюють частотоміром Ф571. Діапазон регульованих швидкостей обертання складає 30...165 об/с. Визначення МН в приладі В. Городнова проводять при кімнатній температурі в діапазоні його зміни від 0,01 до 75 мН/м.

Інший відомий прилад вітчизняного виробництва — ВМН-1, який використовують для визначення МН рідин методом Б. Воннегута [16]. Вимірювання діаметру краплі в даному приладі можливе вручну — за допомогою вимірювального мікроскопа, або в напівавтоматичному режимі — за допомогою спеціального вимірювального блоку при цьому участь оператора зводиться до фіксування проходження контрольної відмітки шкали мікроскопа через нижню і верхню межу обертової краплі. При цьому на табло приладу висвічується значення діаметру краплі в трубці. В подальшому оператор повинен вручну розраховувати МН за виразом (1.4). Основні технічні характеристики приладу ВМН-1 наведені в табл. 1.1.

В подальшому прилад ВМН-1 був удосконалений, в новому варіанті замість вимірювального мікроскопа пропонувалось використовувати чорно-білу

відеокамеру роздільною здатністю 640x480 точок [7]. За допомогою відеокамери отримувати зображення обертової краплі і здійснювали його оброблення на персональному комп'ютері для визначення МН згідно методу [7]. Використання відеокамери дозволило в автоматизувати процес визначення МН. Значення похибки визначення склало приблизно 1,5%.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики приладу ВМН-1

Назва величини	Значення
Діапазон визначення МН	$10^{-3} \div 10$ мН/м.
Межа основної приведенної похибки	1,5%
Частота обертання трубки	600 ÷ 10000 об/хв.
Температурний діапазон	20 °С ÷ 100 °С.
Розміри трубки	
внутрішній діаметр	2,7 мм.
зовнішній діаметр	7,2 мм.
Вага	20 кг

Останнім часом прилади для контролю МН широко використовують для одержання температурних залежностей МН, для проведення досліджень щодо впливу різних ПАР на МН, для підбору ПАР з метою інтенсифікації нафтовидобутку тощо. При цьому ці прилади відрізняються своїми конструкціями, призначенням, методиками проведення контролю, діапазоном контролю МН.

Із світових фірм, які здійснюють випуск приладів для контролю МН методом обертової краплі в даний час відомі такі: Kruss, Temco, Grace Instrument, Dataphysics.

Прилад М6500 фірми Grace Instrument призначений для визначення низьких значень міжфазного і поверхневого натягу різних рідин [17]. Для визначення МН цим приладом використовують метод Б. Воннегута. Визначення можливе в ручному і автоматичному режимах. В ручному режимі вимірюють діаметр краплі

і за виразом (1.4) визначають МН, в автоматичному режимі значення МН визначається спеціальним електронним блоком, який під'єднують до мікроскопа. Вимірювання можна проводити при різних температурах. При температурах вищих за кімнатну використовують нагрівач, встановлений у приладі. Для температур нижчих за кімнатну використовують пристрій для охолодження рідин, в який через патрубки подають охолоджуючу рідину. Для отримання високої частоти обертання трубки з рідинами в приладі використовують пасову передачу. Тримач трубки з рідинами встановлюють в підшипники тертя. Відсутність вібрацій трубки з рідинами забезпечується за рахунок прецизійної підгонки поверхонь тертя в підшипнику. При тривалій експлуатації приладу підшипники тертя зношуються і періодично виникає потреба в заміні підшипників на нові. Вирівнювання приладу відносно горизонту здійснюється вручну за допомогою спеціального гвинта перед визначення МН. Основні технічні характеристики приладу М6500 наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Технічні характеристики приладу М6500

Назва величини	Значення
1	2
Діапазон визначення МН	$10^{-6} \div 2$ мН/м.
Частота обертання трубки	$0 \div 11000$ об/хв.
Температурний діапазон	$7^{\circ}\text{C} \div 104^{\circ}\text{C}$.
Роздільна здатність мікроскопа	0,001 мм.
Коефіцієнт збільшення мікроскопа	25
Діаметр трубки	3,5 мм
Вага	8,8 кг

Розглянутий прилад дозволяє визначати рівноважний МН рідин. При довготривалих вимірюваннях необхідно спостерігати через мікроскоп за обертовою краплею вручну, вирівнюючи прилад так, щоб крапля не виходила за межі поля зору мікроскопа. Для визначення ДМН рідин впродовж тривалого

періоду часу вручну фіксують значення МН в певні моменти часу і потім здійснюють обробку результатів вимірювань. Вище сказане накладає деякі обмеження на використання приладу з метою визначення ДМН рідин впродовж тривалого часу.

Основним застосуванням приладу 510 фірми Temco є нафтовидобувна справа [18] з метою дослідження властивостей ПАР. Для визначення МН також використовують метод Б. Воннегута. В приладі використовують електронний блок для стабілізації температури рідин, вимірювальну відеосистему — для вимірювання розмірів краплі. Визначення МН здійснюється комп'ютером за допомогою відповідного програмного забезпечення. За допомогою комп'ютера можна визначення зміну МН в часі в автоматичному режимі. При цьому зміна МН відображається на екрані монітора у вигляді графіка в режимі реального часу. В приладі можливе формування краплі в процесі обертання трубки з важчою рідиною. Для цього, через мембрану в пробці встановлюють голку шприца заповненого легшою рідиною і витискають краплю легшої рідини. Для обертання трубки з рідинами використовують безколекторний двигун. Вирівнювання трубки з рідинами відносно горизонту також здійснюють вручну за допомогою ніжок приладу. В приладі можливе використання трубок з внутрішніми діаметрами 2 і 4 мм. Основні технічні характеристики приладу 510 наведені в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Технічні характеристики приладу 510

Назва величини	Значення
Діапазон визначення МН	$10^{-5} \div 70$ мН/м.
Частота обертання трубки	1000 ÷ 11000 об/хв.
Точність завдання частоти обертання трубки	0,1 %
Температурний діапазон	30 ÷ 100 °С.
Внутрішній діаметр трубки	2 і 4 мм
Вага	31 кг

Прилад 510 дозволяє визначати ДМН розчинів ПАР в режимі реального часу. Зміна МН відображається на екрані монітора у вигляді графіка. Для дослідження адсорбційних процесів на межі розділу рідин в розглянутому приладі можливе заповнення трубки легшою рідиною в процесі її обертання. При довготривалих вимірюваннях необхідно слідкувати за положенням краплі легшої рідини в полі зору відеокамери і при необхідності здійснювати вирівнювання трубки з рідинами.

Прилади SVT20 і SVT 15 фірми Dataphysics дозволяють визначати рівноважний і динамічний МН рідин, релаксаційні процеси в'язких рідин і крапель рідин [19]. Визначення МН для витягнутих крапель здійснюють методом Б. Воннегута, в інших випадках використовують рівняння Юнга-Лапласа. В останньому випадку розрахунок МН проводять за формою обертової краплі. Для дослідження релаксаційних процесів в'язких рідин використовують метод осцилюючої обертової краплі. Визначають МН з допомогою комп'ютера, який використовують для керування різними блоками приладу: задавання частоти обертання, дозування легшої рідини. Стробоскопічне освітлення в приладі здійснене за допомогою світлодіодів, які дають монохромне освітлення обертової краплі. Також використання в освітлювачі світлодіодів дає можливість змінювати яскравість освітлення трубки з рідинами. Як і в попередньому приладі використовують трубки розмірами 12 і 6,25 мм, які виготовлені з боросилікатного скла. Характерною відмінністю даного приладу від розглянутих раніше є використання блоку позиціонування і нахилу трубки з рідинами з метою автоматичного центрування поля зору відеокамери на обертовій краплі. В програмному забезпеченні до приладу передбачено автоматичне коригування зміни густини рідин та коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки від зміни температури. Основні технічні характеристики приладу SVT20 наведені в табл. 1.4.

Таким чином, розглянутий прилад дозволяє автоматично визначати зміну МН в режимі реального часу, відображаючи цю зміну у вигляді графіка на екрані монітора. Втручання оператора при роботі з приладом зведене до мінімуму за

рахунок використання механізму автоматичного регулювання кута нахилу трубки з рідинами і позиціонування об'єктива відеокамери.

Таблиця 1.4

Технічні характеристики приладу SVT20

Назва величини	Значення
1	2
Діапазон визначення МН	$10^{-6} \div 2 \cdot 10^3$ мН/м.
Частота обертання трубки	0 ÷ 20000 об/хв.
Точність завдання частоти обертання трубки	0,001 об/хв.
Нестабільність частоти обертання двигуна впродовж тривалого часу	±0,5 об/хв
Температурний діапазон	-10 ÷ +130 °С.
Діаметр трубки зовнішній	12 або 6,25 мм.
внутрішній	8 або 2,45 мм.
Кут перекоосу трубки з рідинами	±10°
Роздільна здатність відеокамери	768x576 точок
Вага	25 кг.

Прилад Site100 фірми Kruss призначений для визначення МН між двома рідинами, наприклад, нафтопродуктом і розчином ПАР методом Б. Воннегута [20]. Прилад складається з механічного і електронного блоків. До складу механічного блоку входять трубка, двигун, освітлювач на світлодіодах, телекамера з ПЗЗ елементами. Електронний блок містить джерело живлення, блок керування, дисплей. Прилад підключають до персонального комп'ютера через послідовний інтерфейс RS232, а відеокамеру через відеоінтерфейс. Керування приладом здійснюється за допомогою комп'ютера. Визначають МН за допомогою розробленого програмного забезпечення, яке дозволяє отримувати часові

залежності МН. Основні технічні характеристики приладу Site 100 наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Технічні характеристики приладу Site100

Назва величини	Значення
Діапазон визначення МН	$10^{-6} \div 50$ мН/м.
Частота обертання трубки	$0 \div 20000$ об/хв.
Температурний діапазон	$0 \div 100^{\circ}\text{C}$.
Діаметр трубки	3,5 мм.
Вага	15 кг.

Прилад Site100 дозволяє автоматизувати процес визначення МН за рахунок використання комп'ютера для керування роботою приладу і визначення МН.

Таким чином, в розглянутих вище приладах переважно використовують метод Б. Воннегута як найбільш простіший в реалізації. Побудова самих приладів спрямована на автоматизацію процесу вимірювання. Це здійснено за рахунок використання різних технічних рішень, а саме: відеосистеми для отримання зображення обертової краплі з подальшою обробкою цього зображення на персональному комп'ютері для визначення потрібних розмірів обертової краплі, за якими розраховують МН, автоматичного керування частотою обертання двигуна, автоматичного або ручного завантаження краплі легшої рідини вже в процесі обертання трубки з важчою рідиною, що дозволяє повніше дослідити зміну МН в часі, використання системи автоматичного слідування положення краплі в полі зору відеокамери приладу (тільки прилад SVT20).

Обґрунтування і вибір напрямку дослідження

На даний час існує велика кількість модифікацій методу обертової краплі визначення МН (Б. Воннегута, Г. Прінсена, Дж. Слаттері, Р. Кісіля), які можна

застосовувати для визначення ДМН розчинів ПАР. Згідно зробленого аналізу видно, що в сучасних приладах для визначення МН рідин в основному використовують метод Б. Воннегута, як найпростіший в технічній реалізації. Для визначення МН цим методом необхідно вимірювати кутову частоту обертання, радіус або діаметр краплі легшої рідини, а також знати коефіцієнт оптичного збільшення M розмірів краплі. Але для визначення МН методом Б. Воннегута необхідно досягати умови, щоб довжина краплі була в чотири рази більшою за її діаметр, що при певних умовах (великі значення МН і різниці густин рідин, а також при малих об'ємах краплі легшої рідини) вимагає значних кутових швидкостей обертання (до 10000 об/с) трубки з досліджуваними рідинами. Метод Г. Принсена є складнішим в реалізації порівняно з методом Б. Воннегута при проведенні визначення МН тому, що вимагає точного задавання або вимірювання об'єму краплі легшої рідини. Задавання точного об'єму краплі легшої рідини вимагає застосування в приладах точних дозуючих пристроїв. Але застосування таких пристроїв не гарантує точне задавання об'єму краплі тому, що в процесі утворення крапля легшої рідини може розділятися на дрібніші краплі, частина легшої рідини може залишатись в пристрої, через який її вводили (наприклад, в голці дозатора). Визначення об'єму краплі під час її обертання також не є достатньо точним тому, що форма краплі, яка обертається не описується жодним простим рівнянням, яке можна використати для обчислення її об'єму. Також недоліком даного методу є те, що визначення МН вимагає використання відповідних таблиць, які як правило необхідно інтерполювати або апроксимувати. Згідно перерахованих вище причин метод Г. Принсена не використовують в сучасних приладах. Метод Дж. Слаттері вимагає вимірювання довжини і радіусу краплі і подальшого визначення МН з використанням спеціальних таблиць. Метод Р. Кісіля вимагає апроксимації функції $f(y_1/y_0)$ і використовує обмежену кількість точок експериментального контуру обертової краплі, що обмежує точність запропонованого методу.

При тривалому в часі визначенні МН з метою дослідження динаміки його зміни запропонованими методами і приладами виникають затруднення, які

пов'язані із зміщенням краплі вздовж осі обертання. Причиною зміщення краплі є порушення гіростатичної рівноваги, вібрації в механічному вузлі приладів, градієнт температур в трубці. Зміщення краплі призводить до виходу її з поля зору об'єктива мікроскопа або відеокамери, що затруднює подальші дослідження ДМН розчинів ПАР. Це ставить високі вимоги до проектування і виготовлення механічного вузла приладу.

Для усунення перерахованих недоліків вище розглянутих методів необхідно розробити метод визначення ДМН розчинів ПАР, який буде стійкішим до вібрацій в приладі, що зменшить вимоги до конструкції механічного вузла приладу, не вимагатиме використання таблиць або апроксимаційних залежностей для розрахунку МН, не вимагатиме точного задавання об'єму краплі легшої рідини, і дозволить визначати МН при менших частотах обертання трубки із рідинами. Виходячи з вище сказаного задачами дисертаційної роботи є наступні:

- 1) розробити метод визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом розрахунку координат точок контуру обертової краплі, який усуне неконтрольоване переміщення краплі легшої рідини в трубці;
- 2) удосконалити існуючий метод обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР, який дозволить підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР;
- 3) розробити прилад для визначення ДМН розчинів ПАР розробленим і удосконаленим методами обертової краплі;
- 4) здійснити метрологічний аналіз розробленого приладу. Розробити методику його атестації і повірки, які дозволять експериментальним шляхом визначати похибку визначення ДМН розчинів ПАР приладом;
- 5) провести лабораторні випробування розробленого приладу з метою підтвердження дієздатності розробленого і удосконаленого методів визначення ДМН розчинів ПАР.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

2.1 Вплив крайового кута змочування на форму контуру фіксованої обертової краплі під час її обертання

У відомих модифікаціях методу вільної обертової краплі для визначення ДМН розчинів ПАР може відбуватись зміщення краплі легшої рідини вздовж горизонтальної осі обертання трубки із досліджуваними рідинами [3, 9] в процесі вимірювання розмірів обертової краплі. Причинами такого зміщення краплі є вплив гравітаційного поля землі, відхилення осі обертання трубки від горизонтального положення, вібрації трубки з рідинами, виникнення локальних течій важчої рідини через градієнт температур тощо. Для усунення вказаного зміщення краплі легшої рідини використовують вузли для прецизійного вирівнювання трубки з рідинами відносно горизонтальної осі, використання в механічних вузлах приладів спеціальних пристроїв зменшення вібрацій: повітряних підшипників, магнітних муфт тощо [3].

В даній роботі пропонується утворювати фіксовану краплю легшої рідини на вертикальній твердій поверхні пробки всередині горизонтально орієнтованої трубки з важчою рідиною. Під час обертання трубки з рідинами крапля легшої рідини буде витіснятись важчою рідиною вздовж горизонтальної осі обертання. При цьому вільний кінець фіксованої краплі буде витягуватись вздовж осі обертання. Іншим кінцем крапля легшої рідини буде утримуватись на твердій поверхні пробки за рахунок сил адгезії. Таким чином для утримування краплі на твердій поверхні пробки є необхідність, щоб легша рідина краще змочувала матеріал, з якого виготовлена пробка, ніж важча рідина. В стаціонарному процесі обертання фіксована крапля легшої рідини приймає форму зображену на рис. 2.1.

Розглянемо процес утворення краплі легшої рідини 1 на поверхні пробки 2.

Формування краплі легшої рідини 1 на поверхні пробки 2 можливе в процесі обертання трубки 3 з важчою рідиною 4, що можна використати для визначення ДМН розчинів ПАР тому, що досліджувані рідини вже перебувають в гіростатичній рівновазі. Процес утворення краплі показаний відповідними положеннями на рис. 2.2.

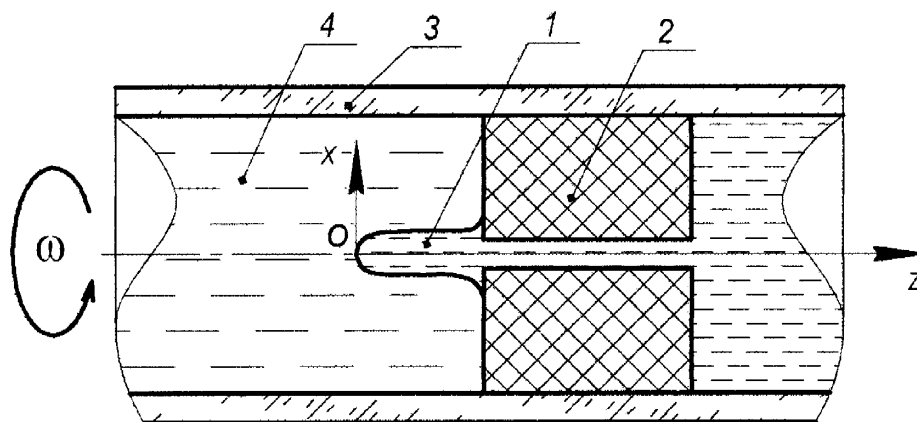


Рис. 2.1. Форма фіксованої краплі легшої рідини на вертикальній твердій поверхні пробки всередині трубки з важчою рідиною в процесі її обертання:

1 — крапля легшої рідини; 2 — пробка; 3 — скляна трубка; 4 — важча рідина

У пол. 1 легша рідина знаходиться в отворі пробки. При витисканні легшої рідини через отвір пробки в більш важчу рідину відбувається рух лінії трифазного контакту із збереженням постійного кута натікання $\theta_{nat} < 90^\circ$, який утворюється між границею розділу фаз двох рідин і горизонтальною стінкою отвору в пробці. В пол. 2 лінія трифазного контакту буде знаходитись на краї отвору пробки. При подальшому надходженні легшої рідини через отвір пробки, границя розділу фаз буде вигинатись з пол. 2 у пол. 3. Край отвору повинен мати округлення невеликого радіусу (від 0,05 до 0,1 мм), що забезпечує переміщення лінії трифазного контакту з горизонтальної стінки отвору в пробці на вертикальну поверхню пробки. З пол. 3 починається формування краплі легшої рідини на вертикальній поверхні пробки. При подальшому поступленні рідини через отвір крапля легшої рідини буде розтікатись по вертикальній поверхні пробки пол. 3 — пол. 6. Крапля не розтікається по поверхні пробки через дію сил змочування тому,

що розтіканню краплі протидіє сила витіснення з боку важчої рідини. При збільшенні об'єму краплі легшої рідини, остання розтікається по поверхні пробки з утворення кута натікання (пол. 4 ÷ пол. 6). Процес натікання краплі на тверду поверхню при збільшенні її об'єму відбувається до певної стадії (пол. 6). При подальшому збільшенні об'єму краплі вона витягується вздовж осі обертання з утворенням циліндричної частини її контуру.

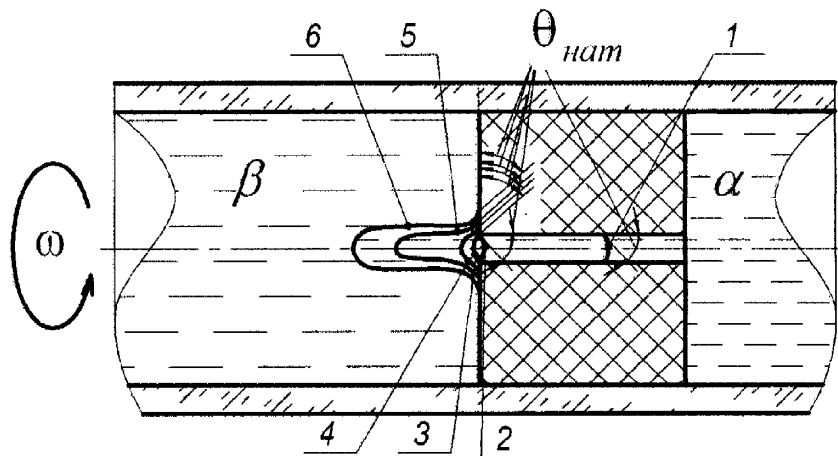


Рис. 2.2. Формування краплі легшої рідини на вертикальній поверхні пробки під час обертання трубки з рідинами

Частина контуру краплі, точки якого не зазнають впливу сил змочування між легшою рідиною і пробкою, описується рівнянням (1.9). Натікання краплі легшої рідини по твердій поверхні пробки призводить до відхилення її контуру від теоретичного, розрахованого за допомогою рівняння (1.9). При натіканні краплі легшої рідини контур краплі біля поверхні пробки деформується в бік менших радіусів [21, 22]. В такому випадку для визначення ДМН розчинів ПАР необхідно використовувати частину контуру обертової краплі, яка не спотворена, що буде розглянуто в наступних розділах.

На процес змочування краплею рідини поверхонь твердих тіл мають вплив наступні характеристики поверхні твердого тіла: хімічна чистота, матеріал твердого тіла, шорсткість, неоднорідність поверхні [21 ÷ 23].

Так як фіксування краплі відбувається на поверхні твердого тіла, то

необхідно здійснювати правильний вибір матеріалу пробки 2, з якого вона буде виготовлена. Різні тіла мають різну ступінь взаємодії з рідинами. Кількісним показником цієї взаємодії є рівноважний крайовий кут змочування θ_0 . Також на вибір матеріалу має значення його хімічна інертність відносно досліджуваних рідин. В [24] пропонують виготовлювати пробки, якими буде закриватись трубка з фторопласту тому, що фторопласт не взаємодіє з досліджуваними нафтопродуктами і є достатньо пружним для герметичного закриття трубки з рідинами.

В літературних джерелах практично не приведені значення крайових кутів в системі фаз нафтопродукт—вода—тверде тіло. В зв'язку з цим необхідно визначити крайові кути змочування трифазного контакту між різними нафтопродуктами, твердими тілами і водою. Визначення крайового кута змочування здійснювалось нами шляхом його розрахунку за розмірами краплі [22]. Результати таких досліджень наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Крайові кути змочування різних матеріалів

Матеріал твердого тіла	Рідина краплі	Речовина оточуючого середовища	Значення θ_0 , кутові градуси
Фторопласт	Керосин	Вода	менше 10
Фторопласт	Керосин	Повітря	32
Фторопласт	Нафта	Вода	менше 10
Фторопласт	Нафта	Повітря	26
Фторопласт	Вода	Повітря	94
Мідь	Керосин	Вода	менше 10
Мідь	Керосин	Повітря	менше 10
Мідь	Нафта	Вода	менше 10
Залізо	Нафта	Вода	менше 10

Як видно із табл. 2.1 фторопласт досить добре змочується вказаними

нафтопродуктами і погано змочується водою. У випадку дослідження водних розчинів ПАР, як було вказано вище, фторопласт добре підходить для виготовлення пробки, до якої буде фіксуватись крапля легшої рідини. Приведені в табл. 2.1 метали не можуть бути використані для фіксування краплі легшої рідини, так як вони можуть вступати в хімічну реакцію з досліджуваними розчинами ПАР.

Згідно [22] шорсткість поверхні твердого тіла також впливає на видимий кут змочування. Такий кут змочування називається макрокрайовим θ_{III} . Співвідношення між макрокрайовим θ_{III} і крайовим θ_0 кутами змочування наступне [21,22]:

$$\cos\theta_{III} = K \cos\theta_0, \quad (2.1)$$

де K — відношення фактичної площі поверхні твердого тіла до проекції на відповідну площину.

Нехай нерівності поверхні твердого тіла мають трикутну форму в поперечному січенні з відстанню між вершинами рівною $2a$ і глибиною R_{max} . Тоді K буде дорівнювати:

$$K = \frac{\sqrt{a^2 + R_{max}^2}}{a}. \quad (2.2)$$

Якщо глибини всіх западин нерівностей твердої поверхні приблизно однакові, то величина R_{max} буде приблизно рівною параметру шорсткості R_z .

Виходячи з (2.1) шорсткість поверхні повинна бути такою, щоб не призводила до суттєвої зміни макрокрайового кута. З використанням відеотехніки визначення крайового кута можливе з точністю не гіршою 1° [25]. Тоді зміна макрокрайового кута із-за шорсткості поверхні не повинна перевищувати 1° . Як видно із табл. 2.1 при використанні фторопласту для виготовлення пробки 4 реальні значення крайових кутів є меншими 10° . При цьому значенні крайового кута з (2.1) знаходимо, що $K=1,003$. З (2.2) отримуємо, що висота западин не повинна перевищувати 7 мкм., що приблизно відповідає шорсткості поверхні $Ra=1,75$ мкм. Така шорсткість поверхні досягається відповідною механічною обробкою: тонким торцевим точінням, чистовим шліфуванням або різними

типами притирання. Так тонким торцевим точінням досягається шорсткість поверхні Ra від 1,25 до 0,32 мкм, чистовим шліфуванням 0,63 — 0,32 мкм, притиранням 0,63 — 0,04 мкм [26].

Отже, для виготовлення пробки, до поверхні якої буде фіксуватись крапля легшої рідини, необхідно використати фторопласт тому, що він змочується нафтопродуктами і є хімічно інертним до досліджуваних рідин. Поверхня пробки повинна бути оброблена для забезпечення шорсткості меншої $Ra=1,78$ мкм для забезпечення мінімальної різниці між макрокрайовим і крайовими кутами змочування.

При дослідженні ДМН інших рідин необхідно також проводити аналогічні дослідження щодо вибору матеріалу пробки 2 (рис. 2.1).

2.2 Методика розрахунку параметрів контурів обертових крапель і аналіз отриманих результатів

Для визначення ДМН розчинів ПАР в удосконаленому методі вільної і розробленому методі фіксованої обертових краплі необхідно розраховувати координати точок контуру обертової краплі шляхом розв'язування системи диференційних рівнянь (1.9).

Розв'язок цих рівняння можливий тільки числовими методами. Відомі такі числові методи інтегрування, як Сімпсона, Гауса не використовують для розв'язування подібних диференційних рівнянь, так як це рівняння в правій частині містить значення самої функції [27,28]. Для розв'язування таких диференційних рівнянь використовують методи Рунге-Кутта різних порядків. Згідно [27,28] методи нижчих порядків мають меншу точність обчислення функції, але вимагають меншу кількість обчислень функції, які необхідно здійснити для обчислення наступного значення функції. В разі використання методу Рунге-Кутта 1-го порядку функцію необхідно обчислювати 1 раз, 2-го порядку — 2 рази і т.д. Найчастіше використовують метод Рунге-Кутта 4-го порядку як компроміс між швидкістю обчислення функції та бажаною точністю.

Додатково підвищити точність обчислення функції можна використовуючи метод корекції на кроці, який полягає в тому, що розраховують значення функції з поточним i в два рази меншим кроком інтегрування. Оцінюють похибку обмеження на кроці [27] за виразом:

$$E_{Ti} = \frac{16}{15} (y_{i(h/2)} - y_{i(h)}), \quad (2.3)$$

де $y_{i(h)}$, $y_{i(h/2)}$ — отримані значення функції з поточним i в два рази меншим кроком інтегрування.

У випадку, коли похибка обмеження перевищує певне задане значення, крок інтегрування зменшують і обчислення функції повторюють. Використання такої методики дозволяє підвищити точність обчислення функції, але збільшує об'єм розрахунків [27].

Пропонується вводити два значення — верхню і нижню межу похибки обмеження. Це дає змогу зменшувати крок інтегрування, коли значення похибки обмеження перевищує задане значення верхньої межі, що підвищує точність обчислення функції. В разі, коли значення похибки обмеження на кроці менше за нижню межу крок інтегрування збільшується, що зменшує об'єм обчислень.

Для розв'язування диференційного рівняння (1.9) задають початкові умови. Якщо початок координат перенести в омбілічну точку, тоді початкові умови мають вигляд [29]:

$$\varphi = z_c = x_c = S_c = V_c = 0. \quad (2.4)$$

Важливе значення також має вибір кроку інтегрування h і кривизни в омбілічній точці K_c . При розв'язку системи рівнянь (1.9) з постійним кроком інтегрування необхідно правильно вибрати значення кроку інтегрування, який встановлюють експериментально. В загальному, більші значення кроку інтегрування збільшують швидкість обчислення контуру краплі, але з меншою точністю, менші значення кроку інтегрування — навпаки. В методі з корекцією на кроці крок інтегрування змінюється таким чином, щоб отримати необхідне значення похибки обмеження. Значення кривизни в омбілічній точці K_c визначає тип і форму контуру обертової краплі, який розраховують. Вибір необхідного значення K_c буде розглянуто далі.

Важливе значення має вибір умов завершення розрахунку. Єдиний параметр, який визначає умову завершення розрахунку — значення кута φ . В процесі розрахунку контуру вільної краплі розрахунок завершується при досягненні значення кута $\varphi=180^\circ$. Для контуру фіксованої краплі можливі два варіанти — розрахунок повного і частини контуру фіксованої обертової краплі. У випадку задавання кінцевого значення кута $\varphi=0^\circ$ отримують повний контур фіксованої краплі. Такий випадок контуру можливий у випадку повного змочування краплі поверхні, на якій її фіксують. Випадки повного змочування є досить рідкісними. Якщо повне змочування поверхні відсутнє або для визначення ДМН розчинів ПАР використовують частину контуру обертової краплі, тоді значення кута φ визначають експериментально із її зображення.

Для розрахунку контурів обертових крапель числовим методом Рунге-Кутта 4-го порядку з постійним і змінним кроком інтегрування був розроблений відповідний алгоритм (рис. 2.3), що включає наступні дії:

- задавання початкових умов (2.4), кроку інтегрування h , кривизни в омбілічній точці K_c , верхньої і нижньої межі похибки обмеження (блок 1);

- розрахунок параметрів наступної точки контуру обертової краплі і похибки обмеження (блок 2);

- перевірка входження значення похибки обмеження в задані межі, збільшення або зменшення кроку інтегрування (блоки 3÷7). Блок 6 призначений для обмеження кроку інтегрування dl певним максимальним значенням, що усуває випадки збільшення значення кроку інтегрування настільки, що призводить до невірному ходу розрахунку. Також введення такого обмеження дозволяє проводити розрахунок контуру обертової краплі з постійним кроком інтегрування тією самою програмою, що дозволило порівняти точність отриманих результатів розрахунку контурів обертових крапель методами з постійним кроком і з корекцією на кроці;

- уточнений розрахунок параметрів точок контуру обертової краплі здійснюється блоками 8÷12. Як параметр для уточненого розрахунку використовується кут φ , значення цього кута задається кратним 1° , також враховується кінцеві значення кута φ . Уточнений розрахунок проводиться

шляхом зменшення кроку інтегрування так, щоб отримати необхідне значення кута φ з абсолютною похибкою не більшою 10^{-8} .

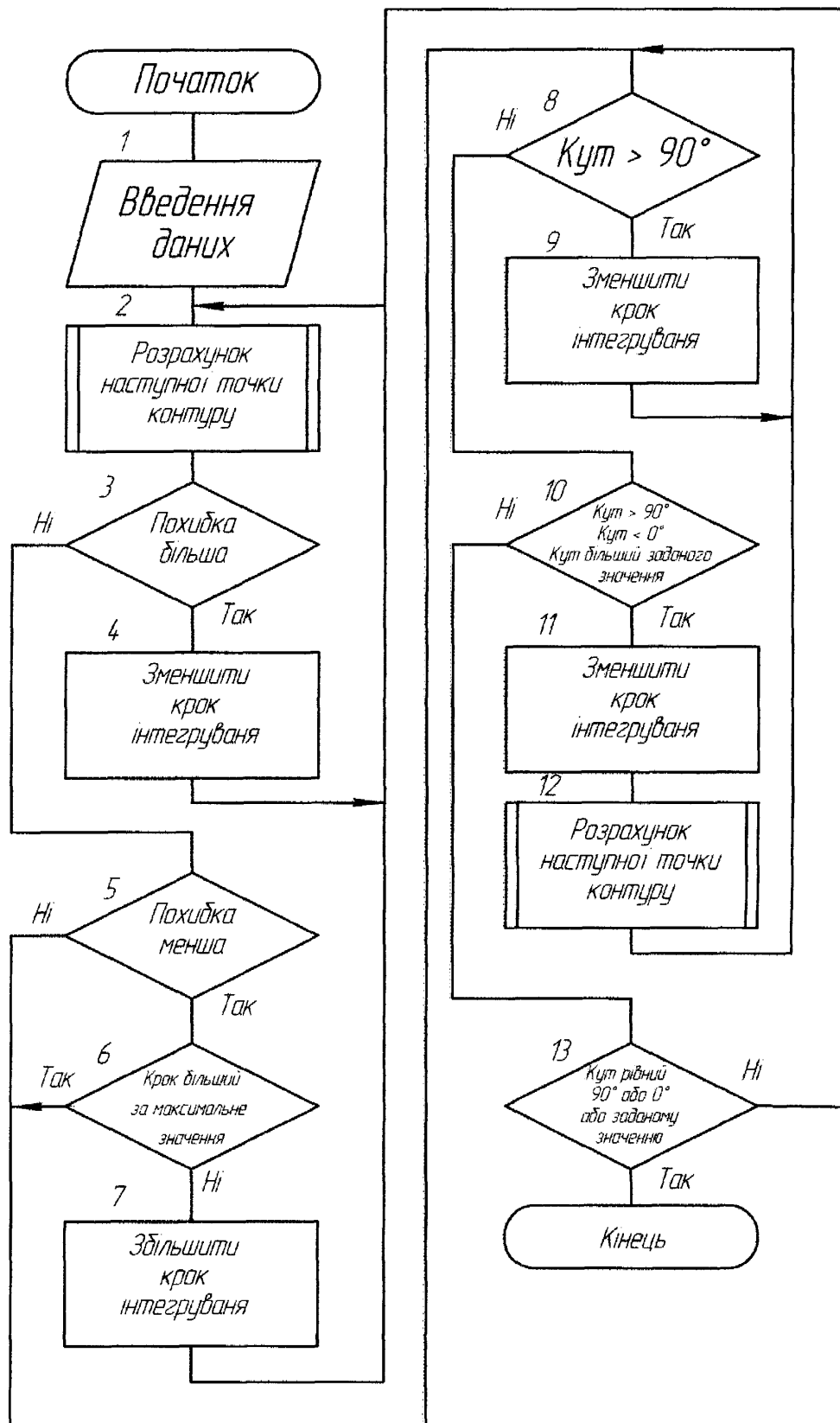
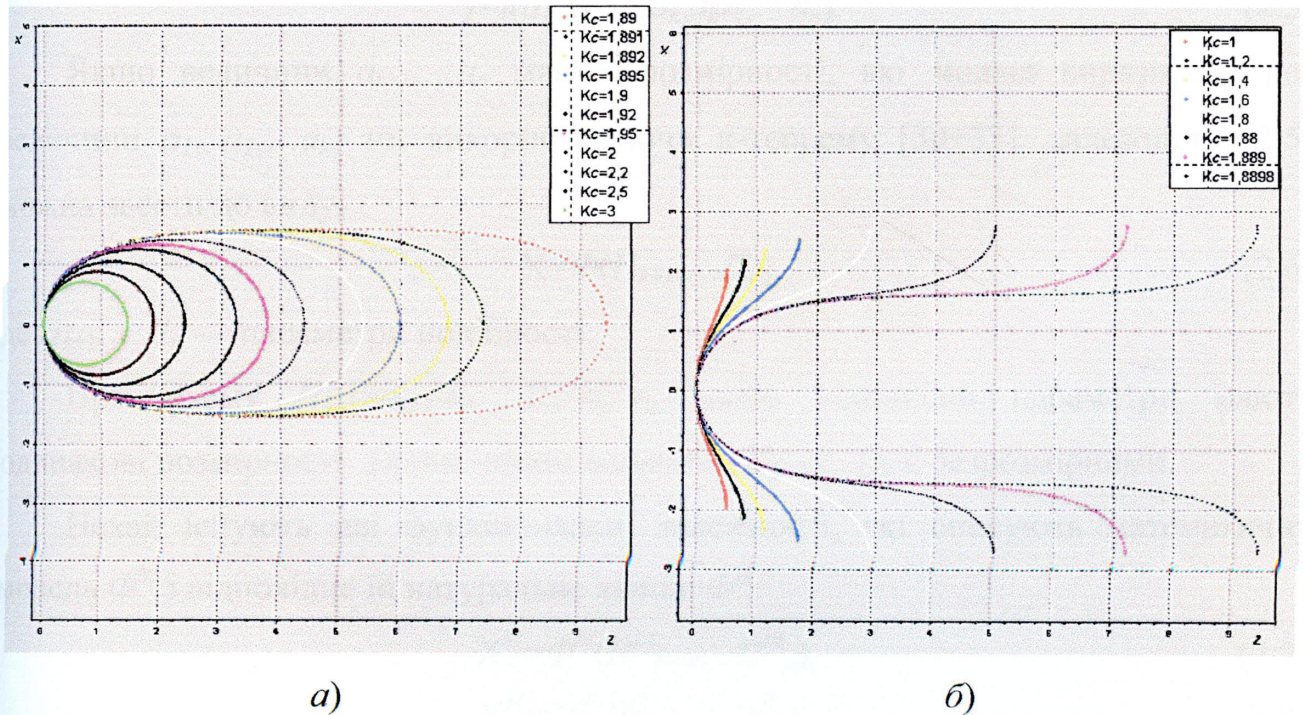


Рис. 2.3. Алгоритм для розрахунку контурів обертових крапель

Отримані ряди контурів обертових крапель зображені на рис. 2.4. Обчислення контурів здійснювались числовим інтегруванням з корекцією на кроці з наступними параметрами: діапазон значення похибки обмеження на кроці $10^{-9} \div 10^{-10}$, початкове значення кроку інтегрування 0,01. Згідно [7] і [24] граничне значення кривизни в омбілічній точці $K_{сгран} = 3/\sqrt[3]{4}$. Як видно із рис. 2.4 контури вільної краплі отримують при задаванні кривизни в омбілічній точці K_c в діапазоні $3/\sqrt[3]{4} < K_c < \infty$, а фіксованої краплі для значень кривизни в діапазоні $0 < K_c < 3/\sqrt[3]{4}$.



a — контури вільних обертових крапель, *б* — контури фіксованих обертових крапель

Рис. 2.4. Розраховані профілі обертових крапель

Результати розрахунків деяких контурів вільних обертових крапель для $1 \leq K_c < 3/\sqrt[3]{4}$ наведені в додатку А, для $3/\sqrt[3]{4} < K_c \leq 2$ фіксованих обертових крапель — в додатку Б, а в додатку В приведено текст програми для обчислення параметрів контурів обертових крапель.

Приведену методику розрахунку параметрів обертових крапель

рекомендується використовувати для розрахунку регресійним способом такого теоретичного контуру, який буде подібним до експериментального контуру вільної або фіксованої обертових крапель при визначенні ДМН розчинів ПАР.

2.3 Критерії подібності експериментального і розрахованого контурів обертових крапель

Для розгляду подібності експериментального і розрахованого контурів обертових крапель розглянемо деякі визначення теорії подібності. Нехай є певна функціональна залежність від n параметрів $a_1 \dots a_n$:

$$\chi = f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n). \quad (2.5)$$

Якщо величини a_{k+1}, \dots, a_n мають розмірності, які можна виразити через величини a_1, a_2, \dots, a_k , то, використовуючи π -теорему [30÷33], залежність (2.5) можна звести до виду:

$$X = \Phi(\Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n), \quad (2.6)$$

де Π_{k+1}, \dots, Π_n — параметри подібності.

При цьому $\Pi_{k+1} = a_{k+1}/a_1, \dots, \Pi_n = a_n/a_k$, якщо відповідні параметри мають однакові розмірності. Таким чином величини Π_{k+1}, \dots, Π_n є безрозмірними.

Нехай існують дві функціональні залежності, які описують математичну модель Φ^M і відповідне їй натуральне явище Φ^H :

$$X^M = \Phi^M(\Pi_{k+1}^M, \dots, \Pi_n^M), \quad (2.7)$$

$$X^H = \Phi^H(\Pi_{k+1}^H, \dots, \Pi_n^H). \quad (2.8)$$

Згідно теорії подібності, для подібних явищ повинні виконуватись рівності відповідних параметрів:

$$\Pi_{k+1}^M = \Pi_{k+1}^H, \dots, \Pi_n^M = \Pi_n^H. \quad (2.9)$$

Рівності (2.9) мають назву критеріїв подібності.

Застосуємо тепер теорію подібності з метою перевірки на подібність експериментального і розрахованого згідно системи диференційних рівнянь (1.9) теоретичного контурів обертових крапель. Як видно із (1.9) кут φ можна представити як деяку функціональну залежність від інших параметрів:

$$\varphi=f(x_c, z_c, l_c, K_c, V_c, S_c). \quad (2.10)$$

Залежність (2.10) можна представити у вигляді таблиці, розв'язавши (1.9). За допомогою кореляційного аналізу покажемо, що параметр z_c можна виразити через параметри l_c, V_c, S_c . Для цього, використовуючи табличні дані з додатків А і Б, розрахуємо коефіцієнти кореляції між відповідними змінними (табл. 2.2).

Як видно з табл. 2.2 між параметрами z_c і V_c, z_c і S_c, z_c і l_c існує досить сильний кореляційний зв'язок як для фіксованої краплі (перші чотири рядка таблиці), так і для вільної краплі (останні чотири рядка таблиці). В той час кореляційна залежність координати x_c від інших параметрів існує тільки для фіксованої краплі. Таким чином, з (2.10) можна вилучити параметри l_c, V_c, S_c тому, що значення координати z_c можна представити як функціональну залежність $z_c=f_z(l_c, V_c, S_c)$. Тоді (2.10) можна звести до певної функціональної залежності:

$$\varphi=f_1(x_c, z_c). \quad (2.11)$$

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнтів кореляції F між змінними x_c, z_c і l_c, V_c, S_c для різних контурів обертових крапель

K_c	$F_{z,V}$	$F_{z,S}$	$F_{z,l}$	$F_{x,V}$	$F_{x,S}$	$F_{x,l}$
1,1	0,954	0,975	0,992	0,932	0,965	0,999
1,5	0,955	0,976	0,993	0,930	0,964	0,998
1,7	0,965	0,981	0,994	0,939	0,967	0,996
1,88988	0,997	0,998	0,999	0,805	0,817	0,826
1,889882	0,998	0,999	0,999	0,003	0,002	0,001
1,89	0,997	0,999	0,999	-0,003	-0,002	-0,001
1,9	0,995	0,999	0,998	-0,035	-0,035	-0,034
2	0,994	0,999	0,995	0,008	0,009	0,009

Найлегше отримати із експериментального зображення обертової краплі координати точок x_c, z_c контуру шляхом його оброблення за допомогою персонального комп'ютера. Тому ці параметри виберемо для розрахунку

параметрів подібності. Згідно із П-теоремою для теоретичного контуру обертової краплі можна записати:

$$\varphi = \Phi_{M1} \left(\frac{z_c}{x_c} \right). \quad (2.12)$$

З іншого боку для експериментального контуру обертової краплі залежність φ від x_e і z_e можна записати ще так:

$$\varphi = \Phi_{H1} \left(\frac{z_e}{x_e} \right), \quad (2.13)$$

де z_e, x_e — координати точок контуру краплі, які визначають із її зображення.

Згідно із теорією подібності, якщо функціональні залежності (2.12) і (2.13) описують подібні явища, то відповідні критерії подібності рівні, тобто

$$\frac{z_c}{x_c} = \frac{z_e}{x_e}. \quad (2.14)$$

На рис. 2.5 показані залежності значення параметрів порівняння для експериментальних (сині точки) і розрахованих контурів вільної і фіксованої обертових крапель від їх довжини. Як видно із рис. 2.5, залежність (2.14) для певних контурів виконується, для інших контурів – ні. Пара експериментальний і розрахований контури, для яких виконується залежність (2.14) з найменшими відхиленнями є подібними.

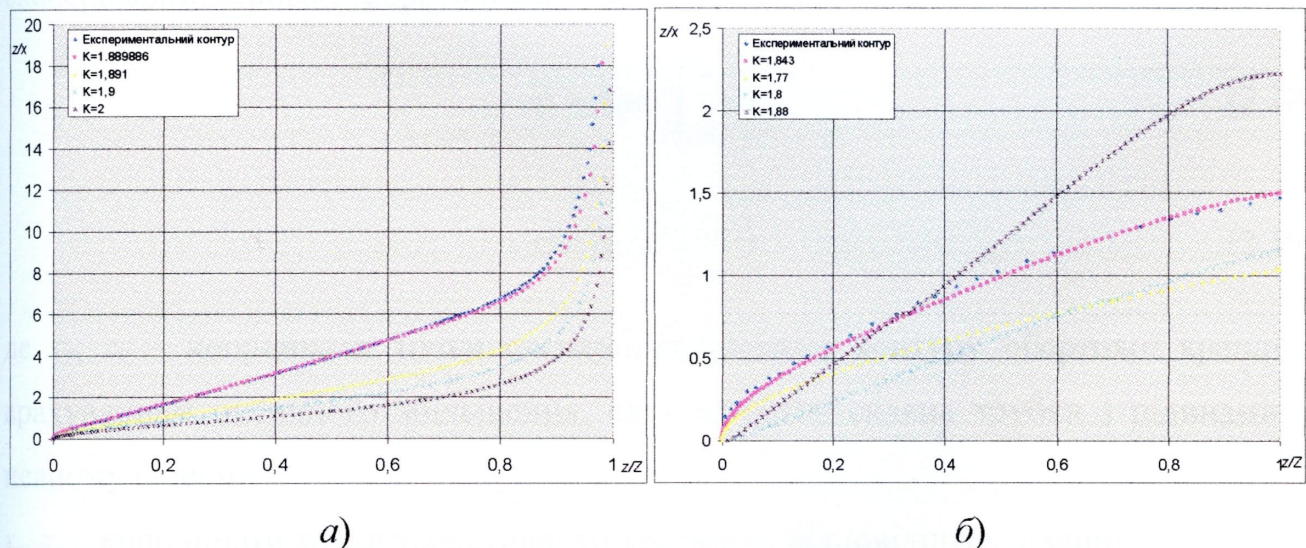


Рис. 2.5. Залежності параметрів порівняння для різних контурів вільної (а) і фіксованої (б) крапель

Виходячи із вище сказаного для подібних теоретичного і експериментального контурів обертових крапель, середнє арифметичне значення різниць параметрів подібності взятих по модулю повинне прямувати до нуля, тобто

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{z_{ci} - z_{ei}}{x_{ci} - x_{ei}} \right|}{n} \rightarrow 0. \quad (2.15)$$

Отриманий вираз (2.15) можна використати при розрахунку подібного розрахованого контуру краплі в розроблених методах визначення ДМН розчинів ПАР по формі обертової краплі.

Використовуючи теорію подібності, покажемо, що можна використовувати будь-яке відповідне січення експериментального і теоретичного контурів. Рівність (2.14) перепишемо іншим чином:

$$\frac{x_e}{x_c} = \frac{z_e}{z_c}. \quad (2.16)$$

Згідно (1.10) відношення (2.16) рівне обертовій сталій:

$$\frac{x_e}{x_c} = \frac{z_e}{z_c} = c = \sqrt[3]{\frac{\sigma}{\Delta\rho\omega^2}}. \quad (2.17)$$

З (2.17) можна отримати наступні вирази для розрахунку МН для подібних експериментального і теоретичного контурів:

$$\sigma = \Delta\rho\omega^2 \left(\frac{x_e}{x_c} \right)^3, \quad (2.18)$$

$$\sigma = \Delta\rho\omega^2 \left(\frac{z_e}{z_c} \right)^3, \quad (2.19)$$

де x_e, z_e – координати точки експериментального контуру обертової краплі з врахуванням оптичного збільшення, який створює скляна трубка з рідинами у певному січенні;

x_c, z_c – координати точки теоретичного контуру у відповідному січенні.

Отже, для визначення ДМН розчинів ПАР необхідно розраховувати

теоретичний контур подібний до експериментального, для чого необхідно розробити відповідну методику розрахунку такого контуру.

ДМН розчинів ПАР можна визначати за допомогою виразів (2.18) і (2.19). Застосування виразу (2.19) для визначення ДМН розчинів ПАР має суттєве обмеження – при розрахунку теоретичного контуру витягнутої обертової краплі, для якої $K_c \rightarrow 3/\sqrt[3]{4}$ загальна довжина розрахованого контуру обертової краплі Z_c суттєво залежить від кривизни (рис. 2.6), що не забезпечує необхідну точність розрахунку довжини подібного теоретичного контуру до експериментального. Таким чином використання виразу (2.18) для визначення ДМН забезпечить кращу точність, але при цьому необхідно визначити коефіцієнт оптичного збільшення $M(x)$, який вносить скляна трубка із важчою рідиною [11].

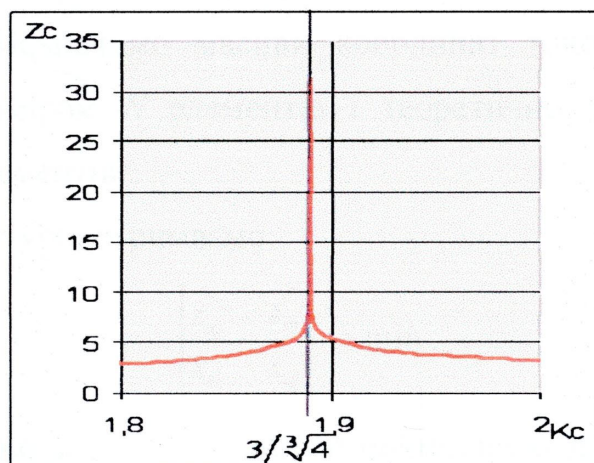


Рис. 2.6. Залежність довжини розрахованих контурів обертових крапель від кривизни K_C в омбілічній точці

2.4 Методики порівняння координат точок експериментального і розрахованого контурів обертових крапель

В розробленому методі фіксованої і удосконаленому методі вільної обертової краплі при розрахунку МН згідно виразу (2.18) необхідно регресійним способом розраховувати параметри такого теоретичного контуру відповідної обертової краплі, який є подібним до експериментального. Для фіксації подібності таких

контурів необхідно розробити методики їх порівняння.

2.4.1 Порівняння експериментального і розрахованого контурів фіксованих обертових крапель

Координати точок експериментального і теоретично розрахованого контурів обертової краплі мають різну розмірність: експериментального — в розмірних одиницях довжини, а координати теоретично розрахованого контуру є безрозмірними. Для порівняння контурів координати їхніх точок необхідно привести до єдиної розмірності, при якій можливе порівняння. Згідно п. 2.3 як критерій подібності можна використати відношення координат точок контуру краплі. Кількість точок експериментального і розрахованого контурів є різною, що також необхідно враховувати при розробленні методик порівняння контурів обертових крапель. Позначимо масиви координат точок експериментального контуру $\{x_{ei}, z_{ei}\}$ розміром N елементів і теоретично розрахованого контуру $\{x_{cj}, z_{cj}\}$ розміром T елементів.

Для подібних контурів отримаємо:

$$\left| \frac{z_{ei}}{x_{ei}} - \frac{z_{cj}}{x_{cj}} \right| \rightarrow \min. \quad (2.20)$$

Різниця параметрів згідно (2.20) буде найменшою для тих точок, для яких справджується наступна умова:

$$\left| \frac{z_{ei}}{z_{eN}} - \frac{z_{cj}}{z_{cT}} \right| \rightarrow \min. \quad (2.21)$$

В (2.21) координати точок з індексами i відносяться до теоретично розрахованого контуру, а координати з індексами j — до експериментального контуру.

Наближення по модулю різниць критеріїв до нуля пов'язане з неспівпаданням точок теоретично розрахованого контуру з експериментальним.

Кількість точок N експериментального контурів обертових крапель є меншою за кількість точок T теоретично розрахованого їх контурів. Перевірку подібності

контурів обертових крапель здійснюють наступним чином. Для цього розраховують значення параметрів порівняння для кожної точки контурів:

$$c_{ei} = \frac{z_{ei}}{x_{ei}}, c_{ej} = \frac{z_{ej}}{x_{ej}}. \quad (2.22)$$

Розраховують середнє арифметичне значення різниць параметрів C :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N |c_{ei} - c_{ej}|}{N}, \quad (2.23)$$

де j – номер точки теоретичного контуру, для якої справджується (2.21).

Пара контурів, для яких розраховане C згідно (2.23) буде найменшим є подібними.

Приведена методика дозволяє здійснювати порівняння теоретичного і експериментального контурів фіксованої обертової краплі з виконанням мінімального об'єму обчислень.

2.4.2 Порівняння експериментального і розрахованого контурів вільних обертових крапель

Як видно із рис. 2.5,а відношення z/x експериментального і розрахованого контурів вільної краплі при $z/Z \rightarrow 1$ прямують до нескінченості. В зв'язку з цим різниця (2.20) для точок з $z/Z \rightarrow 1$ є також досить великою, що зменшує ефективність використання розглянутої вище методики для порівняння контурів вільних обертових крапель. Тому для порівняння контурів вільної краплі необхідно розробити методику порівняння, яка для розрахунку параметра порівняння буде використовувати геометричні відхилення цих контурів.

Для порівняння контурів вільних обертових крапель даною методикою координати їхніх точок також необхідно привести до єдиної розмірності, при якій можливе порівняння. Це можна зробити, ділячи координати точок контуру краплі x і z на його загальну довжину Z . Для експериментального контуру безрозмірні координати точок контуру $\{\dot{x}_{ei}, \dot{z}_{ei}\}$ розраховують наступними чином:

$$\dot{x}_{ej} = \frac{x_{ej}}{Z_e}, \quad \dot{z}_{ej} = \frac{z_{ej}}{Z_e}. \quad (2.24)$$

Для теоретичного контуру безрозмірні координати точок контуру $\{\dot{x}_{ci}, \dot{z}_{ci}\}$ розраховують таким чином:

$$\dot{x}_{ci} = \frac{x_{ci}}{Z_c}, \quad \dot{z}_{ci} = \frac{z_{ci}}{Z_c}. \quad (2.25)$$

Для порівняння експериментального і розрахованого контурів обертової краплі розраховують середнє квадратичне значення відстаней \bar{R} від точок експериментального контуру до лінії розрахованого контуру, яка з'єднує дві сусідні точки розрахованого контуру обертової краплі. Для розрахунку j -го значення відстані R_j для точки експериментального контуру з координатами $[\dot{x}_{ej}, \dot{z}_{ej}]$ вибирають дві найближчі точки теоретичного контуру так, щоб задовольнялась умова:

$$\dot{z}_{ci} \leq \dot{z}_{ej} \leq \dot{z}_{ci+1}. \quad (2.26)$$

Відстань R_j розраховують згідно виразу:

$$R_j = \sqrt{\left(\frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1}\right)^2 + (a_1 \cdot \dot{x}_{ej} + b_1 - \dot{z}_{ej})^2}, \quad (2.27)$$

де

$$a_1 = \frac{\dot{z}_{ci+1} - \dot{z}_{ci}}{\dot{x}_{ci+1} - \dot{x}_{ci}}; \quad b_1 = \dot{z}_{ci} - a_1 \cdot \dot{x}_{ci};$$

$$a_2 = \frac{\dot{x}_{ci} - \dot{x}_{ci+1}}{\dot{z}_{ci} - \dot{z}_{ci+1}}; \quad b_2 = \dot{z}_{ej} - a_2 \cdot \dot{x}_{ej}.$$

Значення середнього арифметичного значення відстаней від точок експериментального контуру до ліній теоретичного контуру \bar{R} розраховують за виразом

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^N R_j / N, \quad (2.28)$$

де N — загальна кількість точок експериментального контуру.

Для розрахованого контуру, який є подібним до експериментального контуру, значення \bar{R} буде найменшим.

Розроблені методики порівняння експериментального і теоретичних контурів вільних і фіксованих обертових крапель можуть бути використані при розрахунку регресійним способом подібних теоретичних контурів до експериментальних контурів цих крапель для визначення ДМН розчинів ПАР з використанням формули (2.18).

2.5 Оцінка коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з досліджуваними рідинами

Скляна трубка з важчою рідиною діє як сферична лінза, яка викликає спотворення видимих контурів обертової краплі усередині трубки. Видимі поперечні розміри краплі через скляну трубку є більшими, ніж є насправді [3, 7, 11]. Тому для врахування цього ефекту координати точок експериментального контуру обертової краплі визначають з врахуванням коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з важчою рідиною M , значення якого залежить від коефіцієнтів заломлення важчої рідини, матеріалу, з якого виготовлена трубка, розмірів трубки (співвідношення між внутрішнім і зовнішнім радіусами), розмірів краплі усередині трубки, а також коефіцієнта заломлення між матеріалом трубки і навколишнім повітрям поза нею.

Коефіцієнт M можна визначити експериментально. Для цього в скляну трубку з важчою рідиною поміщують циліндричні калібри [34, 35] з відомими діаметрами D . Вимірюють видимий діаметр калібру D_B і коефіцієнт збільшення M скляної трубки визначають таким чином:

$$M = D_B / D. \quad (2.29)$$

Перевагою цього методу є те, що вимірювання проводиться аналогічно до умов вимірювання діаметру краплі. Проте коефіцієнт оптичного збільшення таким чином визначають тільки для декількох значень діаметру калібру. Для визначення значення коефіцієнта M для інших розмірів обертової краплі необхідно будувати градуовальну криву або апроксимувати відповідним чином отримані дані. Але визначення коефіцієнта оптичного збільшення M

експериментальним шляхом не є точним, тому що вимірювання дійсного D і видимого діаметрів калібру відбувається з певною похибкою. Ця похибка залежить від точності оптичного вимірювального приладу, який використовують для вимірювання діаметрів калібрів. Як буде показано в п. 4.1 у випадку експериментального визначення коефіцієнта оптичного збільшення M похибка є суттєвою.

З метою підвищення точності визначення ДМН розчинів ПАР запропонованими методами вільної і фіксованої обертових крапель необхідно отримати залежність коефіцієнта оптичного збільшення M від параметрів оптичної системи скляна трубка – важча рідина (розмірів скляної трубки, оптичних властивостей матеріалу трубки і важчої рідини).

Для цього необхідно проаналізувати хід променів через скляну трубку з рідинами. На рис. 2.7 показаний розріз скляної трубки 1 з важчою рідиною 2 і краплею легшої рідини 3.

Промінь світла входить в скляну трубку в т. A , в якій заломлюється на межі розділу скло-повітря. Потім промінь світла послідовно проходить через т.т. B , Z , C і D . В точках B , C і D відбувається заломлення променя світла, в т. Z промінь світла торкається до поверхні обертової краплі легшої рідини. У т. D промінь світла виходить з скляної трубки 1 під кутом γ до осі X . Для спостереження за краплею використовують мікроскоп. Фокусування мікроскопа приладу здійснюють на площину, в якій знаходяться точки профілю краплі легшої рідини 3. Як видно з рис. 2.7 промінь світла торкається поверхні краплі 3 в т. Z . Площина, на яку фокусують мікроскоп приладу, проходить через відрізок OZ і є перпендикулярною площині рисунка. Уявне зображення т. Z профілю краплі знаходиться в точці перетину світивши DR' , який входить в об'єктив мікроскопа, з площиною, на яку фокусують мікроскоп. Такою точкою є т. R' .

Довжина відрізка OZ дорівнює радіусу краплі легшої рідини 3, а довжина відрізка OR' дорівнює величині уявного радіусу краплі легшої рідини 3. Щоб розрахувати коефіцієнт оптичного збільшення M необхідно знайти довжини цих відрізків. Для цього необхідно проаналізувати хід променів через трубку з

рідинами.

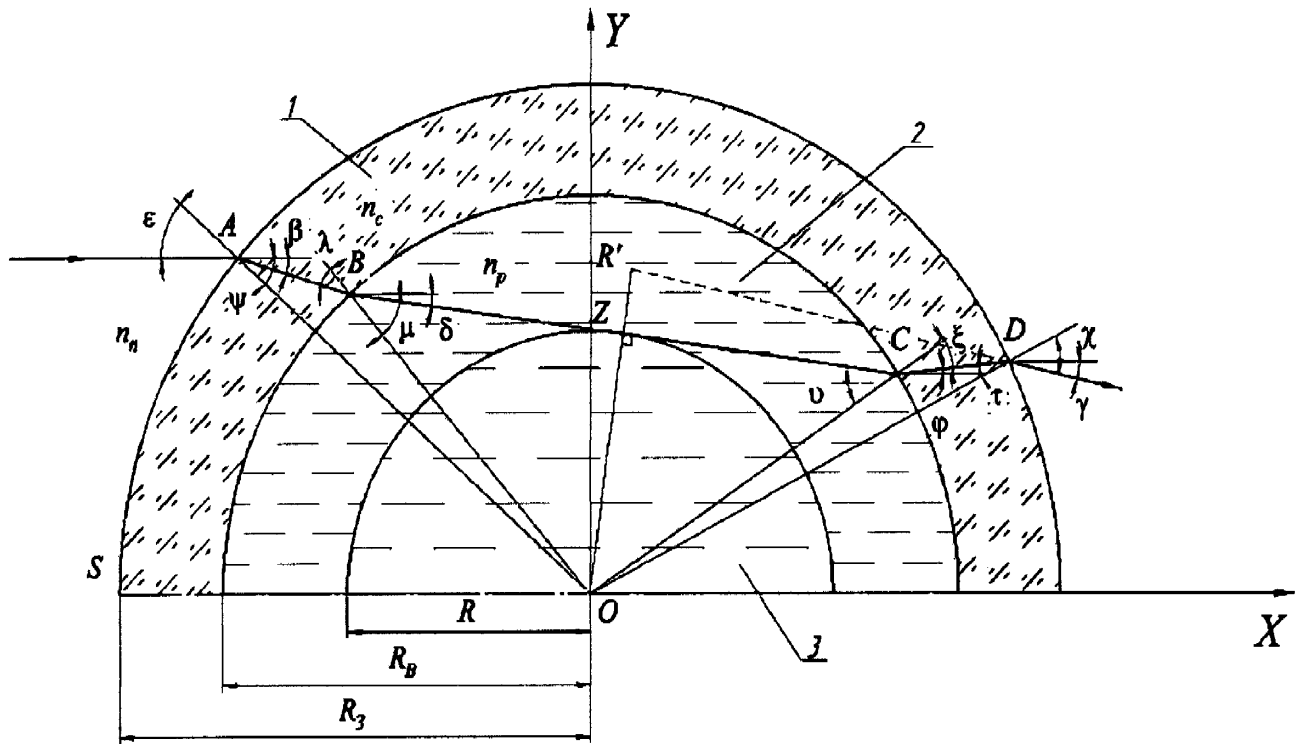


Рис. 2.7. Хід променів в трубці з краплею:

1 – скляна трубка; 2 – важча рідина; 3 – легша рідина.

При цьому визначають координати точок, в яких відбувається заломлення променів і координат точок Z і R' (рис. 2.7).

Вхідними даними для розрахунку координат характерних точок ходу променя світла в оптичній системі є коефіцієнти заломлення n_c скла трубки 1, важчої рідини n_p , повітря n_n (можна прийняти, що $n_n=1$), внутрішній R_B і зовнішній R_3 радіуси трубки, значення кута AOS , який задають в діапазоні від 0° до 90° . Пояснення необхідності завдання значення кута AOS для розрахунку буде приведено нижче. Наприклад, для розрахунку координат т. B необхідно зробити наступні розрахунки.

Розраховують координати т. A :

$$\begin{aligned} X_A &= \cos(\angle AOS) \cdot R_3, \\ Y_A &= \sin(\angle AOS) \cdot R_3. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Згідно закону заломлення значення кута ψ є таким:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\sin(\angle AOS) \cdot n_n}{n_c}\right), \quad (2.31)$$

де n_n , n_c — коефіцієнти заломлення повітря (приймаємо $n_n=1$) і скла, з якого виготовлена трубка.

Кут β між горизонтальною площиною і прямою AB є таким:

$$\beta = \angle AOS - \psi. \quad (2.32)$$

Координати т. B знаходять з такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} X_B^2 + Y_B^2 = R_B^2, \\ Y_B = \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_B + Y_A - \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_A. \end{cases} \quad (2.33)$$

Вирішуючи систему (2.33), знаходять координати т. B :

$$X_B = \frac{-\operatorname{tg}(\beta) \cdot (Y_A - \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_A) + \sqrt{R_B^2 - (Y_A - \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_A)^2 + (\operatorname{tg}(\beta) \cdot R_B)^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\beta)}, \quad (2.34)$$

$$Y_B = \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_B + (Y_A - \operatorname{tg}(\beta) \cdot X_A).$$

Так само розраховують координати решти точок. В табл. 2.3 приведені залежності для розрахунку координат відповідних точок згідно рис. 2.7.

Для розрахунку використовують параметр, який задають, — кут AOS (рис. 2.7). Необхідність задавання значення кута AOS можна пояснити таким чином. У скляну трубку входить велика кількість променів від джерела світла і лише один з них в результаті заломлень на межах середовищ проходить через т. Z . Крапля легшої рідини 3 залежно від частоти обертання трубки 1 з рідинами, значення MH , об'єму самої краплі може мати різний радіус. Відразу визначити, який з променів, що входять в трубку, проходить через т. Z для певного радіусу краплі 2 неможливо. Тому необхідно поступити іншим чином: задаючись значенням кута AOS , зробити розрахунок ходу променів через трубку з рідинами. Як результат розрахунку отримують радіус краплі, до поверхні якої торкається промінь В т. Z . Також в результаті розрахунку отримують значення видимого радіусу краплі 3. Справжній радіус краплі дорівнює довжині відрізка OZ , а видимий — довжині відрізка OR' .

Таблиця 2.3.

Залежності для розрахунку координат відповідних точок ходу променя світла через скляну трубку з рідинами.

Параметр, що розраховують	Залежність для розрахунку
1	2
Кут δ	$\delta = \arccos\left(\frac{X_B}{R_B}\right) - \arcsin\left(\frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{X_B}{R_B}\right) - \beta\right) \cdot n_c}{n_p}\right).$
Координати т. С	$X_C = \frac{-\operatorname{tg}(\delta) \cdot (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B) + \sqrt{R_B^2 - (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B)^2 + (\operatorname{tg}(\delta) \cdot R_B)^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\delta)},$ $Y_C = \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_C + (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B).$
Радіус краплі	$OZ = R = R_B \cdot \frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{X_B}{R_B}\right) - \beta\right) \cdot n_c}{n_p}.$
Координати т. Z	$X_Z = \frac{-\operatorname{tg}(\delta) \cdot (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B) + \sqrt{R^2 - (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B)^2 + (\operatorname{tg}(\delta) \cdot R)^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\delta)},$ $Y_Z = \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_Z + (Y_B - \operatorname{tg}(\delta) \cdot X_B).$
Кут φ	$\varphi = \arccos\left(\frac{X_C}{R_B}\right) + \arccos\left(\frac{X_B}{R_B}\right) - \beta - \pi.$
Координати т. D	$X_D = \frac{-\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (Y_C - \operatorname{tg}(\varphi) \cdot X_C) + \sqrt{R_3^2 - (Y_C - \operatorname{tg}(\varphi) \cdot X_C)^2 + (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot R_3)^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)},$ $Y_D = \operatorname{tg}(\varphi) \cdot X_D + (Y_C - \operatorname{tg}(\varphi) \cdot X_C).$
Кут γ	$\gamma = \pi - \arccos\left(\frac{X_D}{R_3}\right) - \arcsin\left(\sin\left(\pi + \varphi - \arccos\left(\frac{X_D}{R_3}\right)\right) \cdot n_c / n_n\right).$
Координати т. R'	$X_{R'} = \frac{Y_D - \operatorname{tg}(\gamma) \cdot X_D}{\operatorname{tg}\left(\arccos\left(\frac{X_Z}{R}\right)\right) - \operatorname{tg}(\gamma)},$ $Y_{R'} = \operatorname{tg}\left(\arccos\left(\frac{X_Z}{R}\right)\right) \cdot X_{R'}.$
Видимий радіус краплі	$OR' = \sqrt{X_{R'}^2 + Y_{R'}^2}.$

Відношення видимого радіусу OR' до радіусу краплі OZ дорівнює коефіцієнту оптичного збільшення M , який створює трубка з рідинами, і є функцією параметрів оптичної системи (зовнішнього R_3 , внутрішнього R_B радіусів скляної трубки, коефіцієнтів заломлення скла трубки n_c , важчої рідини n_p і радіусу краплі R):

$$M = f(R_3, R_B, n_c, n_p, R) = \frac{OR'}{OZ} = \frac{n_p \sqrt{X_{R'}^2 + Y_{R'}^2}}{R_B \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{X_B}{R_B}\right) - \beta\right) \cdot n_c}. \quad (2.35)$$

Задаючись значеннями кута AOS для трубки певних розмірів, значеннями коефіцієнтів заломлення скла трубки і важчої рідини, розраховують значення коефіцієнта оптичного збільшення M за допомогою залежностей табл. 2.3 і виразу (2.35) для крапель різних радіусів. В ході зроблених розрахунків коефіцієнта M для різних вхідних параметрів (коефіцієнти заломлення n_c скла трубки, важчої рідини n_p , повітря $n_n=1$, внутрішній R_B і зовнішній R_3 радіуси трубки) було виявлено, що залежність (2.35) від n_p є прямою, а від інших параметрів залежність є складною. На рис. 2.8 приведені графіки залежності коефіцієнта M від видимого радіусу краплі для різних співвідношень зовнішнього радіуса трубки R_3 до внутрішнього R_B , коефіцієнтів заломлення скла трубки $n_c=1,5$ і важчій рідині $n_p=1,333$. Як видно с рис. 2.8 коефіцієнт M залежить від розмірів краплі в трубці. Для трубок, в яких відношення зовнішнього до внутрішнього радіусів знаходиться в межах $2,5 \div 3,5$ і крапель, в яких відношення радіусу краплі R до внутрішнього радіусу трубки R_B знаходиться в межах $0 \div 0,7$; коефіцієнт оптичного збільшення M майже не змінюється і приблизно рівний коефіцієнту заломлення важчої рідини. Це можна використовувати для наближеного обчислення значення коефіцієнта M згідно [36].

Наведені вище вирази дозволяють достатньо точно розрахувати коефіцієнт оптичного збільшення трубки з рідинами M для різних параметрів оптичної системи скляна трубка – важча рідина і різних розмірів краплі. Для розрахунку необхідно мати значення параметрів оптичної системи — розміри трубки, коефіцієнти заломлення важчої рідини і матеріалу трубки. Виміряти розміри

скляної трубки можна достатньо точно. Коефіцієнт заломлення важкої рідини можна визначити за допомогою готових приладів: рефрактометрів або інтерферометрів. На даний час оптичні властивості багатьох рідин відомі з високою точністю і при використанні таких рідин для дослідження ДМН розчинів ПАР попередньо визначати коефіцієнт оптичного заломлення не потрібно. Приладів для вимірювання коефіцієнта заломлення скляних трубок не існує, але визначити коефіцієнт заломлення матеріалу, з якого виготовлена трубка, можна в перерахованих вище приладах шляхом використання плоских зразків досліджуваних матеріалів.

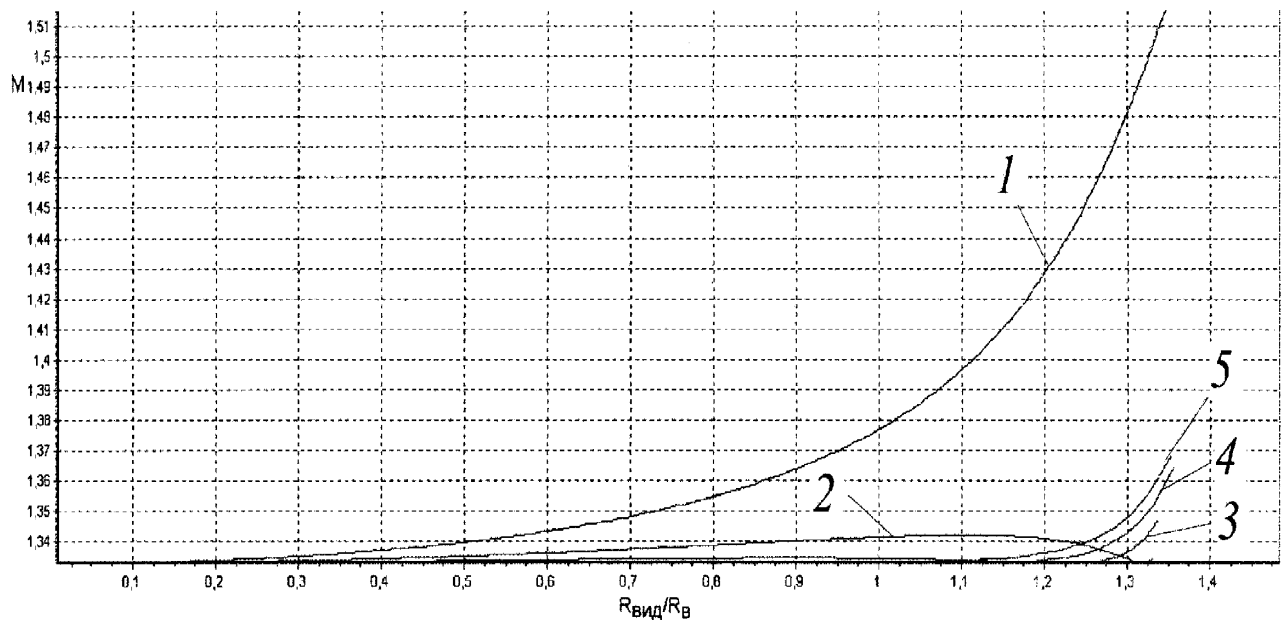


Рис. 2.8. Графіки залежності коефіцієнта M від розмірів краплі в трубці:
 1 — $R_3/R_B=1,2$; 2 — $R_3/R_B=1,6$; 3 — $R_3/R_B=2$; 4 — $R_3/R_B=2,4$; 5 — $R_3/R_B=2,8$.

2.6 Удосконалені методи дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

2.6.1 Метод вільної обертової краплі для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

Використання координат усіх точок контуру вільної обертової краплі для

розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі і визначення ДМН розчинів ПАР дозволяє зменшити вплив випадкових похибок шляхом зменшення відхилень теоретичного контуру від експериментального.

Визначення ДМН розчинів ПАР методом вільної обертової краплі полягає в тому, що здійснюють визначення МН в певні моменти часу в процесі обертання трубки з досліджуваними рідинами. З отриманих значень МН для різних моментів часу отримують залежність $\sigma(t)$. Так як визначення МН в різні моменти часу здійснюється по однаковій методиці, то доцільно розглянути тільки один цикл вимірювань.

Визначення МН в певний момент часу удосконаленим методом вільної обертової краплі полягає в наступному.

1. Отримують зображення обертової краплі в процесі її обертання.
2. Із отриманого зображення визначають координати усіх точок контуру обертової краплі $[x_{ei}; z_{ei}]$.
3. Розраховують розмірні координати точок експериментального контуру обертової краплі із врахуванням коефіцієнта оптичного збільшення M :

$$\begin{cases} x_{ei} = \frac{x_{ei}}{M(x_{ei})}, \\ z_{ei} = z_{ei}. \end{cases} \quad (2.36)$$

Значення $M(x_{ei})$ розраховують за допомогою залежностей, які приведені в п. 2.5

4. Регресійним способом розраховують параметри подібного контуру до експериментального. Для цього здійснюють наступні дії:

4.1) розраховують наступні величини:

$$A = \frac{3}{\sqrt[3]{4}}, B = 3, U_1 = A + 0,3(B - A), U_2 = A + 0,6(B - A); \quad (2.37)$$

4.2) розраховують два теоретичні контури шляхом розв'язування системи диференціальних рівнянь (1.9) згідно із методикою, яка описана в п. 2.2. Для першого теоретичного контуру задають значення кривизни в омбілічній точці $K_{C1}=U_1$, для другого $K_{C2}=U_2$;

4.3) порівнюють розраховані теоретичні контури із експериментальним згідно із методикою, описаною в п. 2.4.2. В результаті для кожного теоретичного контуру розраховують згідно (2.28) середнє арифметичне відхилення координат точок: для першого контуру \bar{R}_1 , для другого – \bar{R}_2 ;

4.4) нові наступні значення величин A , B , U_1 і U_2 залежно від значень \bar{R}_1 і \bar{R}_2 розраховують таким чином:

$$\text{якщо } \bar{R}_1 < \bar{R}_2, B = K_{C2}, U_2 = K_{C1}, U_1 = A + 0,3(B - A), \quad (2.38)$$

$$\text{якщо } \bar{R}_1 > \bar{R}_2, A = K_{C1}, U_1 = K_{C2}, U_2 = A + 0,6(B - A); \quad (2.39)$$

4.5) дії 4.2 ÷ 4.4 повторюють до тих пір, поки не отримають таку пару теоретичний контур — дійсний контур, для якої значення \bar{R} буде меншим 0,01. Якщо не вдається отримати пару контурів, для яких $\bar{R} < 0,01$, то здійснюється не менше 40 спроб розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі. При цьому для подальшого визначення МН вибирають теоретичний контур з мінімальним значенням \bar{R} . Цей теоретичний контур в подальшому використовують для розрахунку МН в певний момент часу.

5. Серед усіх точок експериментального контуру обертової краплі знаходять точку контуру з координатами $[x_e, z_e]$, для якої виконується умова $z_{ei}/z_{eN} \rightarrow 0,5$, N — кількість точок дійсного контуру.

6. Серед розрахованих точок теоретичного контуру обертової краплі знаходять точку з координатами $[x_c, z_c]$, для якої виконується умова $\varphi_{ci} \rightarrow 90^\circ$.

7. Значення МН в певний момент часу розраховують згідно залежності (2.18) з використанням координат точок, отриманих у діях 5 і 6.

2.6.2 Метод фіксованої обертової краплі для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

Визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої обертової краплі також полягає у визначенні МН в певні моменти часу з подальшим отриманням залежності $\sigma(t)$. Визначення МН в певні моменти часу здійснюється

по однаковій методиці, тому також розглянемо тільки один цикл вимірювань.

Визначення МН методом фіксованої обертової краплі здійснюють наступним чином.

1. Отримують зображення обертової краплі 1 (рис. 2.1) разом із частиною пробки 2 так, щоб було видно вертикальну поверхню, на якій зафіксована крапля.

2. З отриманого зображення визначають координати точок видимого контуру фіксованої обертової краплі $[x_{vi}, z_{vi}]$. Форма фіксованої обертової краплі біля вертикальної стінки пробки відрізняється від рівноважної через дію чинників, які описані в п. 2.1. Тому для визначення МН використовують точки частини контуру, які знаходяться між вершиною краплі т. O і т. A , яка знаходиться на відстані $Z_N=0,8Z$ (рис. 2.9).

3. Визначають розмірні координати точок експериментального контуру фіксованої обертової краплі з врахуванням коефіцієнта оптичного збільшення M згідно (2.36).

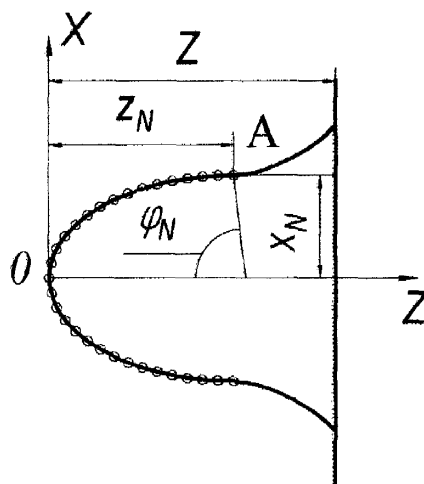


Рис. 2.9. Контур фіксованої обертової краплі, який використовують для визначення ДМН розчинів ПАР

4. Визначають кут φ_N шляхом апроксимації частини експериментального контуру обертової краплі в околі точки A поліномом 3-го порядку. Для апроксимації використовують точки контуру з індексами в межах від $N-50$ до $N+50$.

5. Регресійний спосіб розрахунку подібного теоретичного контуру до експериментального контуру фіксованої обертової краплі полягає в наступному:

5.1) розраховують значення величин U_1 , U_2 згідно (2.37), задаючи значення $A=1$, $B=3/\sqrt[3]{4}$;

5.2) розраховують два теоретичні контури фіксованої обертової краплі згідно із методикою, яка описана в п. 2.2. Для розрахунку першого контуру задають значення кривизни $K_{c1}=U_1$, а для другого $K_{c2}=U_2$. При цьому умовою завершення розрахунку теоретичного контуру при числовому інтегруванні системи (1.9) є досягнення значення кута φ , рівному визначеному в п.4 φ_N ;

5.3) здійснюють порівняння розрахованих теоретичних контурів із експериментальним контуром фіксованої обертової краплі згідно із методикою, описаною в п. 2.4.1. В результаті порівняння отримують середні арифметичні значення різниць параметрів порівняння для першого теоретичного контуру C_1 і для другого теоретичного контуру C_2 , які розраховують згідно (2.23);

5.4) порівнюють середні арифметичні значення різниць параметрів порівняння відхилень контурів C_1 і C_2 між собою. Залежно від результату порівняння перераховують параметри A і B згідно (2.38) і (2.39). При цьому замість значення \bar{R}_1 використовують C_1 , а замість $\bar{R}_2 - C_2$.

5.5) Дії 5.2 ÷ 5.4 повторюють доти, доки значення одного із середніх арифметичних відхилень не буде меншим від 0,01 або при досягненні 40 спроб розрахунку. Для подальшого розрахунку МН використовують той розрахований контур, для якого C буде мінімальним (ці контури вважають подібними).

6. Значення МН розраховують за допомогою залежності (2.18), в якій використовують координати x_{eN} і x_{cT} останніх точок подібних експериментального і теоретичного контурів фіксованої обертової краплі.

Обидва методи визначення ДМН розчинів ПАР з використанням регресійного способу розрахунку координат точок теоретичного контуру обертової краплі є подібними. Тому їх можна представити узагальненим алгоритмом (додаток Ж) для реалізації відповідного програмного забезпечення. Текст відповідної підпрограми для визначення МН в певні моменти часу

приведено в додатку И.

Метод фіксованої обертової краплі рекомендується застосовувати у випадках кращого змочування легшою рідиною, матеріалу пробки в трубці порівняно з важчою рідиною. У випадках, коли легша рідина гірше змочує матеріал пробки, ніж важча рідина, необхідно застосовувати метод вільної обертової краплі.

Важливим є правильний вибір частоти обертання краплі в трубці. При низьких частотах обертання відбувається спливання краплі легшої рідини в трубці під дією сил виштовхування і частота обертання краплі стає меншою від частоти обертання вала двигуна. Нижню межу діапазону зміни частоти обертання трубки з рідинами було визначено експериментально в роботах [24] і [37] і показано, що її значення складає 1200 об/хв.

Висновки до розділу

Згідно із проведеними дослідженнями та на основі поданого в другому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) здійснено аналіз процесу утворення фіксованої обертової краплі на твердій вертикальній стінці пробки всередині скляної трубки з важчою рідиною під час їх обертання. Показано, що матеріал пробки повинен змочуватись легшою рідиною, що забезпечує фіксування краплі легшої рідини на вертикальній стінці пробки за рахунок дії сил адгезії. Здійснений аналіз впливу шорсткості вертикальної поверхні пробки, до якої фіксується крапля легшої рідини, на форму профілю обертової краплі в місці контакту трьох фаз. В результаті показано, що шорсткість вказаної вертикальної поверхні пробки не повинна перевищувати $Ra=1,75$ мкм;

б) показано, що для порівняння експериментального і теоретичного контурів вільних і фіксованих обертових крапель достатньо мати інформацію тільки про координати точок цих контурів, що дає змогу розробити такий метод визначення ДМН розчинів ПАР, який не вимагає точного задавання додаткових параметрів обертової краплі (об'єм, площа поверхні та ін.);

в) розроблена методика розрахунку теоретичних контурів вільних і фіксованих обертових крапель, яка дозволяє здійснювати розрахунок частини теоретичного контуру фіксованої обертової краплі і повний теоретичний контур вільної обертової краплі, які використовують для визначення ДМН розчинів ПАР удосконаленим методом вільної і розробленим методом фіксованої обертових крапель;

г) розроблені методики порівняння експериментального і теоретичного контурів вільної і фіксованої обертових крапель, які дозволяють визначати ступінь подібності цих контурів, що використовують регресійний спосіб розрахунку подібного до експериментального контуру теоретичного контуру обертової краплі при визначенні МН в певні моменти часу. Порівняння контурів фіксованої краплі здійснюють з використанням теорії подібності, а контури вільної краплі — шляхом розрахунку середнього значення геометричних відхилень точок експериментального і теоретичного контурів обертової краплі;

д) проаналізовано хід світлових променів через скляну трубку з рідинами, на основі чого отримано залежності для розрахунку коефіцієнта оптичного збільшення M , який вносить скляна трубка з досліджуваними рідинами. Отримані аналітичні і графічні залежності дозволяють розраховувати коефіцієнт оптичного збільшення M , що дозволяє підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої і удосконаленим методом вільної обертових крапель;

е) вперше розроблений метод фіксованої обертової краплі, який дозволяє підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР, проводити визначення ДМН розчинів ПАР при малих частотах обертання краплі, не допускає неконтрольованого переміщення краплі легшої рідини в трубці з важчою рідиною під час їх обертання;

ж) удосконалено метод вільної обертової краплі для визначення ДМН розчинів ПАР, який підвищує точність отримуваних результатів і дозволяє здійснювати визначення ДМН розчинів ПАР при малих частотах обертання трубки із досліджуваними рідинами.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

3.1 Структурна схема приладу

Розроблена структурна схема приладу ВМН-2 для визначення ДМН розчинів ПАР зображена на рис. 3.1 і містить наступні блоки і вузли:

1 – електронний ключ, який забезпечує необхідну величину струму для живлення освітлювача 2;

2 – освітлювач, який забезпечує освітлення трубки з рідинами в певні моменти часу короткими спалахами світла. Освітлювач 2 живиться короткими імпульсами струму від електронного ключа 1 і забезпечує синхронне освітлення обертової краплі в трубці відносно положення вала двигуна;

3 – давач обертів двигуна 4 призначений для вироблення імпульсів, частота яких в 10 разів більша за частоту обертання вала двигуна 5. Таким чином забезпечується вимірювання частоти обертання вала двигуна з точністю до 0,1Гц;

4 – двигун постійного струму призначений для приведення в обертання трубки 14 з досліджуваними рідинами;

5 – вал двигуна, на якому механічно закріплюють патрон 9. За допомогою вала 5 приводиться в обертальний рух патрон 9 разом із скляною трубкою 14;

6 – тригер Шмітта, який призначений для перетворення імпульсів довільної форми, які надходять з освітлювача 3 у імпульси прямокутної форми амплітудою 5В;

7 – блок керування двигуном. Цей блок забезпечує живлення двигуна 4 постійною напругою різної величини для зміни і стабілізації частоти обертання вала 5 двигуна 4;

8, 10 — конусоподібні пробки, які призначені для закривання трубки 14 з обох боків, конусоподібна форма пробок забезпечує центрування трубки 14 в

патроні 9;

9 — патрон призначений для механічного закріплення в ньому трубки з рідинами за допомогою гвинта 11. З двох боків патрон має продовгуваті отвори, через які здійснюється освітлення краплі 13 за допомогою освітлювача 2. Мікроконтролер 18 повинен виробляти імпульси напруги в моменти часу, коли патрон 9 розміщується таким чином, щоб світло від освітлювача 2 могло пройти крізь отвори в патроні 9 і попасти в об'єktiv 15;

11 — гвинт;

12 — важча рідина;

13 — крапля легшої рідини;

14 — скляна трубка;

15 — об'єktiv, який забезпечує необхідне збільшення зображення краплі 13;

16 — вузол фокусування, який призначений для переміщення об'єктива разом із фотокамерою 17 відносно трубки 14 для отримання чіткого зображення краплі 13 на світлочутливій матриці фотокамери 17;

17 — фотокамера, за допомогою якої отримують зображення краплі 13 в процесі її обертання.

18 — мікроконтролер, який здійснює вимірювання частоти обертання трубки 13, вироблення коротких імпульсів для електронного ключа 1, керування індикатором 19, передавання даних про значення частоти на персональний комп'ютер 20;

19 — блок індикації для оперативного контролю значення частоти обертання вала 5 двигуна 4;

20 — персональний комп'ютер, за допомогою якого здійснюється оброблення отриманих зображень з фотокамери 17 і визначення ДМН розчинів ПАР;

21 — пробка з отвором, на вертикальній поверхні якої утворюється фіксована крапля;

22 — легша рідина;

23 — поршень, який використовують для витіснення легшої рідини через

отвір в пробці 21;

24 – вузол переміщення штока поршня 23.

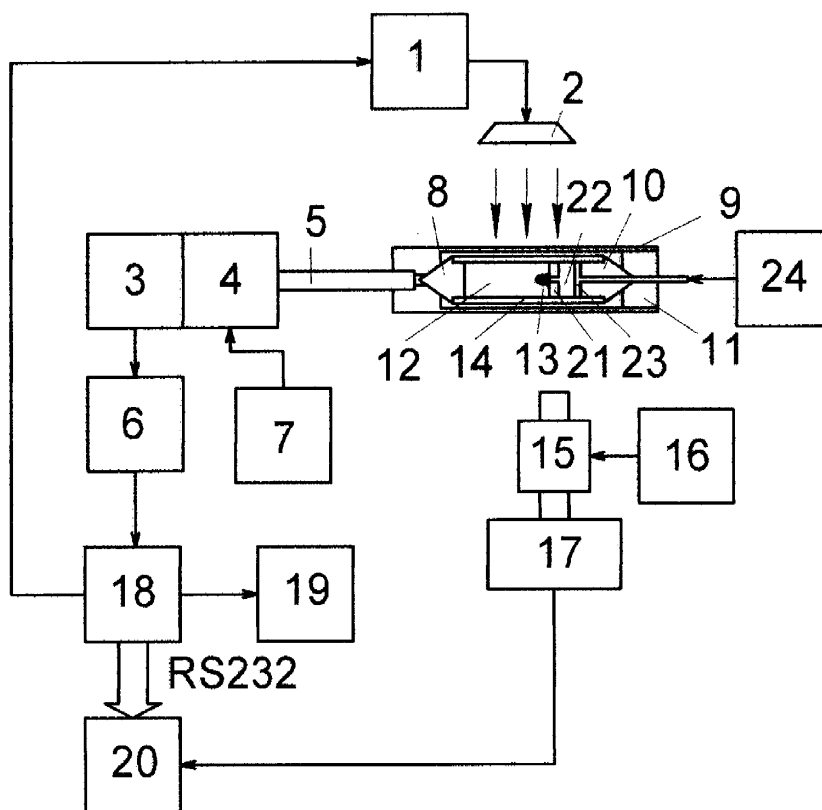


Рис. 3.1. Структурна схема приладу ВМН-2:

1 – електронний ключ; 2 – освітлювач; 3 – давач обертів; 4 – двигун; 5 – вал двигуна; 6 – тригер Шмітта; 7 – блок керування двигуном; 8, 10 – пробки; 9 – патрон; 11 – гвинт; 12 – важча рідини; 13 – крапля легшої рідини; 14 – скляна трубка; 15 – об’єктив; 16 – вузол фокусування; 17 – фотоапарат; 18 – мікроконтролер; 19 – блок індикації; 20 – персональний комп’ютер; 21 – пробка з отвором; 22 – легша рідина; 23 – поршень; 24; вузол переміщення штока поршня 23

З метою дослідження ДМН розчинів ПАР удосконаленням методом вільної обертової краплі зі скляної трубки 14 демонтовують пробку 21, поршень 23, а пробку 10 замінюють на пробку 8. Таким чином прилад ВМН-2 структурна схема, якого приведена на рис. 3.1, може бути використаний для визначення ДМН розчинів ПАР як удосконаленням методом вільної, так і розробленим методом фіксованої обертових крапель.

3.2 Розроблення конструкції вузлів приладу для утворення фіксованої і вільної обертових крапель легшої рідини

Розглянуті в п. 1.2 методи визначення ДМН розчинів ПАР не дозволяють отримати повне відтворення зміни МН в часі через існування нижньої межі часу, починаючи з якої можна досліджувати ДМН розчинів ПАР. Це можна пояснити наступним чином: в багатьох приладах, які використовують для дослідження МН, краплю легшої рідини поміщують в трубку з важчою рідиною перед приведенням трубки в обертання, після чого трубку приводять в обертання. Згідно [3] для встановлення гіростатичної рівноваги обертання досліджуваних рідин разом із трубкою необхідний певний час $5 \div 20$ с. До досягнення гіростатичної рівноваги зміну МН в часі не фіксують, що і обмежує використання звичайних методів визначення МН з метою дослідження ДМН розчинів ПАР.

В [38] пропонують вузол приладу, який дозволяє зменшити нижню межу часу, з якої починають визначати ДМН розчинів ПАР методом вільної обертової краплі. Принцип роботи цього вузла полягає в ін'єктуванні краплі легшої рідини в трубку з важчою рідиною під час обертання. Діаметр вільної краплі, яка обертається, не перевищує декількох міліметрів, тому час, необхідний для встановлення гіростатичної рівноваги зменшується до 2 с, що дозволяє здійснити повніше дослідження ДМН розчинів ПАР. Описаний в [38] вузол придатний для утворення тільки вільних крапель в трубці з рідинами. Тому існує необхідність у розробленні вузла приладу для утворення фіксованих на поверхні пробки крапель легшої рідини, який дозволить також досліджувати ДМН розчинів ПАР через декілька секунд після утворення фіксованої обертової краплі.

Пропонується вузол приладу для утворення фіксованої краплі легшої рідини під час обертання трубки з важчою рідиною, конструкція якого показана на рис. 3.2. Вузол складається з скляної трубки 1, всередині якої встановлено пробку 2 з отвором. З одного боку в трубку встановлено поршень 3 і конусоподібну пробку 5. З іншого боку трубка 1 закрита пробкою 4. Пробка 4 всередині має порожнину і отвори, через які в порожнину може поступати важча рідина з

камери 7. В пробці 4 є отвір, який призначений для відводу надлишку важкої рідини з камери 7. Для приведення поршня 3 в рух використовують гвинт 10, який закріплений в опорі 11. Трубку 1 з пробками 2÷5 закріплюють в патроні 13 за допомогою втулки 12 і гвинта 15. Патрон 13 закріплюють на валу 14 двигуна за допомогою гвинтів (на рис. 3.2 не показані).

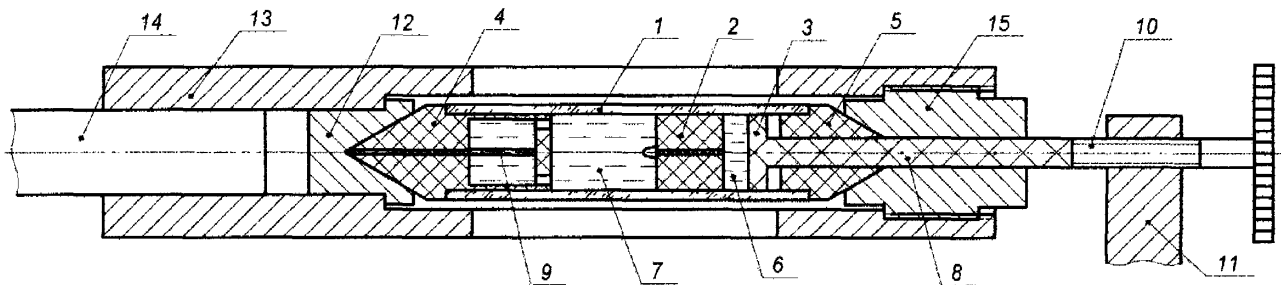


Рис. 3.2. Конструкція вузла приладу для формування фіксованих обертових крапель:

1 — скляна трубка; 2 — пробка з отвором; 3 — поршень; 4 — конусоподібна пробка з порожниною; 5 — конусоподібна пробка; 6 — камера з легшою рідиною; 7 — камера з важчою рідиною; 8 — шток; 9 — пухирець повітря; 10 — гвинт; 11 — опора гвинта; 12 — втулка; 13 — патрон; 14 — вал двигуна; 15 — гвинт фіксуючий

Принцип роботи вузла для утворення фіксованої краплі легшої рідини полягає в наступному. Заповнюють камеру 6 легшою рідиною. За допомогою поршня 3 з камери 6 через отвір в пробці 2 витискають повітря доти доки легша рідина заповнить канал отвору в пробці 2. Заповнюють важчою рідиною камеру 7. Встановлюють пробку 4 в трубку 1 таким чином, щоб витиснути повітря з камери 7 через отвори в пробці 4. При цьому наявність пухирців повітря в порожнині пробки 4 є допустимим. З іншої сторони скляну трубку 1 закривають пробкою 5. Встановлюють заповнену трубку з рідинами у патрон 13 і закріплюють гвинтом 15.

Приводять трубку з рідинами в обертання. Після встановлення гіростатичної рівноваги обертання важкої і легшої рідин з трубкою за допомогою гвинта 10 переміщують поршень 3 і витискають краплю легшої рідини в камеру 7 через

отвір у пробці 2. Подальший процес утворення краплі легшої рідини під час обертання трубки 1 з досліджуваними рідинами описаний в п. 2.1. Витіснена з камери 7 важча рідина через отвори в пробці 4 виходить назовні пристрою. Під час обертання трубки через лівий отвір в пробці 4 важча рідина виходить назовні. Замість рідини, яка вийшла назовні, всередину порожнини пробки 4 буде поступати повітря, утворюючи пухирець 9. Цей процес буде відбуватись доти доки пухирець повітря 9 набуде форму циліндра на всю довжину порожнини в пробці 4 і діаметром більшим за діаметр лівого отвору в пробці 4. При цьому лівим кінцем пухирець повітря 9 перекриє собою лівий отвір в пробці 4 і витікання важчої рідини через нього припиниться. Так як важча і легша рідини під час витискання легшої рідини з камери 6 за допомогою поршня 3 знаходяться в гіростатичній рівновазі, то початок визначення зміни МН в часі можливий відразу після утворення краплі легшої рідини на стінці пробки 2.

Конструкція вузла для формування вільних крапель показана на рис. 3.3. Він складається з скляної трубки 1, в яку встановлюють конусоподібні пробку 2 і пробку з отвором 3. Трубку 1 з пробками закріплюють в патроні 8 за допомогою втулки 6 і гвинта 4. На пробці 3 закріплена ущільнююча прокладка 7, яка має отвір. Прокладку 7 виготовлюють з еластичного матеріалу. Патрон 8 закріплюють на валу 5 двигуна.

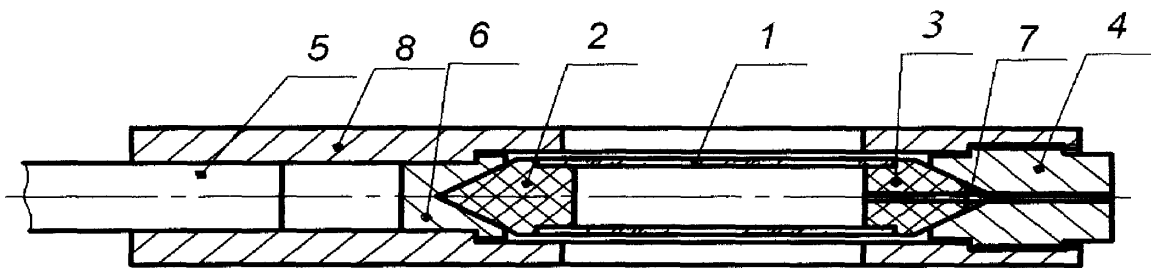


Рис. 3.3. Конструкція вузла приладу для формування вільних обертових крапель: 1 — скляна трубка; 2, 3 — пробки; 4 — гвинт фіксуючий; 5 — вал двигуна; 6 — втулка; 7 — ущільнююча прокладка; 8 — патрон

Принцип роботи вузла для утворення вільної краплі легшої рідини полягає в наступному. Заповнюють скляну трубку 1 важчою рідиною і герметично

закривають пробками 2 і 3 так, щоб надлишок повітря і важчої рідини вийшов через отвір у пробці 3 і прокладці 7. Заповнену важчою рідиною трубку 1 закріплюють в патроні 8 за допомогою втулки 6 і гвинта 4. Заповнюють шприц з голкою легшою рідиною. Приводять трубку в обертання. Після встановлення гірстатичної рівноваги обертання трубки 1 з важчою рідиною через отвори в гвинті 4 і пробці 3 вводять голку шприца і витискають краплю легшої рідини потрібного розміру. Після чого голку шприца виймають із трубки. За рахунок еластичних властивостей матеріалу прокладки 7 трубка 1 знову герметизується.

Завдяки використанню конусоподібних пробок можна в одному приладі використовувати запропоновані вузли для формування фіксованої і вільної обертових крапель при визначенні ДМН розчинів ПАР відповідними методами.

3.3 Розроблення і опис конструкції блоків приладу

Конструктивно прилад ВМН-2 складається з механічного, електронного блоків і персонального комп'ютера. Механічний блок складається з вузла для формування обертової краплі, який закріплений на валу двигуна, освітлювача і фотокамери.

Вимоги до елементів вузла утворення обертової краплі наступні. Пробки виготовляють із фторопласта і вони повинні мати конусоподібні кінці, які необхідні для центрування пробок всередині патрона за допомогою гвинта і втулки, які також мають внутрішні конусоподібні поверхні. В пробці і гвинті, які використовують у вузлі для формування фіксованої краплі (рис. 3.2), є отвір діаметром 3 мм, який необхідний для виведення штоку поршня 7. В пробці і гвинті, які використовують у вузлі для формування вільної краплі (рис. 3.3), є отвір діаметром 1 мм, який необхідний для введення голки шприца. Зовнішній діаметр пробок забезпечує герметичність із внутрішньою поверхнею трубки за рахунок пружних властивостей фторопласта.

Скляна трубка повинна бути виготовлена із пірексового або іншого прозорого скла, яке є хімічно нейтральним до досліджуваних рідких фаз. В

розробленому приладі використовують скляну трубку з внутрішнім діаметром 8 мм і зовнішнім 10 мм, довжиною 37 мм.

Патрон виготовлений з бронзи і забезпечує механічне закріплення його разом із скляною трубкою на валу двигуна за допомогою трьох гвинтів. Він має з протилежних боків продовгуваті отвори, через які спостерігають за обертовою краплею. Прецизійне виготовлення конусоподібних пробок, патрона, гвинта і втулки необхідне для забезпечення співвісності обертання скляної трубки з валом двигуна.

Обертання патрона 1 (рис. 3.4) з скляною трубкою здійснюється за допомогою колекторного двигуна постійного струму 2 типу Д-92 потужністю 25 Вт. Напряга живлення двигуна регулюється електронним блоком в межах від 2 В до 12 В. Вказаний двигун 2 має вбудований тахогенератор 3, давач якого виконаний у вигляді диска з 10-ма прорізами. По обидва боки від диска розміщені відповідно світло- і фотодіод. При обертанні диска фотодіод освітлюється в моменти часу, коли між ним і світлодіодом знаходиться проріз диска. Це забезпечує вироблення тахогенератором 3 сигналу частотою в 10 разів більшою за частоту обертання вала двигуна, що дозволяє вимірювати частоту обертання вала двигуна 2 з похибкою 0,1 об/с. Імпульси напруги, які виробляє фотодіод попередньо, підсилюються операційним підсилювачем в тахогенераторі 3 до амплітуди 0,1 В. Конструктивно тахогенератор 3 і двигун 2 виконані як один механічний вузол.

Стробоскопічний освітлювач 4 виконаний на 30 світлодіодах, які розміщені в 3 ряди по 10 штук для створення рівномірного освітлення краплі всередині скляної трубки. Застосування світлодіодів підвищеної яскравості типу UL-508H184B з довжиною хвилі випромінювання 470 нм дозволяє досягти оптимальної яскравості освітлення краплі всередині трубки 5 і виключити хроматичні аберації. Для забезпечення кращої рівномірності освітлення використовується світлофільтр 5, який виготовлений з матового скла.

Вузол фокусування 6 дозволяє переміщувати об'єктив з фотоапаратом 7 у вертикальному напрямку для отримання чіткого зображення обертової краплі.

Розміщення краплі вздовж осі обертання забезпечується правильним підбором відповідних розмірів деталей вузла формування обертової краплі — патрону, пробки і скляної трубки. У випадку необхідності зміщення краплі вздовж осі обертання можлива зміна положення патрона на валу двигуна.

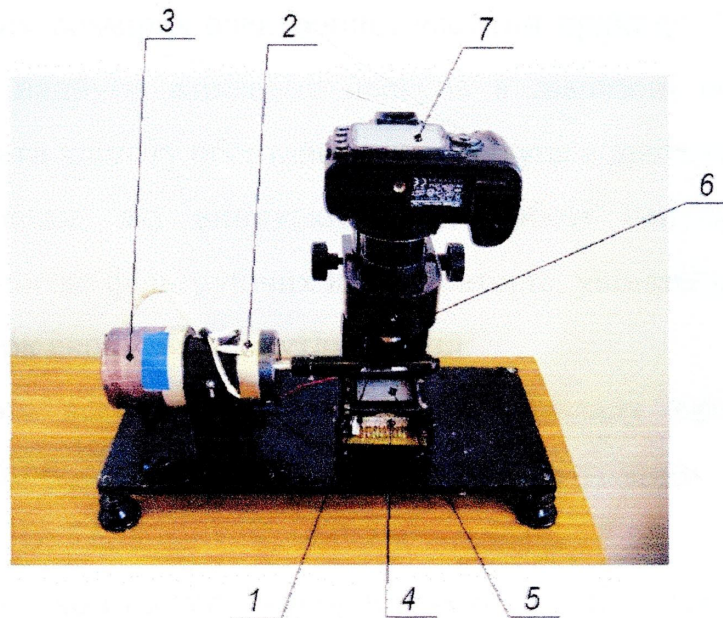


Рис. 3.4. Конструкція механічного блоку приладу ВМН-2:

1 — патрон з скляною трубкою; 2 — двигун; 3 — тахогенератор; 4 — освітлювач; 5 — світлофільтр; 6 — вузол фокусування; 7 — фотоапарат

Фотографування краплі в процесі її обертання здійснюють за допомогою фотоапарату 7 Nikon D40, який має світлочутливу матрицю розміром 6 млн. світлочутливих елементів.

До складу електронного блоку входять: вимірювальний блок, блок індикації, блок регулювання і стабілізації частоти обертання вала двигуна, блок живлення.

Вимірювальний блок призначений для вимірювання частоти обертання вала двигуна, керування блоком індикації, передавання інформації про поточну частоту обертання вала на персональний комп'ютер, вироблення сигналів синхронізації для освітлювача. Основою вимірювального блоку є мікроконтролер PIC16F628A, який дозволяє сумістити функції вимірювання частоти і керування електронними блоками приладу. Мікроконтролер підключають до персонального

комп'ютера через послідовний інтерфейс RS232 за допомогою перетворювача рівнів MAX232. Детальніша робота вимірювального блоку буде описана в наступному пункті.

Регулятор напруги живлення двигуна виконаний на основі імпульсного регулятора MAX724, що дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії схеми при менших габаритних розмірах електронної частини приладу. Вказаний регулятор забезпечує зміну напруги живлення двигуна в діапазоні від 2,2 до 12В, що дозволяє регулювати частоту обертання вала двигуна в діапазоні від 0 до 120 об/с. Імпульсні перешкоди, які виникають при роботі імпульсного регулятора, усуваються за допомогою фільтруючих конденсаторів, увімкнених в кола живлення двигуна і за рахунок екранування чутливих кіл.

Для живлення всіх електронних вузлів приладу використовують блок живлення типу Т60-С, який виробляє напруги з наступними параметрами: +15В, 3А; -15В, 0,1 А; +5В, 5А.

Персональний комп'ютер використовують для оброблення зображень обертової краплі, розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі і визначення МН в певні моменти часу. Загальний вигляд розробленого приладу з персональним комп'ютером показаний на рис.3.5.

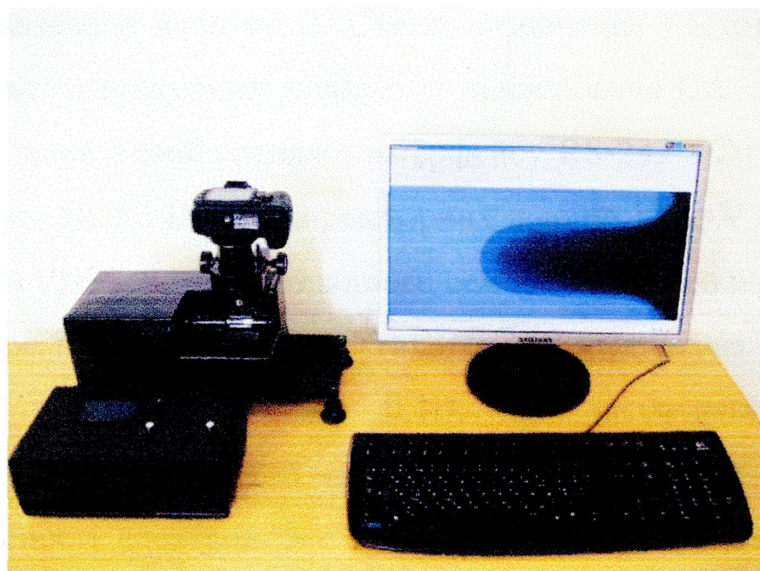


Рис. 3.5. Загальний вигляд приладу VMH-2

3.4 Опис роботи електричної схеми вимірювального блоку приладу для визначення динамічного міжфазного натягу

Для визначення ДМН розчинів ПАР розробленими методами необхідно вимірювати частоту обертання скляної трубки з рідинами. В приладі для приведення трубки з рідинами в обертання використовують двигун Д92, який має вбудований тахогенератор, що виробляє сигнал змінної напруги з частотою в 10 разів більшою за частоту обертання вала двигуна. Крім визначення частоти обертання вала двигуна електронний блок приладу повинен виконувати наступні функції: підсилення і перетворення сигналу тахогенератора в прямокутну форму, вироблення імпульсів керування освітлювачем, індикація і передавання на персональний комп'ютер значення частоти обертання вала двигуна. Крім цього електронний блок приладу повинен забезпечувати керування і стабілізацію частоти обертання двигуна.

В блоці керування двигуном використовують схему стабілізації частоти обертання двигуна, яка описана в [39]. Для зміни напруги живлення двигуна використовують імпульсний регулятор, побудований на мікросхемі MAX724 по типовій схемі ввімкнення [40].

Схема електронного блоку, яка забезпечує вимірювання частоти обертання вала двигуна показана в додатку Д. Схема визначення частоти обертання вала двигуна складається з наступних елементів: підсилювача DA1.1, тригера Шмітта DA1.2, перетворювача рівнів сигналів інтерфейсу RS-232 DD1, мікроконтролера DD2, дешифраторів DD3 і DD4, транзисторних ключів VT1÷VT6, освітлювача на світлодіодах VD2÷VD32, чотирирозрядного семисегментного індикатора HL1.

Схема працює наступним чином. Тахогенератор двигуна виробляє змінний сигнал довільної форми амплітудою 0,1В, який надходить на роз'єм XS1. Підсилювач DA1.1 підсилює цей сигнал до величини 1В. Для підвищення перешкодозахищеності електронного блоку до кіл корекції підсилювача DA1.1 підключений конденсатор С2, який обмежує підсилення змінних сигналів з частотою більшою 10кГц. Сигнали від тахогенератора двигуна підсилюються

підсилювачем DA1.1. Тригер Шмітта DA1.2 перетворює підсилений змінний сигнал тахогенератора довільної форми в сигнал прямокутної форми амплітудою 15В. Коло VD1, R5 і захисні діоди мікроконтролера DD2 використовуються для обмеження амплітуди сигналу в межах $0 \div 5$ В на вході INT мікроконтролера.

Вимірювання частоти обертання вала двигуна мікроконтролером DD2 ґрунтується на підрахунку кількості імпульсів, які поступають на вхід INT протягом 1 с. Алгоритм роботи мікроконтролера DD2 показаний на рис. 3.6. При надходженні імпульсу на вхід INT мікроконтролера в ньому виникає переривання в підпрограмі оброблення якого відбувається інкремент лічильної змінної (оператори 2, 3). Після надходження 10 імпульсів на вхід INT на виході RA2 формується імпульс напруги тривалістю 10мкс (оператори 4, 5). Через проміжки часу 1с в мікроконтролері DD2 виникають переривання, в підпрограмі-обробнику якого відбуваються наступні дії: передавання значення лічильної змінної на персональний комп'ютер через інтерфейс RS-232, вивід значення частоти на табло і обнулення лічильної змінної (оператори 6÷9). Текст розробленої програми мікроконтролера на мові C++ приведений в додатку Е.

Імпульси з виводу RA2 мікроконтролера DD2 надходять на транзисторний ключ VT1, навантаженням якого є світлодіоди VD2÷VD32 освітлювача. Для індикації частоти обертання вала двигуна в приладі використовують чотирирозрядне семисегментне табло BQ-M512RD. Керування таблом HL1 здійснюється дешифраторами DD3 і DD4. Дешифратор DD3 перетворює двійково-десятковий код на виводах RB4÷RB7 мікроконтролера DD2 в семисегментний код. Ввімкнення необхідної цифри на табло здійснюється за допомогою дешифратора DD4 і транзисторних ключів VT6÷VT9.

Розроблений блок вимірювання частоти обертання вала двигуна дозволяє здійснювати вимірювання з точністю $\pm 0,1$ об/с; передавати значення частоти обертання вала двигуна на персональний комп'ютер, що дозволяє враховувати зміну частоти обертання вала двигуна в часі.

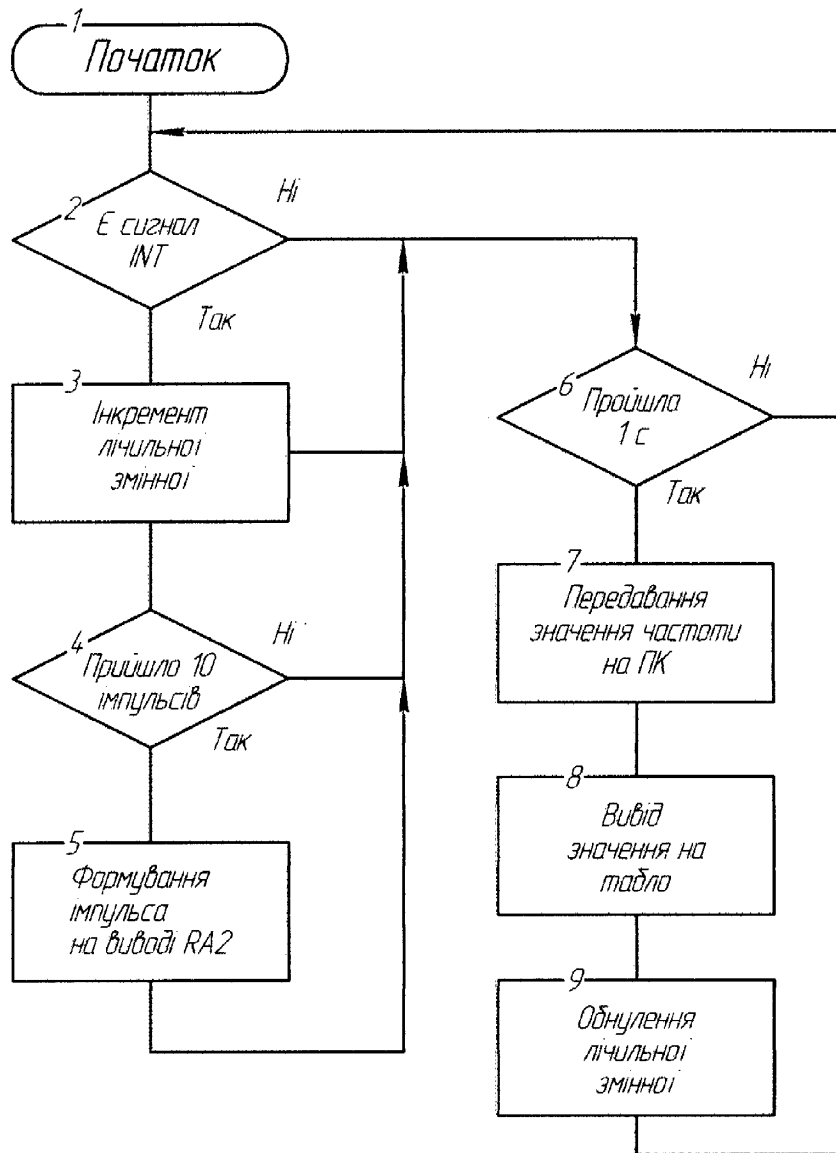


Рис. 3.6. Алгоритм роботи мікроконтролера для вимірювання частоти обертання двигуна

3.5 Визначення координат точок контуру обертової краплі із її зображення

Існують наступні методи виділення країв об'єктів на їх зображенні: порогові, диференційні, порівняння з шаблоном, просторового перетворення. Порогові методи виділення країв є найпростішими, але вимагають задавання порогового рівня яскравості для відділення об'єкту від фону. Диференційні методи використовують оцінку локального значення градієнта або його проекції у відповідному напрямку. Реалізують метод диференціювання градієнтні

оператори: Робертса, Собела, Превітт, Лапласіан-Гаусіан. Недоліком диференційних методів є чутливість до шуму, що вимагає попереднього фільтрування зображення. Методи порівняння з шаблоном використовують порівняння шаблонів краю із зображенням, кожен з яких є краєм у деякій орієнтації. В методах порівняння з шаблоном використовують оператори Робінсона, Кірша, також Превітт і Собела. Ці методи вимагають значних обчислень. Особливістю методів просторового перетворення є перехід від картини інтенсивності до інших багатовимірних просторів. Реалізують ці методи детектори Хюккеля, Бекера, Хука та ін. [41, 42].

Для визначення ДМН розчинів ПАР методом вільної обертової краплі координати точок її контуру отримують з використанням методики радіальної розгортки, яка запропонована в [43].

Визначення ДМН розчинів ПАР можливе на основі зображень непрозорих крапель (рис. 3.7,а), наприклад, нафта — розчин ПАР і прозорих крапель (рис. 3.7,б), наприклад, керосин — розчин ПАР. Цифрове зображення обертової краплі є матрицею P розміром $D \times W$ елементів, кожний з яких містить інформацію про яскравість точки зображення (яскравість точки задається числом від 0 до 255).

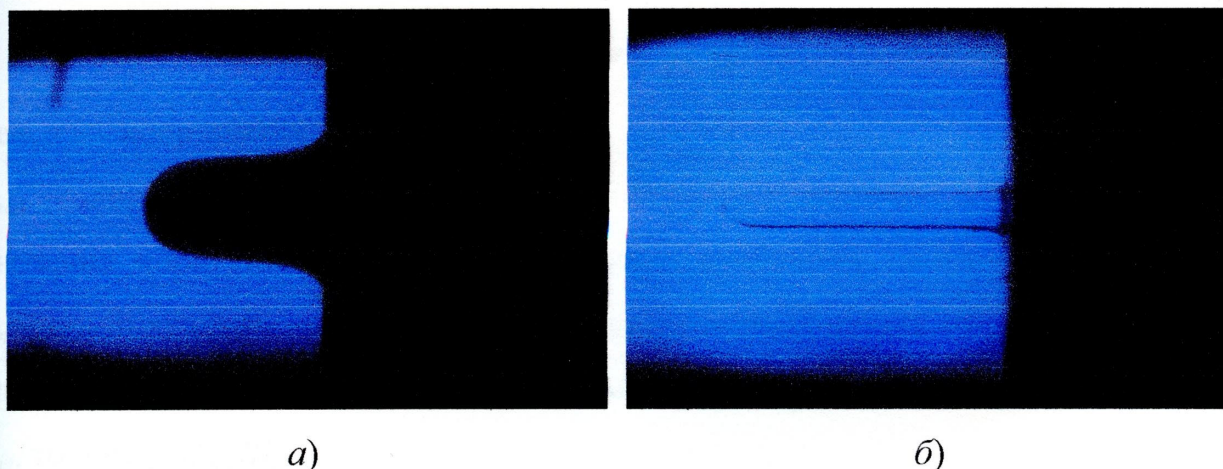


Рис. 3.7. Фотографії непрозорої (а) і прозорої (б) крапель

Визначення координат точок контуру краплі (рис. 3.7,а) доцільно здійснювати диференційним методом, оскільки такий метод забезпечує достатню

точність. З метою збільшення швидкодії і покращення ефективності роботи програмного забезпечення доцільно спочатку знаходити межі зображення, в яких знаходиться крапля. Алгоритм знаходження точок контуру краплі не вимагає точного знаходження цих меж. Тому їх пошук можна здійснювати простим методом порогового розділення зображення на краплю і фон. Фотографування краплі під час проведення досліду повинне відбуватися за однакових умов: постійна витримка затвора фотоапарата, постійне освітлення. В такому випадку значення порогового рівня яскравості є величиною сталою і її можна попередньо визначити експериментально. Освітлення краплі від освітлювача приладу здійснюється за допомогою світлодіодної матриці, яка живиться імпульсами напруги постійного значення, що забезпечується блоком живлення (нестабільність напруги живлення складає $\pm 0,1\text{В}$ при нарузі живлення 15В) і постійної тривалості, що забезпечується мікроконтролером. Однаковий час витримки затвора фотоапарата забезпечується виробником, але цей час витримки не є сталою величиною. Щоб врахувати нестабільність витримки затвора фотоапарата можна порогове значення яскравості визначити із самого зображення таким чином:

$$B_{\text{пор}} = k_{\text{кор}} \frac{\sum_{z=1}^W \sum_{x=1}^D P_{z,x}}{D \cdot W}, \quad (3.1)$$

де z, x — координати точки зображення;

$k_{\text{кор}}$ — коригуючий коефіцієнт, який попередньо визначають експериментально. Значення коригуючого коефіцієнта можна визначити таким чином: визначити $B_{\text{пор}}$, прийнявши $k_{\text{кор}}=1$. На зображенні здійснюється пошук точки контуру краплі, для якої значення градієнту буде максимальним, визначають яскравість цієї точки B_{ij} , тоді $k_{\text{кор}}=B_{\text{пор}}/B_{ij}$.

3.5.1 Спосіб оброблення зображення з непрозорою краплею

В загальному визначення координат контуру краплі на рис. 3.7,*а* складається з ряду дій: пошуку меж краплі, визначення рівняння осі обертання краплі і пошук

координат точок контуру краплі.

Для знаходження меж краплі здійснюють ряд дій, які полягають у скануванні зображення краплі в певних напрямках. Такими діями є: пошук меж пробки в правій частині зображення, пошук меж верхньої і нижньої стінок скляної трубки, пошук лівої межі краплі. Поріг яскравості, який використовують для розділення краплі і фону, обчислюють за виразом (3.1). Знайдені прямокутні межі краплі запам'ятовуються у змінних: *LeftTopDrop* — координата лівої верхньої точки прямокутника, *RightBottomDrop* — правої нижньої точки.

Виділення контуру краплі в знайдених прямокутних межах здійснюють з використанням методу Кенні [44], в якому для визначення краю об'єкта зображення використовують оператор Собела. Шуми, що присутні на зображенні, мають значний вплив на результат визначення градієнта яскравості оператором Собела. Причиною появи шумів є теплові шуми в ПЗЗ-матриці фотокамери. З цією метою здійснюють фільтрацію зображення оператором Гауса, що за характером дії є фільтром низьких частот. Найпростішим є оператор, в якому яскравість точки у відфільтрованому зображенні рівна середньому арифметичному значенню яскравостей сусідніх точок. Такому операторові властивий недолік — спотворення контурів об'єктів на зображенні. Цей недолік суттєво зменшений в операторові Гауса. Фільтрування зображення оператором Гауса здійснюють у вікні розміром $H \times H$ точок, де $H = 3, 5, 7, \dots$. При обробці матриці P отримаємо матрицю F , в якій значення елемента буде обчислюватись за виразом:

$$F_{z,x} = \frac{1}{\sigma_{\Gamma}^2} \sum_{k=z-N}^{z+N} \sum_{l=x-N}^{x+N} \left(P_{k,l} \cdot e^{-\frac{(z-k)^2 + (x-l)^2}{\sigma_{\Gamma}^2}} \right), \quad (3.2)$$

де z, x — координати елементів матриць;

k, l — індекси елементів матриць всередині вікна;

N — половина розміру вікна: $N = (H-1)/2$;

σ_{Γ} — середнє квадратичне відхилення розсіювання функції Гауса. Як правило σ_{Γ} вибирають рівним H .

Для отримання необхідного результату фільтрації треба оптимально вибрати розмір вікна H . При збільшенні розміру вікна покращується шумоподавлення, але при занадто великому значенні H суттєво зменшується чіткість контурів об'єктів на зображенні, що має вплив на результат визначення градієнтів яскравості. Оптимальне значення H визначають експериментально і це значення рівне $H=15$.

Градієнт яскравості з допомогою оператора Собела розраховують по рядках (горизонтальний градієнт) та стовпцях (вертикальний градієнт) матриці F . Результатом розрахунку є матриці U та V , значення елементів яких розраховують за виразами:

$$\begin{aligned} U_{z,x} &= \sum_{k=z-1}^{z+1} \sum_{l=x-1}^{x+1} (F_{k,l} \cdot u_{k-z+1,l-x+1}); \\ V_{z,x} &= \sum_{k=z-1}^{z+1} \sum_{l=x-1}^{x+1} (F_{k,l} \cdot v_{k-z+1,l-x+1}), \end{aligned} \quad (3.3)$$

де u, v — матриці операторів Собела [44]:

$$u = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad v = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Модуль градієнта $G_{i,j}$ в визначають наступним чином:

$$G_{z,x} = \sqrt{U_{z,x}^2 + V_{z,x}^2}. \quad (3.4)$$

В результаті обчислення за формулою (3.4) отримують зображення контурів. Але отримані контури мають товщину декілька точок. Щоб отримати зображення контурів товщиною в одну точку необхідно здійснити пошук максимального значення градієнта на певному відрізку (ця дія називається "усуненням" немасимумів). Довжина відрізка може мати фіксовану величину. Але кращі результати можна отримати, якщо довжина відрізка буде залежати від елемента зображення. Щоб визначити довжину відрізка, на якому буде здійснюватись пошук максимуму градієнта, виконують бітоналізацію матриці G нелінійним оператором. В результаті отримують матрицю B , значення елементів якої розраховують наступним чином:

$$B_{z,x} = \begin{cases} 255, \text{ якщо } G_{z,x} > L; \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad (3.5)$$

де L — деякий пороговий рівень, при якому вважають, що елемент матриці G може належати контуру.

Значенням порогового рівня можна задаватись. Для автоматизації роботи програми пропонується рівень L визначати як середнє арифметичне значення елементів матриці G , тобто:

$$L = \frac{\sum_{z=1}^W \sum_{x=1}^D G_{z,x}}{D \cdot W}, \quad (3.6)$$

де D, W — розміри матриці G .

"Усунення" немаксимумів здійснюють на основі інформації, яка є в матрицях G та B . Суть операції полягає в тому, що здійснюють пошук елемента по рядках та стовпцях матриці G з координатами z, x , який має максимальне значення на відрізьку, на якому значення елементів матриці B рівні 255. Створюють матрицю GM , в якій елемент з відповідними координатами z, x рівний 255. Значення інших елементів прирівнюється до нуля. Таким чином матриця GM буде містити зображення контурів об'єктів. Матриця GM містить деяку кількість елементів, що рівні 255, але не належать жодному контуру — сусідні до них елементи дорівнюють нулю. "Усунення" ізольованих елементів полягає у фільтруванні матриці GM нелінійним оператором у вікні із стороною $H=3$. Значення елементів матриці R відфільтрованого зображення розраховують згідно виразу:

$$R_{z,x} = \begin{cases} 255, \text{ якщо } \sum_{k=z-N}^{z+N} \sum_{l=x-N}^{x+N} GM_{k,l} > 255 \cdot N; \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad (3.7)$$

де $N=(H-1)/2$.

Щоб зменшити величину розривів в контурі краплі можна скористатись розширюючим оператором. Значення елементів матриці S тоді будуть розраховуватись за виразом:

$$S_{z,x} = \begin{cases} 255, \text{ якщо } \left(\sum_{k=z-1}^{z+1} \sum_{l=x-1}^{x+1} GM_{k,l} = 255 \right) \text{ та } (R_{z,x} = 255); \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Таким чином в матриці S елементи, значення яких дорівнює 255 будуть відповідати контурові краплі. Координати точок контуру краплі із такого зображення можна легко отримати шляхом сканування площини зображення. В результаті отримуємо два набори координат контуру краплі: верхньої і нижньої частини. Верхня частина контуру краплі зберігається в масиві *TopPoints*, нижня у масиві *BottomPoints*.

Зображення краплі може бути повернене на невеликий кут. Щоб врахувати цей поворот необхідно знайти рівняння осі обертання краплі, що дозволить врахувати поворот зображення. За допомогою наборів координат верхньої і нижньої частин контуру краплі знаходять точки осі, які апроксимують лінійною залежністю. Координати точок осі зберігаються в масиві *SpinPoints*, їх розраховують таким чином:

$$\begin{aligned} SpinPoint.z &= TopPoint.z, \\ SpinPoint.x &= \frac{TopPoint.x + BottomPoint.x}{2}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Значення коефіцієнтів рівняння, яке відповідає осі обертання, записують у змінні *spina* і *spinb*. Рівняння осі має вигляд:

$$x = spina + spinb \cdot z. \quad (3.10)$$

Збільшити точність розрахунку МН можна, використовуючи метод субпіксельного визначення координат точок контуру. Для цього залежність градієнта у стовпчику зображення біля точки контуру краплі апроксимують кубічною залежністю

$$G(z) = a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0. \quad (3.11)$$

Для апроксимації використовують 21 точку. Координату x визначають з похідної від виразу (3.11), прирівнявши її до нуля.

Запропонований алгоритм є ефективним для отримання координат точок контуру обертової краплі, яка непрозора. Але цей алгоритм не забезпечує

потрібного результату при обробленні зображень із прозорою краплею, що пов'язано із самим зображенням такої краплі: її контур має низьку контрастність і зміну градієнту, що призводить до низької точності знаходження координат точок контуру краплі. Тому при використанні прозорої легшої рідини потрібно розробити алгоритм роботи програми, який забезпечить надійну обробку зображень із краплею прозорої рідини.

3.5.2 Спосіб оброблення зображень із прозорою краплею

Алгоритм оброблення зображення із прозорою краплею включає наступні дії: пошук меж стінок скляної трубки і пробки, визначення координат точок контуру краплі і осі обертання краплі. Пошук меж стінок скляної трубки і пробки здійснюється так само, як і при обробці зображення із непрозорою краплею. Подальше оброблення зображення краплі полягає у його скануванні і здійснюється таким чином: пошук точок контуру краплі з точністю до пікселя, визначення коефіцієнтів рівняння (3.10), пошук координат точок контуру краплі з субпіксельною точністю.

Для знаходження координат точок контуру краплі зображення розділяють горизонтальною прямою на дві однакові половини. Верхню і нижню частини зображення сканують від лінії розділення зображення вгору і вниз для пошуку точок контуру прозорої краплі. Розглянемо алгоритм пошуку однієї точки контуру краплі у верхній частині зображення. Зображення розбивається на колонки, кожна колонка сканується від лінії розділення зображення до межі верхньої стінки скляної трубки. Під час сканування здійснюється пошук координат точки з найменшою яскравістю, визначення яскравості точок, які мають найменшу B_{\min} і найбільшу B_{\max} яскравість серед відсканованих точок. Рівень яскравості $B_{\text{пор}}$, який використовується для пошуку точки контуру краплі визначається за допомогою B_{\min} і B_{\max} :

$$B_{\text{пор}} = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{2}. \quad (3.12)$$

Колонка повторно сканується від точки з найменшою яскравістю до межі

верхньої стінки скляної трубки. При цьому відбувається пошук точки, яскравість якої є найближчою до V_{nop} . Координата знайденої точки запам'ятовується у змінній *TopPoint*. Подібним чином відбувається пошук точки контуру краплі в нижній частині зображення, координата точки запам'ятовується у змінну *BottomPoint*. Згідно рівняння (3.9) розраховується координата точки осі обертання. Такі дії повторюються в кожній колонці зображення для визначення координат інших точок осі обертання. Знайдені координати точок осі обертання використовуються для розрахунку коефіцієнтів *spina* і *spinb* рівняння прямої (3.10), яка відповідає рівнянню осі обертання. Описаний вище алгоритм не дозволяє визначити координати усіх точок контуру краплі, а тільки ті, які розміщені між межею пробки і точкою перетину прямої розділення зображення і контуру краплі. Ця точка знаходиться правіше від омбілічної точки, тому частина контуру краплі втрачається. Пряма (3.10) відповідає осі обертання, яка проходить через омбілічну точку, що дозволяє правильно розділити зображення краплі і визначити координати точок контуру краплі. Тому здійснюється повторне сканування зображення з використанням знайденої прямої осі обертання для розділення зображення, що дозволяє знайти всі точки контуру краплі від межі пробки до омбілічної точки.

Для субпіксельного знаходження координат точок контуру краплі частину колонки зображення біля знайденої точки контуру апроксимовують залежністю:

$$B(x) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0. \quad (3.13)$$

Координата x з субпіксельною точністю визначається з похідної від виразу (3.13), прирівнявши її до нуля.

Знайдені точки контуру краплі зберігаються в масиві *ShapePoint*. В цій змінній знайдені координати точок зберігаються у вигляді масиву, при цьому координати точок відповідають координатам на зображенні. Для подальшого використання знайдених координат точок необхідно початок координат перенести в омбілічну точку, здійснити поворот координат на кут, на який розвернута вісь обертання відносно горизонтальної прямої і розрахувати справжні координати точок з врахуванням коефіцієнтів перетворення об'єктиву фотоапарата і

оптичного збільшення скляної трубки з важчою рідиною, що у розробленому програмному забезпеченні здійснюється над даними в масиві *ShapePoint*. Для розрахунку коефіцієнта оптичного збільшення використовують залежності, які приведені в п. 2.5. Коефіцієнт перетворення об'єктиву фотоапарата визначається експериментально під час калібрування приладу за допомогою спеціальних калібрів з нанесеною сіткою, що буде розглянуто далі.

3.6 Дослідження динамічного міжфазного натягу удосконаленим приладом методом вільної обертової краплі

Визначення ДМН розчинів ПАР удосконаленим методом вільної обертової краплі включає підготовку приладу і досліджуваних рідин до проведення вимірювань, спостереження за зміною форми і розмірів обертової краплі протягом певного часу, визначення МН в певні моменти часу, побудова графіків зміни МН в часі і оброблення з аналізом результатів.

В процесі підготовки приладу до вимірювань необхідно за допомогою ніжок привести механічний блок у строго горизонтальне положення, яке контролюють за допомогою рівня. Вмикають електронний блок, фотоапарат і персональний комп'ютер (ПК). Двигун, який приводить в обертання трубку з рідинами, повинен бути вимкненим. Перевіряють синхронність ходу електронних годинників у фотоапараті і ПК. У випадку необхідності синхронізують хід годинників у фотоапараті і ПК таким чином, щоб розходження між показами годинників не перевищувало 1с.

Відкручують гвинт 4 (рис. 3.3) з патрона 8 і виймають скляну трубку 1 разом із пробками 2 і 3. Трубку і пробки ретельно промивають у хромпиковій кислоті, потім гарячою водою, після чого промивають у спирті і в дистильованій воді з метою очищення їх від залишків раніше досліджуваних рідин. Просушують трубку і пробки в сушильній шафі при температурі $90 \div 110$ °С протягом 1 год. Досліджувані рідини (розчин ПАР, нафта) повинні зберігатися в умовах і посуді, що не допускає можливості їх забруднення іншими рідинами чи твердими

домішками.

Трубку 1 заповнюють важчою рідиною (розчин ПАР певної концентрації) і закривають пробками 2 і 3. При цьому через отвір в пробці 3 частина зайвої важчої рідини виходить назовні. Контролюють наявність пухирців повітря в важчій рідині і при їх присутності операцію заповнення трубки важчою рідиною повторюють. Встановлюють заповнену розчином ПАР і закриту пробками 2 і 3 трубку 1 в патрон 8. У патрон 8 закручують гвинт 4. Вмикають двигун приладу за допомогою блоку регулювання частоти обертання. Встановлюють початкове значення частоти обертання двигуна в діапазоні $40 \div 80$ об/с. Завантажують програму реєстрації частоти в ПК. Утворюють краплю легшої рідини, так як це описано в п. 3.2.

Фотоапарат 17 (рис. 3.1) наводять на чіткість за допомогою вузла фокусування 16 таким чином, щоб видимий профіль краплі був контрастним. Крапля на зображенні повинна вміщуватись повністю. Якщо частина краплі виходить за межі зображення, змінюють частоту обертання двигуна 4 за допомогою блоку регулювання частоти 7. При цьому слід враховувати, що в процесі зміни МН розмір і форма краплі також змінюється. При використанні розчинів ПАР МН з часом зменшується, що призводить до витягування краплі вздовж осі обертання.

Починають фотографувати краплю за допомогою фотоапарата 17. Залежно від зміни МН в часі інтервал, через який роблять наступний знімок, може становити від 0,5 с до 60 с. Для фотографування з мінімально можливим інтервалом у фотоапараті вмикають режим серійної зйомки. В процесі фотографування час утворення зображення фіксується у фотоапараті автоматично.

Щоб отримати зміну МН розчину ПАР в часі фотографування краплі в процесі її обертання проводять впродовж тривалого періоду часу (від декількох хвилин до декількох годин). Дослід повинні проводити при постійній частоті обертання вала 5 двигуна 4. Але під дією різних факторів (нагрів обмоток двигуна, електронних компонентів, зміни напруги живлення, тощо) частота

обертання вала 5 двигуна 4 може плавно змінюватись в часі. Щоб врахувати зміну частоти обертання вала двигуна в приладі здійснюється вимірювання частоти обертання вала двигуна блоком вимірювання частоти 18 з інтервалом в 1с. Отримані значення автоматично передаються в ПК 20, в якому фіксується значення частоти обертання в часі.

Після завершення процедури фотографування двигун і електронний блок приладу вимикають, виймають трубку з рідинами з патрона. Скляну трубку з пробками промивають і просушують згідно із описаною вище методикою. Копіюють файли із зображеннями краплі з фотоапарата в ПК.

Для визначення МН в певний момент часу здійснюють оброблення зображення краплі в трубці в усі моменти часу, визначають із зображення координати точок експериментального контуру краплі, розраховують координати точок теоретичного контуру краплі, який відповідає експериментальному. За допомогою ключових геометричних розмірів контурів (радіусу в певному її січенні) визначають значення МН у відповідні моменти часу. На основі отриманих даних будують залежність зміни МН в часі розчину ПАР відповідної концентрації на межі розділу із нафтою.

Аналогічним чином отримують залежність МН в часі розчину ПАР інших (більших від попередньої) концентрацій.

3.7 Дослідження динамічного міжфазного натягу удосконаленим приладом методом фіксованої обертової краплі

Визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої обертової краплі включає підготовку приладу і досліджуваних рідин до проведення вимірювань, спостереження за зміною форми і розмірів краплі протягом певного часу, визначення МН в певні моменти часу, побудова графіків зміни МН в часі і оброблення з аналізом результатів. Всі операції крім, заповнення рідинами скляної трубки, є такими ж як і при визначенні ДМН розчинів ПАР методом вільної краплі.

Для дослідження ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої обертової краплі використовують скляну трубку з пробками і поршнем конструкція, якої показана на рис. 3.2. Заповнення скляної трубки рідинами здійснюють так як це описано в п. 3.2.

Заповнену рідинами скляну трубку встановлюють в патрон 13. Гвинт 10 закручують так, щоб він торкнувся штоку 8. Трубку з рідинами приводять в обертання з частотою $40 \div 80$ об/с. Під час обертання трубки 1 з рідинами за допомогою гвинта 10 рухають поршень 3, який витискає краплю легшої рідини через отвір пробки 2 в камеру 7 з важчою рідиною. Після цього здійснюють фотографування краплі всередині трубки в певні моменти часу. Отримані зображення копіюють на ПК і за допомогою розробленого програмного забезпечення визначають залежність $\sigma(t)$.

3.8 Калібрування оптичної системи приладу

При визначенні ДМН розчинів ПАР використовують координати точок контуру обертової краплі, які мають розмірність довжини. З цифрового зображення обертової краплі отримують координати точок її контуру в точках (пікселях) зображення. Для визначення ДМН розчинів ПАР необхідно визначити коефіцієнт перетворення K_{opt} оптичної системи приладу, який дозволить отримати координати точок контуру краплі з розмірністю довжини. Коефіцієнт перетворення K_{opt} можна визначити при проектуванні об'єктиву приладу. В розробленому приладі використовують об'єктив ПЛАН-АПО 2,5 0,08 від мікроскопа Біолам, на якому закріплюють фотоапарат за допомогою виготовленого перехідника. В цьому випадку коефіцієнт K_{opt} необхідно визначити експериментально під час калібрування приладу за допомогою спеціальних калібрів для мікроскопів з нанесеною сіткою або шкалою.

Для визначення коефіцієнта перетворення K_{opt} калібр фотографують таким чином, щоб лінії сітки або поділки шкали калібру були строго вертикальні або горизонтальні і розміщені в центрі зображення. На цифровому зображенні в

комп'ютері за допомогою програмного забезпечення відраховують кількість пікселів N_3 , які відповідають певній кількості N_k поділок калібру. Коефіцієнт перетворення K_{onm} розраховують за виразом:

$$K_{onm} = \frac{N_k}{N_3}. \quad (3.14)$$

Для визначення коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу K_{onm} було використано окулярну сітку, яка входить у комплект мікроскопів МБС, лінії якої нанесені через $1 \pm 0,001$ мм [45]. Для $N_k=10$ і $N_3=1967$ значення коефіцієнта перетворення об'єктива приладу складає $K_{onm}=1/196,7$ мм/піксел.

З врахуванням коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу вираз (2.36) прийме вигляд:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_{pi} K_{onm}}{M(x_{pi} K_{onm})}, \\ z_i = z_{pi} K_{onm}, \end{cases} \quad (3.15)$$

де x_{pi} , z_{pi} – координати точок експериментального контуру обертової краплі на її зображенні.

Калібрування оптичної системи приладу може передбачати визначення залежності коефіцієнта оптичного збільшення трубки із рідинами $M(R)$ для різних розмірів краплі. Наведені в п. 2.5 залежності для розрахунку коефіцієнта M передбачають попереднє визначення розмірів скляної трубки і коефіцієнтів оптичного заломлення важчої рідини і матеріалу трубки. Експериментальне визначення залежності $M(R)$ доцільно проводити тільки в тих випадках, коли параметри, які необхідні для розрахунку $M(R)$ визначити неможливо.

Для експериментального визначення залежності $M(R)$ пропонується використовувати одно- або багатоступеневі циліндричні калібри [3, 6, 11]. Одноступеневі калібри найчастіше застосовують при визначенні МН методом Б. Воннегута, тому що вони дозволяють отримати тільки одне значення $M(R)$. Багатоступеневі калібри використовують щоб отримати залежність $M(R)$ шляхом апроксимації даних для кожної ступені калібру. В удосконаленому методі вільної обертової краплі і розробленому методі фіксованої обертової краплі для

визначення ДМН розчинів ПАР необхідно визначати координати точок контуру краплі в широкому діапазоні зміни їхніх радіусів, що вимагає виготовлення калібрів, які мають велику кількість ступенів, що в свою чергу ускладнює їхнє виготовлення.

Для визначення $M(R)$ шляхом калібрування можна використовувати конусоподібний калібр (рис. 3.8), який дозволить отримати залежність $M(R)$ в широкому діапазоні зміни R точок контуру краплі.

Зміна координат точок профілю конусоподібної частини калібра відповідає рівнянню:

$$x = \frac{D_{\text{макс}} z}{2L}. \quad (3.16)$$

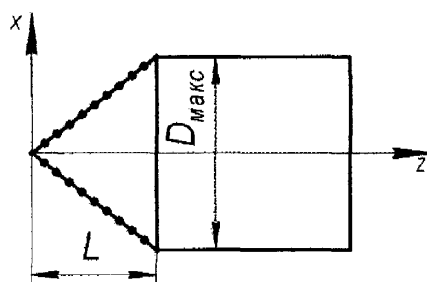


Рис. 3.8. Форма конусоподібного калібра

Щоб отримати залежність $M(R)$ з калібр поміщують в скляну трубку з важкою рідиною і фотографують. Із зображення визначають координати точок профілю конусоподібної частини калібра із врахуванням коефіцієнта оптичного перетворення K_{opt} . Для кожної точки розраховують коефіцієнт M :

$$M_i = \frac{2Lx_{ei}}{D_{\text{макс}} z_{ei}}, \quad (3.17)$$

де x_{ei} , z_{ei} — видимі координати точок профілю калібра.

На основі розрахованих M_i для x_{ei} будують таблиці і їх апроксимовують відомими функціональними залежностями, щоб отримати залежність $M(R)$.

Висновки до розділу

Згідно із проведеними дослідженнями та на основі поданого в третьому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) розроблено конструкцію вузла приладу для утворення фіксованої обертової краплі, який дозволяє отримувати на вертикальній поверхні пробки всередині скляної трубки з важчою рідиною фіксовану обертову краплю легшої рідини під час обертання. Запропонований вузол для утворення фіксованої обертової краплі дозволяє здійснювати дослідження ДМН розчинів ПАР і зменшити нижню межу часу, з якої здійснюють визначення ДМН розчинів ПАР;

б) запропоновано конструкція вузла для утворення вільної обертової краплі, який використовують при дослідженні ДМН розчинів ПАР удосконаленим методом вільної обертової краплі в розробленому приладі;

в) розроблено структурну схему і конструкцію приладу ВМН-2 для визначення ДМН розчинів ПАР удосконаленим методом вільної і розробленим методом фіксованої обертових крапель. Використаний в приладі фотоапарат з великою кількістю фоточутливих елементів (бмлн.) дозволяє підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР за рахунок зменшення дискретності розмірів отриманого зображення обертової краплі;

г) розроблено електричну схему приладу ВМН-2, яка забезпечує вимірювання частоти обертання вала двигуна, зміну і стабілізацію частоти обертання вала двигуна, синхронне підсвічування скляної трубки залежно від положення вала двигуна, підключення персонального комп'ютера до приладу для автоматичного запису частоти обертання вала двигуна в часі;

д) розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, який використовується для вимірювання частоти і керування іншими вузлами приладу;

е) розроблено програмне забезпечення для персонального комп'ютера, яке дозволяє отримувати координати точок експериментальних контурів вільної і фіксованої обертових крапель із їх зображення, на основі отриманих координат точок експериментальних контурів розраховувати регресійним способом подібні теоретичні контури відповідних обертових крапель, на основі яких визначати ДМН розчинів ПАР;

ж) розроблені методики визначення ДМН розчинів ПАР розробленим приладом ВМН-2, які дозволяють визначати ДМН розчинів ПАР методами вільної і фіксованої обертових крапель;

з) розроблено методику калібрування оптичної системи приладу ВМН-2 за допомогою калібру у вигляді сітки для визначення коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу і методику визначення залежності коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з важчою рідиною від розміру обертової краплі за допомогою конусоподібного калібру.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І ПРИЛАДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

4.1 Аналіз інструментальних похибок приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

Розглянемо схему накопичення похибок розробленим приладом ВМН-2 при визначенні ДМН розчинів ПАР (рис. 4.1).

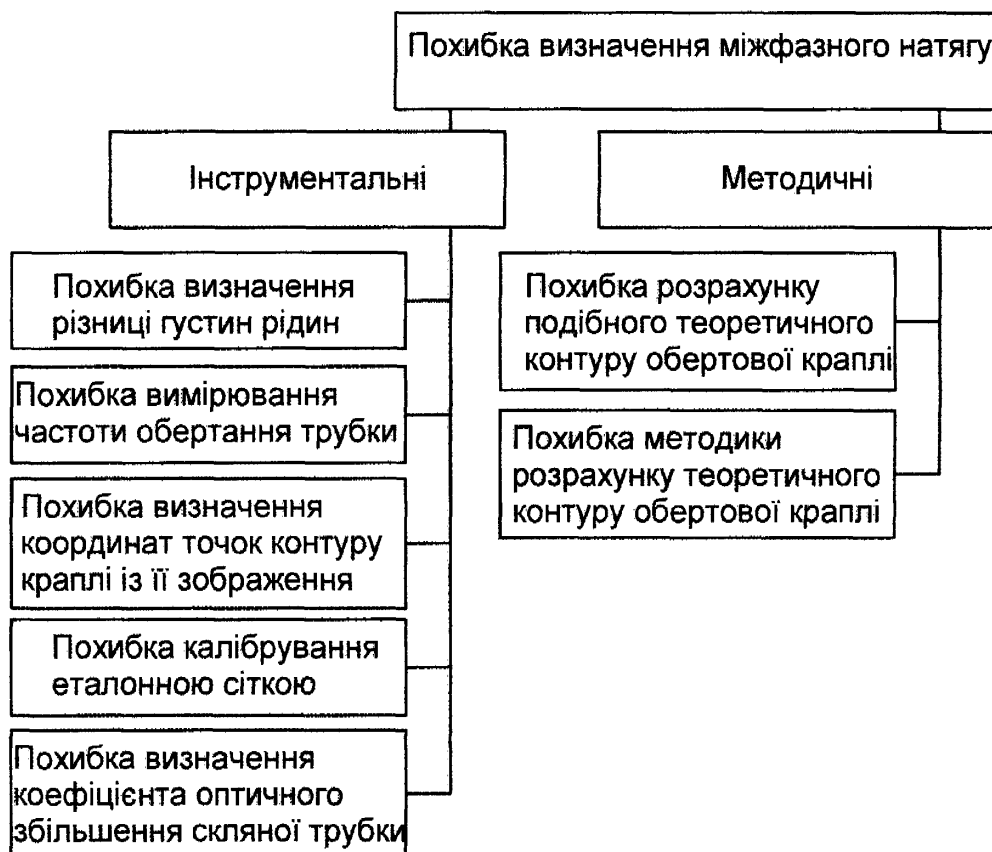


Рис. 4.1. Схема накопичення похибок приладом ВМН-2 при визначення ДМН розчинів ПАР

До інструментальних відносяться наступні похибки: визначення різниці густин досліджуваних рідин, вимірювання частоти обертання трубки із рідинами,

визначення координат контуру обертової краплі із її зображення, калібрування оптичної системи приладу за допомогою еталонної сітки, визначення коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з досліджуваними рідинами.

Попереднє визначення різниці густин досліджуваних рідин забезпечується густиномірами, які виробляють серійно. Абсолютна похибка вимірювання густини рідин такими густиномірами складає $\Delta\rho=\pm 0,1$ кг/м³ [46, 47].

Виникнення похибки вимірювання частоти обертання трубки мікроконтролером, який знаходиться в електронному блоці приладу, пов'язано із самою методикою вимірювання частоти і відхиленням частоти тактового генератора мікроконтролера. Тахометр двигуна приладу має вигляд диску, який має десять отворів з центрами через 36°. Мікроконтролер здійснює підрахунок імпульсів, які надходять від тахометра двигуна впродовж однієї секунди. Таким чином методична похибка вимірювання частоти вала двигуна мікроконтролером становить $\pm 0,1$ об/с. Відхилення частоти тактового генератора мікроконтролера пов'язане із точністю виготовлення кварцового резонатора, який задає його тактову частоту, наявністю паразитних ємностей електричного монтажу. Зразковий інтервал часу, впродовж якого відбувається підрахунок імпульсів тахометра, задається одним із таймерів мікроконтролера і може бути змінений з кроком 16 мкс. Для цього мікроконтролер калібрують за допомогою зразкових вимірювальних приладів. Мікроконтролер, який використовують у розробленому приладі, було відкалібровано за допомогою частотоміра ЧЗ-33. Тому максимальна сумарна похибка вимірювання частоти складає $\Delta f=0,100016$ об/с.

Похибка визначення координат точок контуру обертової краплі має значний вплив на похибку визначення ДМН розчинів ПАР. Зменшити величину цієї похибки можна використовуючи ПЗЗ матрицю із значною кількістю елементів і застосовуючи метод субпіксельного визначення меж контуру обертової краплі, що і використовується у розробленому приладі та програмному забезпеченні для нього. Похибку субпіксельного визначення меж досліджували у роботах [48÷50]. В цих роботах було зроблено математичний аналіз виникнення даної похибки для неперервних значень зміни яскравості межі об'єкта зображення. Зображення

обертової краплі є дискретним і вплив дискретизації яскравості точок зображення на величину похибки у цих роботах не досліджено. В такому випадку пропонується визначати дану похибку шляхом моделювання [51].

Для визначення цієї похибки були створені зображення з відомими координатами точок контуру обертової краплі (параметри розрахунку контуру обертової краплі наступні: $\sigma=10$ мН/м, $f=50$ об/с, $\Delta\rho=180$ кг/м³) і різної чіткості, щоб дослідити вплив чіткості меж обертової краплі на величину цієї похибки. З метою створення зображень обертової краплі різної чіткості вихідне зображення фільтрувалось за допомогою оператора Гауса (3.2) з наступними значеннями середніх квадратичних відхилень розсіювання функції Гауса σ_G : 3, 7, 11, 15, 19, 31, 41. Зображення, яке створюється ПЗЗ матрицями є зашумленим. З метою дослідження впливу шуму на величину похибки створені зображення зашумлювались Гаусовим шумом з розсіюванням рівним 4, що, згідно [51], є типовим для більшості ПЗЗ матриць.

За допомогою програмного забезпечення приладу було отримано координати точок контурів обертових крапель і з використанням відомих координат точок контурів, за якими виготовлювали зображення, було розраховано абсолютні похибки Δx визначення координат x точок контуру обертових крапель. З метою усунення зсуву точок контурів крапель вздовж осі Z в програмному забезпеченні, яке обробляло створені зображення обертових крапель, задавали точні координати омбілічної точки. Залежності середніх значень абсолютних похибок Δx_p визначення координат точок від середнього квадратичного відхилення розсіювання функції Гауса σ_G приведено на рис. 4.2. Щоб знайти похибку Δx_p , яка відповідає експериментальним зображенням, які отримують шляхом фотографування обертової краплі в трубці з рідинами, було порівняно зміну яскравості експериментальних зображень обертової краплі зі створеними зображеннями різної чіткості (рис. 4.3). Як видно з рис. 4.3 чіткість експериментальних зображень обертової краплі відповідає створеним зображенням, які фільтровані оператором Гауса з середнім квадратичним розсіюванням $\sigma_G=31$. Для таких зображень абсолютна похибка визначення

координат точок контуру обертової краплі рівна $\Delta x_p = \pm 0,18$ пікселя.

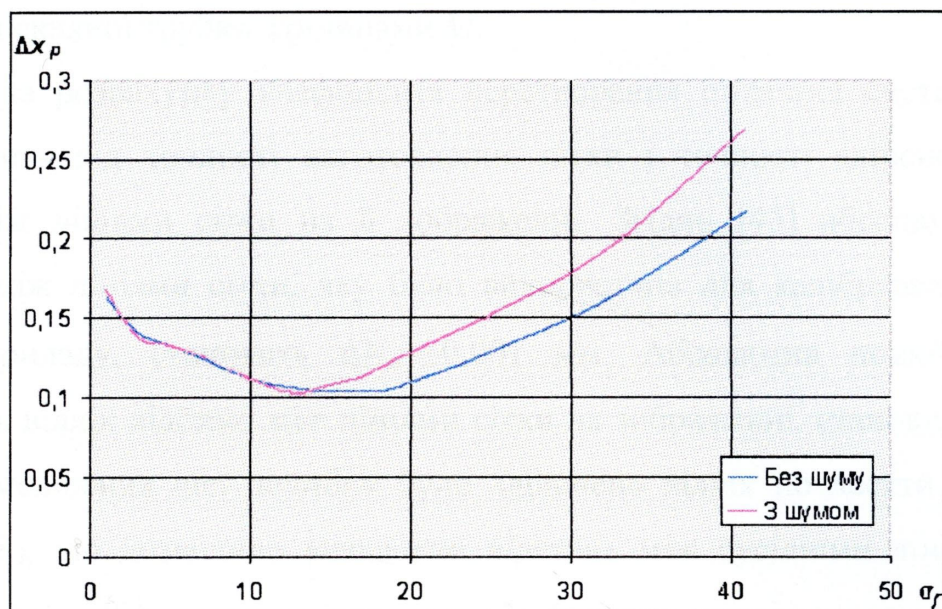


Рис. 4.2 Залежності абсолютних похибок Δx_p визначення координат точок від середнього квадратичного відхилення розсіювання функції Гауса σ_G

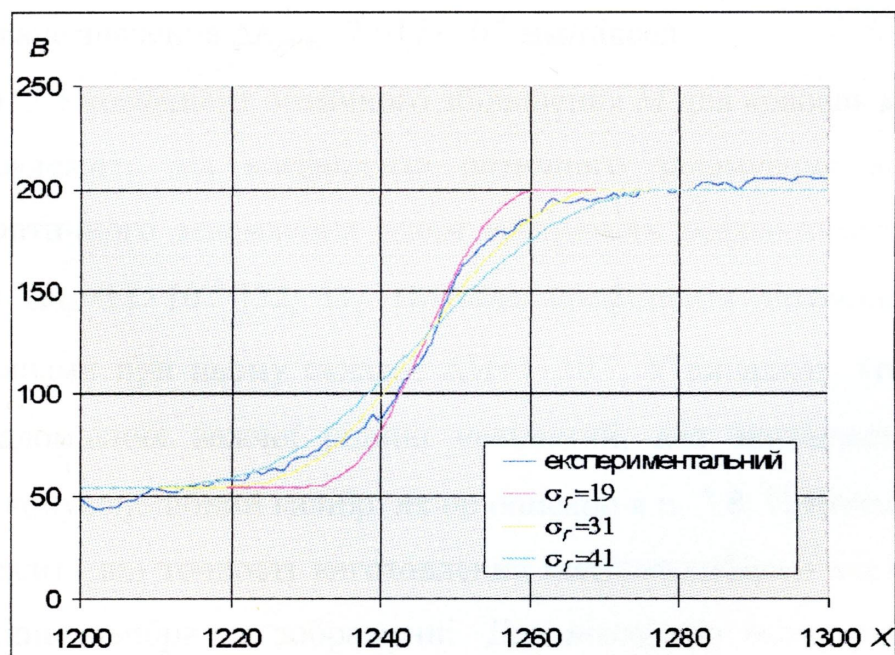


Рис. 4.3. Зміна яскравості на межі контуру обертової краплі експериментального і тестових зображень різної чіткості

На точність визначення дійсних координат точок експериментального

контуру обертової краплі, згідно виразу (3.15), мають вплив похибки, з якими знаходять коефіцієнт перетворення оптичної системи K_{opt} і коефіцієнт оптичного збільшення скляної трубки з рідинами M .

Похибка розрахунку коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу K_{opt} залежить від точності виготовлення сітки і точності здійснення відліку відстані між лініями сітки на її зображенні. Згідно [45] абсолютна похибка відстаней між лініями сітки, яку було використано для калібрування оптичної системи приладу, становить $\Delta N_k = \pm 0,001$ мм. Абсолютна похибка, з якою здійснюють відлік відстані між лініями сітки на зображенні, становить 1 піксель. З метою зменшення цієї похибки було здійснено відлік по десяти лініях сітки (див. п. 3.8), що дозволило визначити відстань між сусідніми лініями сітки з похибкою $\Delta N_s = \pm 0,1$ пікселя. З виразу (3.14) отримуємо наступний вираз для розрахунку ΔK_{opt} :

$$\Delta K_{opt} = \frac{\Delta N_k}{N_s} + \frac{N_k \Delta N_s}{N_s^2}. \quad (4.1)$$

Розраховане значення $\Delta K_{opt} = 7,617 \cdot 10^{-6}$ мм/піксел.

Згідно п. 2.5 коефіцієнт оптичного збільшення M для крапель малих розмірів основному залежить від коефіцієнта оптичного заломлення важчої рідини. Коефіцієнт оптичного заломлення рідин вимірюють рефрактометрами, похибка яких складає $\Delta n_p = \pm 1 \cdot 10^{-4}$ [52, 53]. Похибка коефіцієнта оптичного збільшення трубки з рідинами при цьому складає $\Delta M = 1 \cdot 10^{-4}$. У випадках, коли коефіцієнт оптичного заломлення важчої рідини невідомий, для знаходження M можна використати конусоподібний калібр, як це описано в п. 3.8. Похибка ΔM в такому випадку залежить від точності виготовлення конусоподібного калібру і похибки відліку розмірів калібру на зображенні. Для контролю геометричних розмірів конусоподібного калібру можна використати вимірювальний мікроскопом типу ІМЦЛ, який має похибку вимірювання лінійних розмірів $\Delta x_\theta = \pm 0,003$ мм [54]. Відлік розмірів конусоподібного калібру на зображенні здійснюють методом субпіксельного визначення координат розробленим програмним забезпеченням, з

похибкою $\Delta x_p = \pm 0,18$ пікселя. Вираз для розрахунку ΔM є наступним:

$$\Delta M = \frac{x_p \Delta K_{onm} + K_{onm} \Delta x_p}{x_\partial} + \frac{x_p K_{onm} \Delta x_\partial}{x_\partial^2}, \quad (4.2)$$

де x_p – радіус конусоподібної частини калібра в певному січенні, відрхований на його зображенні;

x_∂ – дійсний радіус конусоподібної частини калібра у відповідному січенні.

Згідно (4.2) ΔM залежить також від розмірів частини калібра в певному січенні, для якого визначають M . Графічна залежність ΔM від радіуса конусоподібного калібра приведена на рис. 4.4. Як видно з рис. 4.4 похибка ΔM при визначенні M є суттєво більшою, ніж при визначенні M за допомогою залежностей, які приведені в п. 2.5. Таким чином M , визначене з використанням конусоподібного калібра, можна використовувати у тих випадках, якщо інформативні точки контуру обертової краплі мають радіус, більший за половину внутрішнього радіуса скляної трубки.

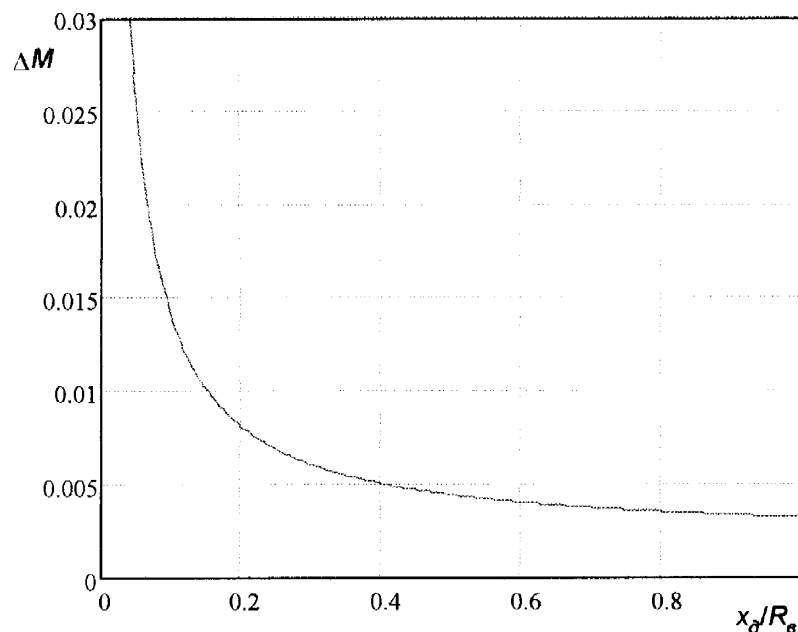


Рис. 4.4. Залежність похибки ΔM від радіуса конусоподібного калібра у різних січеннях

Сумарне значення похибки визначення координат точок експериментального контуру обертової краплі визначають згідно виразу:

$$\Delta x_e = \frac{K_{ont} \Delta x_p}{M} + \frac{x_p \Delta K_{ont}}{M} + \frac{x_p K_{ont} \Delta M}{M^2}. \quad (4.3)$$

Для вказаних вище значень M , K_{ont} , Δx_p , ΔM , ΔK_{ont} і точок контуру обертової краплі, з радіусами до $0,5R_e$, похибка Δx_e не перевищує $\pm 0,004$ мм (рис. 4.5).

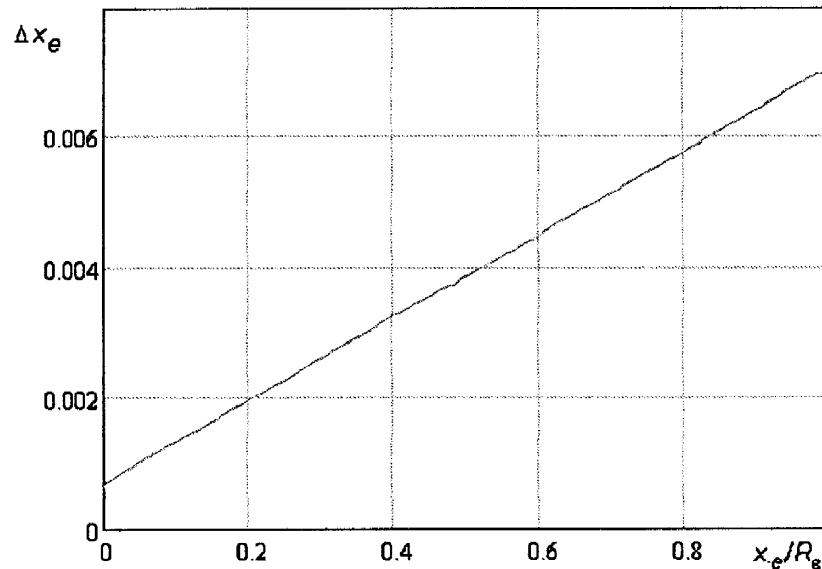


Рис. 4.5. Залежність похибки визначення дійсного радіусу точок контуру обертової краплі від її розмірів

Інструментальну складову сумарної похибки визначення ДМН σ_{inst} визначають за формулою:

$$\Delta \sigma_{inst} = \omega^2 \left(\frac{x_e}{x_c} \right)^3 \Delta(\Delta \rho) + 2\omega \Delta \rho \left(\frac{x_e}{x_c} \right)^3 \Delta \omega + 3\Delta \rho \omega^2 \frac{x_e^2}{x_c^3} \Delta x_e. \quad (4.4)$$

Максимальне значення похибки σ_{inst} складає $\Delta \sigma = 0,157$ мН/м.

Слід зазначити, що на точність визначення координат точок контуру обертової краплі мають вплив випадкові похибки, обумовлені спотворенням видимого контуру обертової краплі через налипання на її контур бульбашок повітря, а також налипання на внутрішній стінці скляної трубки дрібних крапель

легшої рідини, що змінює хід променів світла через трубку з рідинами і потворює видимий контур обертової краплі. Відхилення значень МН через дію вище перелічених факторів у проведених дослідах склало $5 \div 10\%$ від отриманого результату, що є досить суттєвим. Для зменшення впливу цих випадкових похибок необхідно перед наступним дослідом ретельно промивати скляну трубку від залишків рідин, акуратно заповнювати трубку досліджуваними рідинами так, щоб не утворювались бульбашки повітря на контурі обертової краплі і дрібні краплі на внутрішніх стінках трубки.

4.2 Аналіз методичних похибок приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин

На точність визначення ДМН розчинів ПАР впливає точність, з якою будуть обчислено параметри подібного до експериментального контуру теоретичного контуру обертової краплі. Для точок експериментального і теоретичного контурів обертових крапель, з допомогою яких визначають ДМН згідно залежності (2.18), рівняння (2.24) і (2.25) можна переписати так:

$$\dot{z}_{eN} = \frac{z_{eN}}{Z_e} = \dot{z}_{cT} = \frac{z_{cT}}{Z_c} = 1. \quad (4.5)$$

Тоді вирази (2.24) ÷ (2.27) спрощуються до вигляду:

$$R = \left| \frac{x_{eN}}{z_{eN}} - \frac{x_{cT}}{z_{cT}} \right|. \quad (4.6)$$

Нехай відхилення R викликане похибкою Δx_c , яка виникла внаслідок неточності розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі регресійним методом. В такому випадку для останніх точок експериментального і теоретичного контурів обертових крапель можна записати, що

$$\frac{x_{eN}}{z_{eN}} - \frac{x_{cT} + \Delta x_{cT}}{z_{cT}} = 0. \quad (4.7)$$

Враховуючи (4.6) (4.7) буде таким:

$$\Delta x_{cT} = R \cdot z_{cT}. \quad (4.8)$$

В процесі здійснення розрахунків подібних теоретичних контурів обертових крапель було встановлено, що середнє значення величини R не перевищує значення $\bar{R}=2\cdot 10^{-5}$. Для теоретичних контурів обертових крапель, які розраховують при обчисленні МН розробленими методами $z_{cT}<15$ (рис. 2.4). З врахуванням (4.8) $\Delta x_{cT}=3\cdot 10^{-4}$.

В процесі обчислень на ПЕОМ виникають похибки заокруглення. Виникнення цих похибок пов'язано з тим, що на зберігання мантиси числа виділяється певний об'єм пам'яті. Якщо в результаті арифметичної операції отримують результат, в якому кількість значимих цифр є більшою за кількість цифр, яку може вмістити мантиса, тоді відбувається заокруглення результату обчислень. В процесі виконання наступних арифметичних похибки заокруглення накопичуються. В розробленій програмі для обчислення контурів крапель використовують тип з фіксованою крапкою Real, розмір мантиси якого складає 16 цифр. Таким чином 16-та значуща цифра буде заокруглюватись під час обчислень. Абсолютна похибка ΔE заокруглення в такому випадку буде такою:

$$\Delta E = 10^{P-14}, \quad (4.9)$$

де P — порядок числа.

Абсолютна похибка заокруглення на одному кроці є досить малою, але при значних об'ємах обчислень, які здійснюються для розрахунку контуру обертової краплі, відбувається накопичення похибок заокруглення. Таким чином, сумарне значення похибки заокруглення може бути суттєвим. Похибки заокруглення ($\Delta\varphi_{ci}$, Δx_{ci} , Δz_{ci} , ΔV_{ci} , ΔS_{ci}) при розрахунку відповідних параметрів обертової краплі на одному кроці інтегрування обчислюють за наступними виразами [27]:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i = \Delta K_c - \frac{\Delta \sin \varphi}{x_c} + \frac{\sin \varphi \cdot \Delta x_c}{x_c} - x_c \cdot \Delta x_c, \\ \Delta x_{ci} = \cos \varphi \cdot \Delta \cos \varphi + h \cdot \Delta h, \\ \Delta z_{ci} = \sin \varphi \cdot \Delta \sin \varphi + h \cdot \Delta h, \\ \Delta V_{ci} = (\pi \cdot \Delta \pi + 2x_c \cdot \Delta x_c + \sin \varphi \cdot \Delta \sin \varphi) \cdot V_c + h \cdot \Delta h, \\ \Delta S_{ci} = (\pi \cdot \Delta \pi + x_c \cdot \Delta x_c) \cdot S_c + h \cdot \Delta h. \end{cases} \quad (4.10)$$

де Δx_c , ΔK_c , Δh , $\Delta \pi$ — безрозмірні абсолютні похибки заокруглення відповідних параметрів контуру обертової краплі, кроку інтегрування h і числа π ;

$\Delta \cos \varphi$, $\Delta \sin \varphi$ — безрозмірні абсолютні похибки заокруглення при обчисленні косинуса і синуса φ .

Сумарні значення похибок заокруглення знаходять як суму значень похибок на кроці. При меншому кроці інтегрування кількість кроків зростає, зростають сумарні значення похибки заокруглення, а значення похибки обмеження зменшується. Таким чином, вибравши оптимальне значення кроку інтегрування, можна досягнути мінімального значення похибки інтегрування системи рівнянь (1.9).

Значення числа π зараз відомо з досить високою точністю. У розробленому програмному забезпеченні число π задане у форматі типу Real і представлено тільки 15-ма значущими цифрами. Тому в (4.10) присутній добуток $\pi \cdot \Delta \pi$, який враховує похибку заокруглення числа π . Вказаний добуток є постійним в процесі числового інтегрування системи (1.9), тому представлений як константа, значення якої рівне $\pi \cdot \Delta \pi = 1,01739304493778 \cdot 10^{-14}$.

В таблицях 4.1 ÷ 4.4 наведені значення похибок обмеження і заокруглення при обчисленні контуру обертової краплі методами інтегрування з постійним кроком з корекцією на кроці з метою порівняння отримуваних результатів. Значення похибок були отримані для фіксованих крапель з кривизною в омбілічній точці $K_c = 1,85$, що є середнім значенням кривизни для розрахунку поверхонь обертових крапель в розробленому методі визначення ДМН розчинів ПАР фіксованої обертової краплі. Метод Рунге-Кутта з постійним кроком інтегрування не вимагає обов'язкового обчислення похибки обмеження за виразом (2.3), але обчислення цієї похибки здійснювали з метою порівняння її значення в методі з корекцією на кроці.

Як видно із табл. 4.1 і 4.2 при зменшенні кроку інтегрування сумарні значення похибок обмеження зменшуються досить швидко, а похибка заокруглення зростає повільніше. При певних значеннях кроку інтегрування

досягається рівність цих похибок. Але така рівність досягається для різних параметрів при різних кроках інтегрування. Так для кута φ рівність похибок отримують при значеннях кроку інтегрування $h \leq 0,0008$; координат x_c : $h \leq 0,002$; z_c : $h \leq 5 \cdot 10^{-5}$; об'єму V_c і площі S_c : $h \leq 0,02$. Сумарні значення похибок обмеження починають зростати, коли значення цих похибок є меншими за сумарні похибки заокруглення. Це пояснюється накопиченням похибок обмеження подібно до накопичення похибок заокруглення.

Таблиця 4.1

Значення похибок обмеження при числовому інтегруванні системи рівнянь (1.9) для $K_c=1,85$ з постійним кроком інтегрування

Крок інтегрування	Кількість кроків	E_φ	E_x	E_z	E_s	E_v
$5,00 \cdot 10^{-5}$	98760	$4,25 \cdot 10^{-12}$	$6,08 \cdot 10^{-12}$	$3,15 \cdot 10^{-10}$	$7,28 \cdot 10^{-11}$	$3,96 \cdot 10^{-11}$
0,0001	49380	$2,16 \cdot 10^{-12}$	$3,02 \cdot 10^{-12}$	$1,24 \cdot 10^{-9}$	$3,66 \cdot 10^{-11}$	$1,96 \cdot 10^{-11}$
0,0002	24690	$1,39 \cdot 10^{-12}$	$1,54 \cdot 10^{-12}$	$4,94 \cdot 10^{-9}$	$1,77 \cdot 10^{-11}$	$1,01 \cdot 10^{-11}$
0,0005	9876	$5,92 \cdot 10^{-12}$	$5,93 \cdot 10^{-13}$	$3,08 \cdot 10^{-8}$	$6,83 \cdot 10^{-12}$	$3,94 \cdot 10^{-12}$
0,0008	6173	$2,28 \cdot 10^{-11}$	$3,77 \cdot 10^{-13}$	$7,89 \cdot 10^{-8}$	$4,58 \cdot 10^{-12}$	$2,79 \cdot 10^{-12}$
0,001	4938	$4,42 \cdot 10^{-11}$	$3,15 \cdot 10^{-13}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-12}$	$2,52 \cdot 10^{-12}$
0,002	2469	$3,52 \cdot 10^{-10}$	$5,62 \cdot 10^{-13}$	$4,93 \cdot 10^{-7}$	$5,72 \cdot 10^{-12}$	$1,29 \cdot 10^{-11}$
0,005	988	$5,52 \cdot 10^{-9}$	$2,27 \cdot 10^{-11}$	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-10}$	$4,94 \cdot 10^{-10}$
0,01	494	$4,43 \cdot 10^{-8}$	$3,62 \cdot 10^{-10}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-9}$	$7,84 \cdot 10^{-9}$
0,02	247	$3,57 \cdot 10^{-7}$	$5,75 \cdot 10^{-9}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$	$4,65 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$
0,05	99	$5,70 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-7}$	0,000308	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^{-6}$
0,1	50	$4,72 \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-6}$	0,00123	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$7,38 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 4.2

Значення похибок заокруглення при числовому інтегруванні системи рівнянь (1.9) для $K_c=1,85$ з постійним кроком інтегрування

Крок інтегрування	Кількість кроків	Δ_φ	Δ_x	Δ_z	Δ_s	Δ_v
1	2	3	4	5	6	7
$5,00 \cdot 10^{-5}$	98760	$2,25 \cdot 10^{-10}$	$5,44 \cdot 10^{-11}$	$7,37 \cdot 10^{-11}$	$1,48 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
0,0001	49380	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$2,72 \cdot 10^{-11}$	$3,68 \cdot 10^{-11}$	$7,40 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
0,0002	24690	$5,63 \cdot 10^{-11}$	$1,36 \cdot 10^{-11}$	$1,84 \cdot 10^{-11}$	$3,70 \cdot 10^{-9}$	$5,08 \cdot 10^{-9}$
0,0005	9876	$2,25 \cdot 10^{-11}$	$5,44 \cdot 10^{-12}$	$7,37 \cdot 10^{-12}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$2,03 \cdot 10^{-9}$

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
0,0008	6173	$1,41 \cdot 10^{-11}$	$3,40 \cdot 10^{-12}$	$4,60 \cdot 10^{-12}$	$9,25 \cdot 10^{-10}$	$1,27 \cdot 10^{-9}$
0,001	4938	$1,13 \cdot 10^{-11}$	$2,72 \cdot 10^{-12}$	$3,68 \cdot 10^{-12}$	$7,40 \cdot 10^{-10}$	$1,02 \cdot 10^{-9}$
0,002	2469	$5,65 \cdot 10^{-12}$	$1,36 \cdot 10^{-12}$	$1,84 \cdot 10^{-12}$	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$5,08 \cdot 10^{-10}$
0,005	988	$2,28 \cdot 10^{-12}$	$5,45 \cdot 10^{-13}$	$7,37 \cdot 10^{-13}$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	$2,03 \cdot 10^{-10}$
0,01	494	$1,15 \cdot 10^{-12}$	$2,72 \cdot 10^{-13}$	$3,68 \cdot 10^{-13}$	$7,43 \cdot 10^{-11}$	$1,02 \cdot 10^{-10}$
0,02	247	$5,88 \cdot 10^{-13}$	$1,37 \cdot 10^{-13}$	$1,85 \cdot 10^{-13}$	$3,73 \cdot 10^{-11}$	$5,09 \cdot 10^{-11}$
0,05	99	$2,51 \cdot 10^{-13}$	$5,51 \cdot 10^{-14}$	$7,42 \cdot 10^{-14}$	$1,52 \cdot 10^{-11}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$
0,1	50	$1,44 \cdot 10^{-13}$	$2,83 \cdot 10^{-14}$	$3,73 \cdot 10^{-14}$	$7,94 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$

Таблиця 4.3

Значення похибок обмеження при числовому інтегруванні системи рівнянь (1.9)

для $K_c=1,85$ зі змінним кроком інтегрування

Діапазон значення похибки на кроці		Кількість точок	E_φ	E_X	E_Z	E_S	E_V
Нижня межа	Верхня межа						
$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	81	$3,58 \cdot 10^{-07}$	$4,61 \cdot 10^{-07}$	$1,95 \cdot 10^{-07}$	$8,75 \cdot 10^{-07}$	$2,57 \cdot 10^{-06}$
$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	124	$6,58 \cdot 10^{-08}$	$8,08 \cdot 10^{-08}$	$3,85 \cdot 10^{-08}$	$1,62 \cdot 10^{-07}$	$4,50 \cdot 10^{-07}$
$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$	202	$8,87 \cdot 10^{-09}$	$1,16 \cdot 10^{-08}$	$4,27 \cdot 10^{-09}$	$2,19 \cdot 10^{-08}$	$6,59 \cdot 10^{-08}$
$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-11}$	315	$1,55 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-09}$	$7,14 \cdot 10^{-10}$	$3,90 \cdot 10^{-09}$	$1,09 \cdot 10^{-08}$
$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-12}$	532	$1,84 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-10}$	$8,93 \cdot 10^{-11}$	$4,62 \cdot 10^{-10}$	$1,39 \cdot 10^{-09}$
$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	829	$3,19 \cdot 10^{-11}$	$4,63 \cdot 10^{-11}$	$1,62 \cdot 10^{-11}$	$7,77 \cdot 10^{-11}$	$2,27 \cdot 10^{-10}$
$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-14}$	1226	$6,69 \cdot 10^{-12}$	$8,43 \cdot 10^{-12}$	$2,87 \cdot 10^{-12}$	$1,75 \cdot 10^{-11}$	$4,81 \cdot 10^{-11}$
$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-15}$	1970	$9,26 \cdot 10^{-13}$	$1,43 \cdot 10^{-12}$	$4,69 \cdot 10^{-13}$	$2,98 \cdot 10^{-12}$	$7,39 \cdot 10^{-12}$

Найменше значення похибок обчислення параметрів краплі досягають при рівності сумарних значень похибок обмеження і заокруглення. Таку умову для різних параметрів досягають при різних кроках інтегрування. Зважаючи на залежність значень похибок обмеження і заокруглення від кроку інтегрування (табл. 4.1 і 4.2) доцільніше вибирати найменш можливий крок інтегрування h . Слід відмітити, що зменшення кроку інтегрування призводить до зростання об'ємів обчислень і відповідно до зростання часу розрахунку контуру краплі. Виходячи з цього, крок інтегрування необхідно вибирати таким, щоб отримати значення сумарних похибок обмеження і заокруглення приблизно рівними при

необхідній швидкодії. Як видно із отриманих результатів для розрахунку контуру краплі методом з фіксованим кроком оптимальним є значення кроку інтегрування $h \approx 0,001$, при якому досягається рівність похибок обмеження і заокруглення по більшості параметрів.

Таблиця 4.4

Значення похибок заокруглення при числовому інтегруванні системи рівнянь (1.9)

для $K_c=1,85$ зі змінним кроком інтегрування

Діапазон значення похибки обмеження на кроці		Кількість точок	Δ_ϕ	Δ_x	Δ_z	Δ_s	Δ_V
Нижня межа	Верхня межа						
1	2	3	4	5	6	7	8
$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	77	$2,58 \cdot 10^{-13}$	$4,72 \cdot 10^{-14}$	$5,88 \cdot 10^{-14}$	$1,42 \cdot 10^{-11}$	$1,79 \cdot 10^{-11}$
$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	128	$3,74 \cdot 10^{-13}$	$7,16 \cdot 10^{-14}$	$9,07 \cdot 10^{-14}$	$2,18 \cdot 10^{-11}$	$2,81 \cdot 10^{-11}$
$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$	203	$5,94 \cdot 10^{-13}$	$1,16 \cdot 10^{-13}$	$1,47 \cdot 10^{-13}$	$3,47 \cdot 10^{-11}$	$4,45 \cdot 10^{-11}$
$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-11}$	314	$9,17 \cdot 10^{-13}$	$1,81 \cdot 10^{-13}$	$2,29 \cdot 10^{-13}$	$5,49 \cdot 10^{-11}$	$7,13 \cdot 10^{-11}$
$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-12}$	480	$1,48 \cdot 10^{-12}$	$3,04 \cdot 10^{-13}$	$3,89 \cdot 10^{-13}$	$8,86 \cdot 10^{-11}$	$1,15 \cdot 10^{-10}$
$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	752	$2,25 \cdot 10^{-12}$	$4,71 \cdot 10^{-13}$	$6,10 \cdot 10^{-13}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$	$1,80 \cdot 10^{-10}$
$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-14}$	1313	$3,50 \cdot 10^{-12}$	$7,06 \cdot 10^{-13}$	$8,89 \cdot 10^{-13}$	$2,14 \cdot 10^{-10}$	$2,80 \cdot 10^{-10}$
$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-15}$	1888	$5,43 \cdot 10^{-12}$	$1,13 \cdot 10^{-12}$	$1,43 \cdot 10^{-12}$	$3,22 \cdot 10^{-10}$	$4,17 \cdot 10^{-10}$

При розрахунку параметрів краплі числовим методом із корекцією на кроці параметром, який визначає значення похибок і необхідний об'єм обчислень, є діапазон значення похибки обмеження на кроці. Як видно із табл. 4.3 і 4.4 рівність похибок обмеження і заокруглення також досягають для різних параметрів при різних діапазонах значення похибки обмеження на кроці. Діапазон значення похибки обмеження на кроці $10^{-13} \div 10^{-14}$ є найбільш оптимальним для розрахунку контуру краплі. Процес розрахунку числовим методом із корекцією на кроці оптимізується таким чином, що отримують менші значення похибок. В цьому неважко переконатись, порівнюючи попарно табл. 4.1 і 4.3 і табл. 4.2 і 4.4. Як видно із табл. 4.1 і 4.3 подібні значення похибок обмеження в числовому методі із постійним кроком інтегрування до похибок обмеження в числовому методі із

корекцією на кроці досягають при кроці інтегрування $h \approx 0,0002$. Кількість кроків інтегрування для обчислення системи рівнянь (1.9) склала 25000 проти 1900. Подібні значення похибок заокруглення (табл. 4.2 і 4.4) досягають при кількості кроків 2500 проти 1900. Як видно із отриманих результатів, числовий метод із корекцією на кроці дає значний вигравш в точності і об'ємі обчислень контуру краплі порівняно з числовим методом із постійним кроком.

На рис. 4.6 показана залежність сумарних похибок обмеження і заокруглення від кривизни K_c в омбілічній точці. Розрахунок контурів здійснювали числовим методом із корекцією на кроці, діапазон значення похибки обмеження на кроці задавали $10^{-13} \div 10^{-14}$. При цьому похибки обмеження і заокруглення не перевищують значення $1 \cdot 10^{-9}$ в даному діапазоні кривизни K_c . Приведена зміна сумарних похибок обмеження пояснюється роботою алгоритму корекції на кроці. Робота цього алгоритму полягає в тому, що розраховують значення похибок обмеження на кроці по кожному параметру і для корекції використовують похибку обмеження, значення якої є найбільшим. В процесі розрахунку різних частин контуру обертової краплі похибки, по яких здійснюють корекцію є різними, але існує визначальна похибка обмеження, по якій здійснюють корекцію при розрахунку більшої частини контуру обертової краплі. Для контурів крапель, кривизна в омбілічній точці яких знаходиться в діапазоні $K_c = 1 \div 2,2$ визначальною є похибка E_V . В діапазоні $K_c = 2,2 \div 3$ такої явно вираженої похибки не існує, що видно із малої різниці між значеннями сумарних похибок обмеження. При значенні кривизни $K_c = 3/\sqrt[3]{4}$ значення похибок зростають тому, що в такому випадку отримують контур обертової краплі витягнутої форми і для обчислення такого контуру необхідно зробити більшу кількість кроків інтегрування.

Розроблена програма дозволяє розраховувати сумарне значення похибки обмеження, але похибка обмеження не дозволяє визначити методичну похибку розрахунку контуру обертової краплі. Згідно [27,28] обчислити методичну похибку числового інтегрування методами Рунге-Кутта не можливо, що є одним із їхніх недоліків. Отримані значення похибки обмеження можна використати для оцінки мінімального значення методичної похибки.

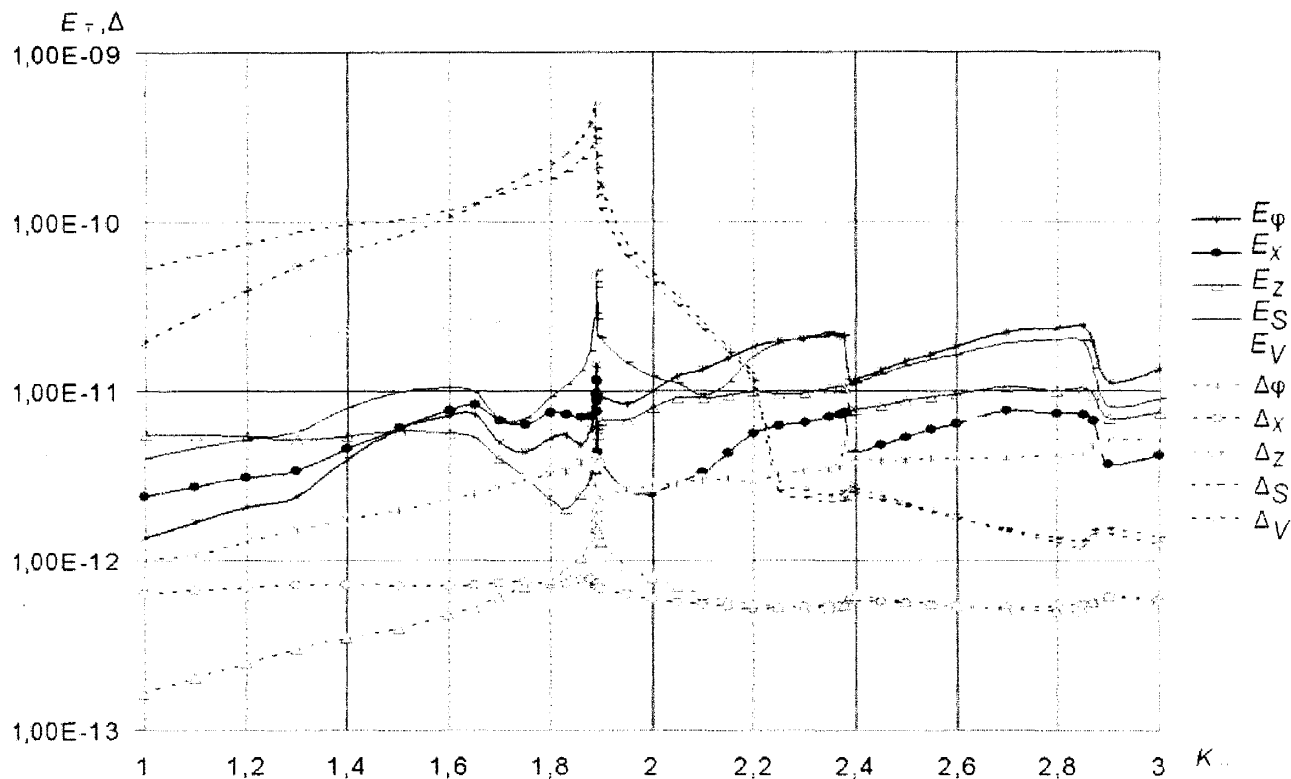


Рис. 4.6. Залежність сумарних похибок обмеження і заокруглення від кривизни в омбілічній точці

Методичну похибку розрахунку контуру обертової краплі можна було б визначити, порівнюючи отримані результати розрахунку з еталонними, але еталонні контури обертових крапель отримати на даний момент часу неможливо. Частковий випадок, що може бути використаний для оцінки методичної похибки — розрахунок контуру обертової краплі у формі кулі, як це пропонується в [55], так як параметри кулі легко відтворюються з досить високою точністю. Ці результати наведені в табл. 4.5. Обчислення проводились числовим інтегруванням з корекцією на кроці (діапазон значення похибки обмеження на кроці $10^{-13} \div 10^{-14}$). В дужках приведенні результати отримані за відомими формулами для обчислення координат точок, об'єму і площі поверхні кулі. Як видно із табл. 4.5 із збільшенням кривизни K_C точність обчислень зростає, що свідчить про більш точнішу відтворюваність контуру кулі згідно із обчисленнями за системою (1.9). При значенні кривизни $K_C=100$ отримали результат обчислення координат точок контуру кулі із методичною похибкою розрахунку координат контуру краплі

$\Delta J_x = \Delta J_y = 2 \cdot 10^{-8}$, а методичні похибки розрахунку об'єму V і площі S кулі відповідно склали $\Delta J_V = 1,5 \cdot 10^{-10}$, $\Delta J_S = 1,2 \cdot 10^{-8}$. Об'єм і площа кулі обчислювались з гіршою точністю, що пояснюється використанням в системі (1.9) наближених формул для обчислення цих параметрів. Значення похибок обмеження і заокруглення по параметрах склали: $E_x = 2,1 \cdot 10^{-13}$, $E_z = 6,9 \cdot 10^{-13}$, $E_S = 1,27 \cdot 10^{-14}$, $E_V = 1,38 \cdot 10^{-16}$, $\Delta_x = 2,7 \cdot 10^{-13}$, $\Delta_z = 5,39 \cdot 10^{-13}$, $\Delta_S = 1,22 \cdot 10^{-16}$, $\Delta_V = 4,01 \cdot 10^{-16}$. Методична похибка в цьому випадку є більшою за значення похибок обмеження, але точність обчислення параметрів краплі є достатньою для використання у розроблених методах визначення ДМН розчинів ПАР.

Таблиця 4.5

Результати обчислень параметрів кулі розв'язуванням рівняння (1.9) числовим інтегруванням.

Кривизна змбілічній гощі K_c	Координати точки при $\varphi=90^\circ$		Об'єм кулі V_c	Площа поверхні кулі S_c
	x_c	z_c		
1	2	3	4	5
10	0,2002 (0,2)	0,2004 (0,2)	0,033645 (0,03351)	0,504 (0,50265)
20	0,100012 (0,1)	0,099983 (0,1)	0,0041908 (0,0041887)	0,125705 (0,1256637)
30	0,066669 (0,066666)	0,066671 (0,066666)	0,0012413 (0,0012442)	0,05585605 (0,0558505)
70	0,028571465 (0,028571428)	0,0285624 (0,028571428)	$9,76983 \cdot 10^{-5}$ ($9,76977 \cdot 10^{-5}$)	0,0102583 (0,01025826)
100	0,02000002 (0,02)	0,02000002 (0,02)	$3,351045 \cdot 10^{-5}$ ($3,35103 \cdot 10^{-5}$)	0,00502656 (0,005026548)

Таким чином, числовий метод із корекцією на кроці дає значний вииграш в точності і об'ємі обчислень контуру краплі порівняно з числовим методом із постійним кроком. Отримані результати обчислення похибок дають змогу їх враховувати в метрологічному аналізі розроблених методів визначення ДМН розчинів ПАР, які вимагають числового розв'язку системи рівнянь (1.9). Проведений аналіз похибок показав, що хоча значення похибок обмеження і

заокруглення не перевищують величини $2 \cdot 10^{-12}$, очікуване максимальне значення методичної похибки розрахунку параметрів теоретичного контуру обертової краплі становить $1 \cdot 10^{-7}$. Незважаючи на це, точність обчислення параметрів обертової краплі є достатньою для визначення ДМН розчинів ПАР розробленими методами.

Враховуючи похибки розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі і методики розрахунку координат точок теоретичного контуру обертової краплі, сумарна похибка методики розрахунку координат точок подібного теоретичного контуру $\Delta x_c = 3 \cdot 10^{-4}$. Значення методичної складової абсолютної похибки визначення МН $\Delta \sigma_{мет}$ розраховують згідно виразу:

$$\Delta \sigma_{мет} = 3 \Delta \rho \omega^2 \frac{x_e^3}{x_c^4} \Delta x_c. \quad (4.11)$$

Значення $\Delta \sigma_{мет} = 0,007$ мН/м.

Максимальне значення абсолютної похибки визначення ДМН розчинів ПАР складає $\Delta \sigma = 0,164$ мН/м, а відповідне йому максимальне значення сумарної похибки приладу ВМН-2 приведеної до діапазону визначення ДМН розчинів ПАР (0,01÷15 мН/м) становить $\gamma_\sigma = 1,1\%$.

4.3 Розроблення методики повірки приладу для дослідження міжфазного натягу рідин

Для визначення похибки визначення ДМН розробленим приладом ВМН-2 необхідно мати зразкові рідини, значення ДМН яких відоме з достатньою точністю, однак відсутні рідини, які при певних умовах можуть відтворювати свої фізико-хімічні властивості з точністю, достатньою для проведення повірки розробленого приладу. В роботі [24] пропонується використовувати калібр, який має форму і розміри обертової краплі, визначені для певних значень МН, різниці густин рідин і частоти обертання трубки із досліджуваними рідинами. Подібний калібр дозволяє здійснювати повірку приладу шляхом поміщення його в трубку з важчою рідиною, що дозволяє врахувати усі фактори, які впливають на похибку

вимірювання. Виготовити такий калібр необхідно з відхиленнями його відповідних розмірів в діапазоні $0 \div 2$ мм не більше $0,001$ мм, що досить важко забезпечити через відсутність відповідного обладнання.

Пропонується виготовляти калібри, які можуть бути використані для перевірки приладу шляхом нанесення зображення обертової краплі на прозору плівку (рис. 4.7). В подальшому таке зразкове зображення обертової краплі на плівці можна помістити в прилад і обробляти як отримане під час експерименту зображення обертової краплі. Отримати зразкове зображення обертової краплі можна шляхом розрахунку її розмірного контуру за допомогою рівнянь (1.9)–(1.11) і також з врахуванням коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з рідинами, який можна розрахувати, так як це описано в п. 2.5. На саме зображення наноситься інформація про значення МН, різниці густин рідин і значення частоти обертання трубки, для яких розрахований розмірний контур обертової краплі. Запропоновані зразкові зображення дозволяють перевірити тільки оптичну систему приладу і програмне забезпечення, які використовують в приладі для визначення ДМН. Похибку вимірювання частоти обертання трубки з рідинами електронним блоком приладу ВМН-2 визначають окремо шляхом порівняння показів приладу і еталонного частотоміра.

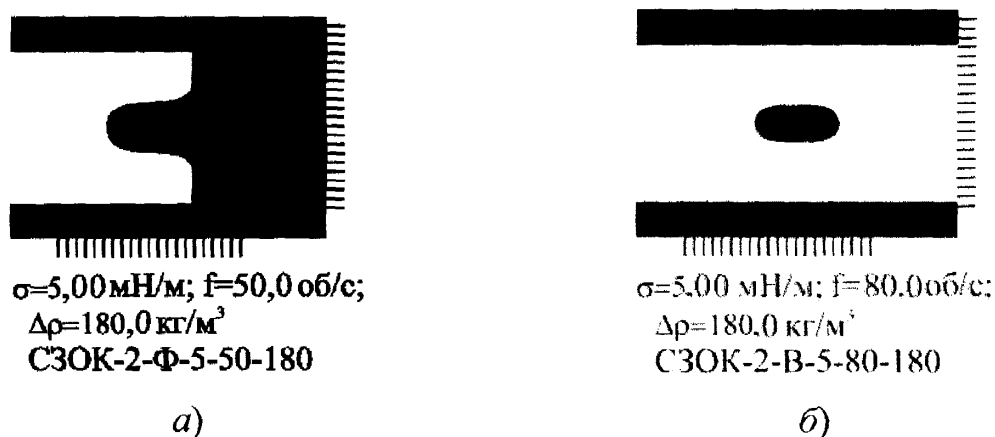


Рис. 4.7. Зразкові зображення обертових крапель

Виготовлені зразки обертових крапель повинні пройти метрологічну ієстацію, під час якої контролюють координати точок профілю обертової краплі

на зображенні. Для цього можна створити відповідні таблиці, в яких буде міститись інформація про координати точок профілю обертової краплі на зображенні. Шляхом визначення координат точок профілю краплі на зображенні за допомогою вимірювального мікроскопу і порівняння їх із значеннями у таблиці можна визначити похибку виготовлення такого зображення. Вказана процедура є достатньо трудомісткою тому, що необхідно контролювати від 50 до 400 точок контуру обертової краплі з відповідним обробленням результатів вимірювань. Пропонується наносити на такі зразкові зображення обертових крапель лінійки з відомою відстанню між її лініями, яку легко можна проконтролювати вимірювальним мікроскопом.

Процес повірки приладу за допомогою зразкових зображень відбувається наступним чином.

Спочатку визначають похибку вимірювання частоти обертання трубки електронним блоком. Для цього до входу електронного блоку підключають генератор змінної напруги, частоту якої можна задавати з необхідною точністю, а також еталонний частотомір.

На похибку визначення ДМН розчинів ПАР має значний вплив похибка визначення координат точок контуру обертової краплі, на яку впливають похибки калібрування оптичної системи приладу. Калібрують оптичну систему за допомогою зразкової сітки так, як це описано в п. 3.8. Тому під час проведення повірки приладу доцільно перевіряти значення коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу шляхом його визначення за допомогою зразкової сітки. В подальшому в прилад поміщують зразкове зображення обертової краплі, його фотографують і з отриманого зображення визначають МН.

Для визначення сумарної похибки приладу здійснюють багатократні вимірювання частоти і МН для кожного зразкового зображення обертової краплі. Отримані результати обробляють згідно із методики здійснення багатократних вимірювань, на основі чого отримують середнє квадратичні відхилення вимірювань частоти і МН. Розраховані середнє квадратичні відхилення сумують і на їх основі отримують сумарне значення середнього квадратичного відхилення

результату визначення МН, на основі якого і визначають сумарну похибку визначення МН.

Описані вище методики повірки зразкових зображень і приладу було використано для розроблення відповідних методик метрологічної атестації зразкових зображень і приладу, які наведені в додатках К і Л. Також було розроблено методику повірки приладу, яка приведена в паспорті на прилад, який наведений в додатку М.

Висновки до розділу

Згідно із проведеними дослідженнями та на основі поданого в четвертому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) здійснений аналіз інструментальних, методичних і сумарної похибок розробленого приладу. Зроблено аналіз факторів, які впливають на величину цих похибок. Показано, що вимірювання частоти обертання вала двигуна електричною схемою приладу забезпечується з похибкою $\Delta f=0,1$ об/с, похибка визначення координат точок експериментального контуру обертової краплі субпіксельним методом з врахуванням нечіткості зображення і шумів на ньому становить $\Delta x_p=0,18$ пікселя, похибка перетворення оптичної системи приладу при її калібруванні окулярною сіткою від мікроскопів МБС становить $\Delta K_{opt}=7,617 \cdot 10^{-6}$ мм/піксел. Показано, що при розрахунку коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки з важчою рідиною за допомогою отриманих залежностей забезпечується визначення вказаного коефіцієнта з точністю $\Delta M=1 \cdot 10^{-4}$, а при визначенні коефіцієнта оптичного збільшення за допомогою конусоподібного калібру ця похибка становить $\Delta M=0,03$. З врахуванням вище перерахованих похибок результуюча максимальна похибка визначення координат точок контуру обертової краплі становить $\Delta x=0,002$ мм., а максимальне значення інструментальної похибки не перевищує $\sigma_{inst}=0,157$ мН/м;

б) показано, що похибка розрахунку координат точок подібного до експериментального теоретичного контуру обертової краплі становить

$\Delta x_{ct} = 3 \cdot 10^{-4}$. Максимальне значення методичної похибки не перевищує $\sigma_{мет} = 0,007$ мН/м. Максимальне значення сумарної похибки приладу ВМН-2, приведеної до діапазону визначення ДМН розчинів ПАР становить $\gamma_{\sigma} = 1,1\%$;

в) розроблені методики атестації і повірки приладу ВМН-2, в яких використовують зразкові зображення вільної і фіксованої обертових крапель, на яких вказані розміри контурів цих крапель для різних значень ДМН і частот обертання трубки з рідинами. Зразкові зображення обертових крапель представлені на прозорій плівці, яку в процесі повірки приладу ВМН-2 встановлюють у прилад замість скляної трубки із досліджуваними рідинами. В подальшому за допомогою оптичної системи приладу і програмного забезпечення обробляють ці зображення, визначають МН і порівнюють його із даними, вказаними на зразкових зображеннях, на основі чого розраховують похибку визначення ДМН приладом ВМН-2.

РОЗДІЛ 5

ЛАБОРАТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

5.1 Розроблення методики проведення лабораторних випробувань

Метою лабораторних випробувань приладу ВМН-2 є експериментальна перевірка відповідності його параметрів заявленим характеристикам. Дослідження роботи приладу здійснюють шляхом перевірки пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна, пристрою регулювання і стабілізації частоти обертання вала двигуна, визначенням рівноважного і динамічного МН різних рідин і розчинів ПАР.

Перед перевіркою пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна до електронного блоку підключають механічний блок і персональний комп'ютер. Вмикають прилад і дають йому прогрітись впродовж 20 хв. Завантажують в пам'ять комп'ютера програмне забезпечення. Вмикають двигун приладу, змінюючи частоту обертання вала двигуна, переконуються в працездатності пристрою вимірювання частоти вала двигуна і освітлювача приладу. При регулюванні частоти обертання вала двигуна повинні змінюватись покази на табло приладу і у вікні програми. Якщо освітлювач приладу працює нормально, то видиме зображення патрона з трубкою у візирі фотоапарата не повинне змінюватись при зміні частоти обертання вала двигуна.

Для перевірки пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна до входу електронного блоку підключають електронний частотомір і генератор змінної напруги, частоту і величину якої можна змінювати. Визначають чутливість пристрою вимірювання частоти вала двигуна. Для цього встановлюють частоту генерованих коливань генератором 200 Гц, що відповідає частоті обертання вала двигуна 20 об/с. Плавню збільшуючи амплітуду сигналу на виході генератора від 0 В, визначають при якому рівні сигналу покази на табло

електронного блоку приладу стануть стабільними. Вимірюють напругу сигналу на виході генератора вольтметром змінної напруги. Отримане значення напруги сигналу на виході генератора відповідає чутливості пристрою вимірювання частоти вала двигуна. Перевіряють похибку вимірювання частоти приладом. Для цього на вхід приладу від генератора подають сигнал напругою 0,2 В і різної частоти в діапазоні від 100 до 2000 Гц. Для кожного значення частоти сигналу на виході генератора здійснюють вимірювання частоти приладом десять разів. Визначають середнє значення частоти за допомогою приладу і розраховують похибку вимірювання частоти згідно формули:

$$\Delta f = \pm \left(\frac{f_3}{10} - f_c \right), \quad (4.12)$$

де f_3 – значення частоти сигналу на виході генератора виміряне частотоміром,
 f_c – середнє значення частоти сигналу виміряне приладом.

Для усіх вимірювань Δf не повинне перевищувати $\pm 0,1$ Гц.

Перевіряють стабільність роботи двигуна приладу. Для цього вмикають двигун приладу і слідкують за зміною частоти його обертання в часі. Короткочасна (впродовж 60с) нестабільність частоти обертання вала двигуна не повинна перевищувати 0,1 об/с. Довгочасна (впродовж 30 хв.) нестабільність частоти обертання вала двигуна не повинна перевищувати 0,3 об/с.

Перевіряють діапазон зміни частоти обертання вала двигуна приладу. Для цього змінюють частоту обертання вала двигуна від мінімального до максимального значення частоти обертання, при яких забезпечується вказана стабільність частоти обертання вала двигуна в часі.

Аналіз отриманих результатів визначення рівноважного МН впродовж тривалого періоду часу дозволяє переконатись в стабільності показів приладу і також перевірити герметичність закривання трубки з рідинами за допомогою пробок. Для цього визначають МН двох рідин впродовж 30 хв. через кожні 2 хв. при різних частотах обертання трубки із рідинами

Для визначення ДМН використовують розчини ПАР різних концентрацій. Визначення ДМН здійснюють згідно із методами описаними в п. 3.6 і 3.7.

5.2 Аналіз результатів лабораторних випробувань

Перевірка пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна здійснювалась за допомогою генератора ГЗ-36А і частотоміра ЧЗ-33. Напругу сигналу на виході генератора вимірювали за допомогою мультиметра М58. Чутливість пристрою вимірювання частоти вала двигуна на частоті сигналу 200 Гц складає 52 мВ. Така чутливість пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна забезпечує стійкість електронного блоку до дії електромагнітних перешкод і дозволяє здійснювати повірку і атестацію приладу згідно розробленої методики, яка приведена в додатку Л. Результат перевірки пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна приладу наведений в табл. 5.1. Як видно із результатів випробувань електронним блоком приладу забезпечується необхідна точність вимірювання частоти.

Таблиця 5.1

Результати перевірки пристрою вимірювання частоти обертання вала двигуна

Зразкова частота, Гц	Середнє значення частоти, об/с	Абсолютна похибка вимірювання частоти, об/с
1	2	3
105,3	10,54	-0,01
201,1	20,12	-0,01
300,8	30,07	0,01
398,7	39,88	-0,01
503,6	50,36	0
598,2	59,81	0,01
707,2	70,72	0
804,7	80,49	-0,02
906,5	90,67	-0,02
1008,3	100,83	0
1206,8	120,68	0
1407,4	140,73	0,01

Продовження табл. 5.1

1	2	3
1603,9	160,39	0
1805,1	180,51	0
2002,7	200,28	-0,01

Перевірку стабільності роботи двигуна впродовж короткого часу роботи здійснювали впродовж 1 хв., вимірюючи його частоту через кожні 10 с (див. табл. 5.2), а стабільність обертання вала двигуна впродовж тривалого часу роботи здійснювали впродовж 30 хв., вимірюючи частоту обертання через кожні 2 хв. (табл. 5.3). Як видно із таблиць при частотах обертання вала двигуна від 20 до 100 об/с двигун працює найбільш стабільно. Короткочасні і довгочасні відхилення частоти обертання вала двигуна у приведеному діапазоні частот не перевищують 0,1 об/с, що дає змогу проводити визначення МН.

Таблиця 5.2

Зміна частоти обертання вала двигуна впродовж короткого часу роботи приладу

Час, с	Частота обертання вала двигуна, об/с					
	10	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6
20	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,5
30	20,6	41,3	58,8	82,3	103,6	121,5
40	20,7	41,3	58,8	82,4	103,5	121,4
50	20,6	41,2	58,8	82,4	103,6	121,6
60	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,5

При частотах обертання вала двигуна менших 20 об/с не забезпечується необхідна стабільність його обертання, що пов'язано із малою інерцією ротора двигуна на таких частотах і затримкою спрацювання схеми керування двигуном. При частотах обертання вала двигуна, вищих 120 об/с, на двигун від схеми керування двигуном подається максимальна напруга. При цьому регулятор

частоти обертання вала двигуна не може забезпечити необхідну зміну напруги на двигуні, що призводить до гіршої стабілізації частоти обертання вала двигуна. Зміна частоти обертання вала двигуна на частотах обертання нижче 20 об/с і вище 120 об/с призводить до порушення гіростатичної рівноваги обертання рідин в трубці, що збільшує похибку визначення МН рідин. Як видно із отриманих результатів, діапазон зміни частоти обертання вала двигуна, в якому можна визначати МН приладом, становить $20 \div 120$ об/с.

Таблиця 5.3

Зміна частоти обертання вала двигуна впродовж тривалого часу роботи приладу

Час, хв.	Частота обертання вала двигуна, об/с					
	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,6
2	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,6
4	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,5
6	20,7	41,3	58,8	82,4	103,5	121,5
8	20,7	41,3	58,8	82,3	103,6	121,6
10	20,6	41,2	58,7	82,4	103,5	121,4
12	20,7	41,3	58,8	82,4	103,6	121,5
14	20,6	41,2	58,8	82,4	103,6	121,5
16	20,6	41,3	58,8	82,4	103,5	121,4
18	20,5	41,3	58,7	82,3	103,6	121,5
20	20,6	41,2	58,7	82,3	103,5	121,5
22	20,6	41,2	58,8	82,4	103,6	121,4
24	20,6	41,3	58,8	82,4	103,5	121,4
26	20,6	41,3	58,7	82,3	103,6	121,4
28	20,5	41,2	58,7	82,4	103,5	121,4
30	20,5	41,2	58,8	82,3	103,5	121,4

Визначення рівноважного МН розробленими методами здійснювали на межі контакту фаз вода – нафта і вода – гас (табл. 5.4), а також розчинів ПАР на межі з нафтою після досягнення рівноважного МН. Для дослідження ДМН використовували розчини ПАР різних концентрацій: тіполу, жириноксу, савенолу

на межі контакту з нафтою з Куличихінського родовища №26. Із табл. 5.4 видно, що удосконаленим методом вільної і розробленими методом фіксованої обертових крапель отримані схожі результати визначення рівноважного МН з результатами, отриманими за допомогою приладу ВМН-1, що підтверджує можливість використання розроблених методів для визначення рівноважного МН рідин.

Таблиця 5.4

Результати визначення рівноважного МН різних рідин

Досліджувані рідини	Визначене значення рівноважного МН, мН/м		
	Метод Б. Воннегута	Метод вільної краплі	Метод фіксованої краплі
1	2	3	4
Нафта–вода	10,8	10,63	10,6
Гас–вода	9,12	9,051	9,045
Нафта – 0,01% розчин тіполу	4,63	4,52	4,49
Нафта – 0,02% розчин тіполу	4,12	4,09	4,06
Нафта – 0,05% розчин тіполу	3,15	3,10	3,06
Нафта – 0,1% розчин тіполу	2,32	2,26	2,31
Нафта – 0,2% розчин тіполу	1,46	1,51	1,58
Нафта – 0,5% розчин тіполу	0,95	0,960	0,957
Нафта – 1% розчин тіполу	0,65	0,714	0,71
Нафта – 5% розчин тіполу	0,48	0,515	0,52
Нафта – 0,01% розчин жириноксу	7,82	7,85	7,79
Нафта – 0,02% розчин жириноксу	7,19	7,12	7,25
Нафта – 0,05% розчин жириноксу	6,2	6,24	6,22
Нафта – 0,1% розчин жириноксу	5,28	5,32	5,25
Нафта – 0,2% розчин жириноксу	4,21	4,16	4,23
Нафта – 0,01% розчин савенолу	4,02	4,01	4,07

Продовження табл. 5.4

1	2	3	4
Нафта – 0,02% розчин савенолу	3,06	3,12	3,04
Нафта – 0,05% розчин савенолу	1,83	1,91	1,84
Нафта – 0,1% розчин савенолу	1,45	1,42	1,47
Нафта – 0,2% розчин савенолу	1,32	1,39	1,35
Нафта – 0,5% розчин савенолу	1,07	1,03	1,09
Нафта – 1% розчин савенолу	0,708	0,717	0,712
Нафта – 2% розчин савенолу	0,356	0,361	0,368
Нафта – 5% розчин савенолу	0,332	0,337	0,331

Для оцінки стабільності визначення МН здійснювалось визначення рівноважного МН на розділі фаз нафта-вода впродовж 30 хв. Аналізуючи отримані результати (рис. 5.1), видно, що зміна МН є випадковою. Випадкова зміну МН пояснюється випадковою похибкою визначення координат точок експериментального контуру обертової краплі, яка викликана електричними шумами в ПЗЗ матриці фотоапарата, вібраціями в приладі, дискретизацією зображення видимого зображення обертової краплі матрицею фотоапарата, випадковістю проходження процесу розрахунку подібного теоретичного контуру обертової краплі. Відносні відхилення результатів від середнього значення не перевищують похибку, вказану у розділі 4.

Визначене приладами значення МН може залежати від частоти обертання краплі, що пояснюють ефектом спливання вільної обертової краплі [37, 56]. Крім цього, для визначення МН методом фіксованої краплі використовують частину її контуру. В такому випадку визначене значення МН розробленим приладом ВМН-2 може залежати від частини краплі, яка була використана для його розрахунку. Для перевірки наявності таких залежностей було визначено МН на межі розділу фаз вода-нафта при різних частотах обертання краплі і використовуючи для розрахунку МН різний розмір частини фіксованої краплі. Результати дослідів наведені в табл. 5.5. Згідно із отриманими результатами при

використанні певної частини фіксованої обертової краплі визначене значення МН залежить від розміру частини експериментального контуру цієї краплі, з допомогою якої розраховують МН. Для частин фіксованої обертової краплі меншого розміру (менше 0,63 від загальної довжини краплі) отримують значно занижені значення МН. Таким чином, для розрахунку МН необхідно використовувати частину краплі довжиною, більшою за 0,63 від загальної довжини краплі. Як видно із табл. 5.5 існує залежність визначеного значення МН розробленим приладом ВМН-2 від частоти обертання рідин. Але вказана зміна МН не перевищує основної похибки приладу. Наявність цієї залежності пояснюється неточністю виготовлення деталей механічного блоку і двигуна (несиметричність деталей відносно осі обертання, що викликає вібрації в приладі; відхилення осі симетрії деталей від осі обертання, що викликає їх прецесійний рух), через які передається обертовий рух до досліджуваних рідин, а також відставання обертання краплі від обертання вала двигуна через спливання вільного кінця краплі легшої рідини на нижчих частотах обертання.

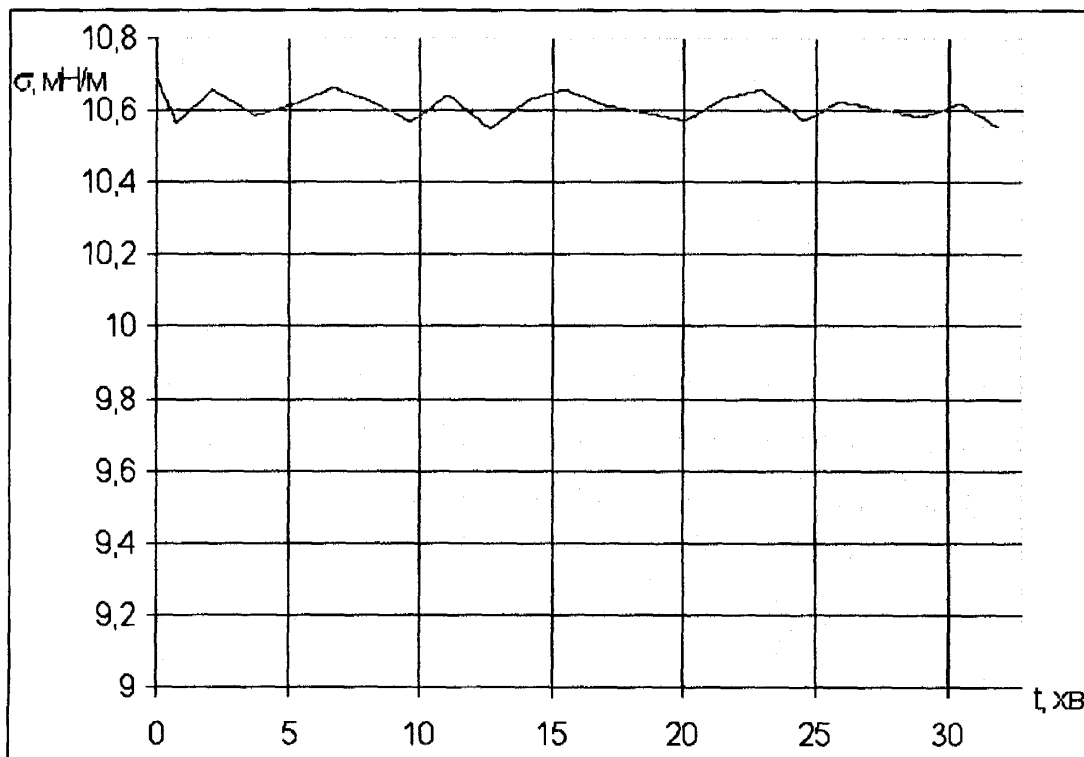


Рис. 5.1. Нестабільність визначення МН приладом на розділі фаз нафта-вода

Таблиця 5.5

Залежність визначеного приладом ВМН-2 МН (мН/м) від частоти обертання фіксованої краплі і розміру її частини, яка використовується для розрахунку МН

Частота об/с \ Частина краплі	Частина краплі					
	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	0,95
41,2	8,428	9,907	10,60	10,60	10,58	10,57
50,6	8,437	9,910	10,61	10,62	10,61	10,59
60,2	8,415	9,977	10,60	10,60	10,60	10,59
70,8	8,425	9,926	10,63	10,64	10,65	10,63
78,8	7,424	10,35	10,60	10,60	10,65	10,64

Результати дослідження ДМН різних ПАР наведені на рис. 5.2 ÷ рис. 5.9 з яких видно, що методом фіксованої обертової краплі при використанні пристрою, описаного в п. 3.2, можна досліджувати ДМН практично відразу після утворення межі контакту фаз досліджуваних рідин. Інтервал часу, який проходить після утворення контакту фаз досліджуваних рідин не перевищує 1 с. Метод вільної обертової краплі не забезпечує такого малого інтервалу часу, що пояснюється затратами часу на процес ін'єктування краплі легшої рідини всередину трубки з важчою рідиною з подальшим розкручуванням краплі легшої рідини. При цьому час, який проходить між моментом утворення границі розділу фаз рідин і початком фотографування вільної обертової краплі становив 2÷4 с. Подальший процес адсорбції ПАР на поверхні розділу фаз рідин проходить ідентично, що підтверджується отриманими однаковими кривими зміни МН в часі (рис. 5.2 ÷ рис. 5.9). Одинакові зміни МН проілюстровані на рис. 5.2 ÷ рис. 5.9 також підтверджують можливість застосування удосконаленого методі вільної і розробленого методу фіксованої обертових крапель для дослідження ДМН розчинів ПАР.

Згідно із отриманими результатами можна стверджувати, що діапазон визначення ДМН розчинів ПАР розробленим приладом складає від 0,01 до 15 мН/м.

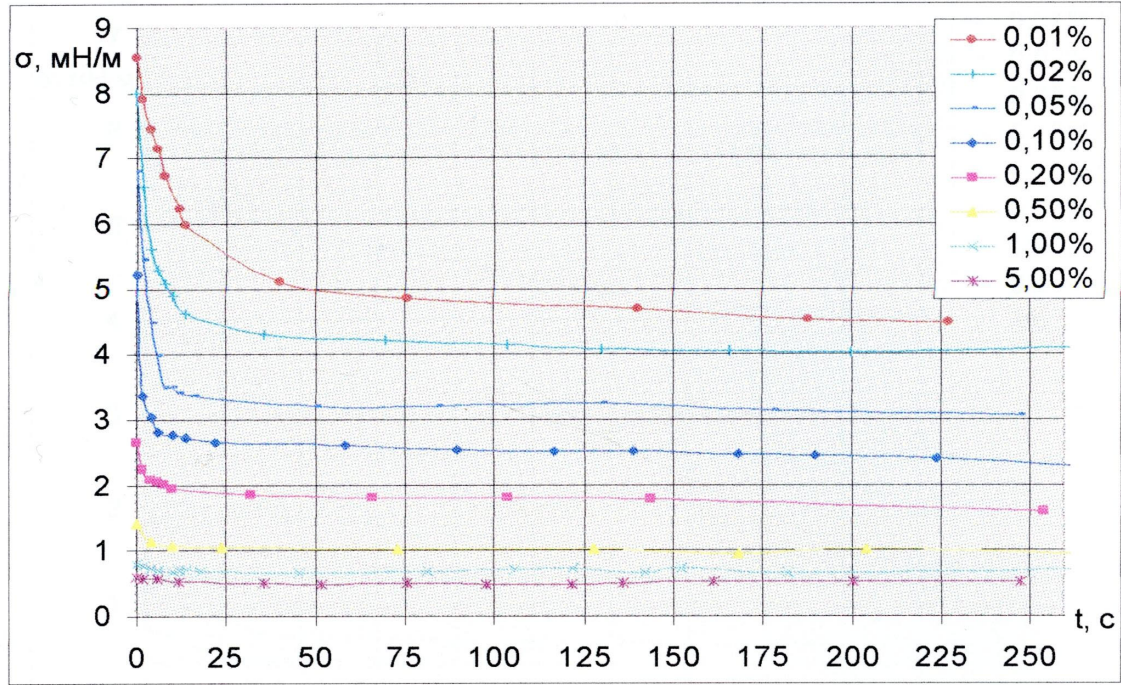


Рис. 5.2. Результати визначення ДМН водних розчинів тіполу різних концентрацій на межі з нафтою, які отримані методом фіксованої краплі

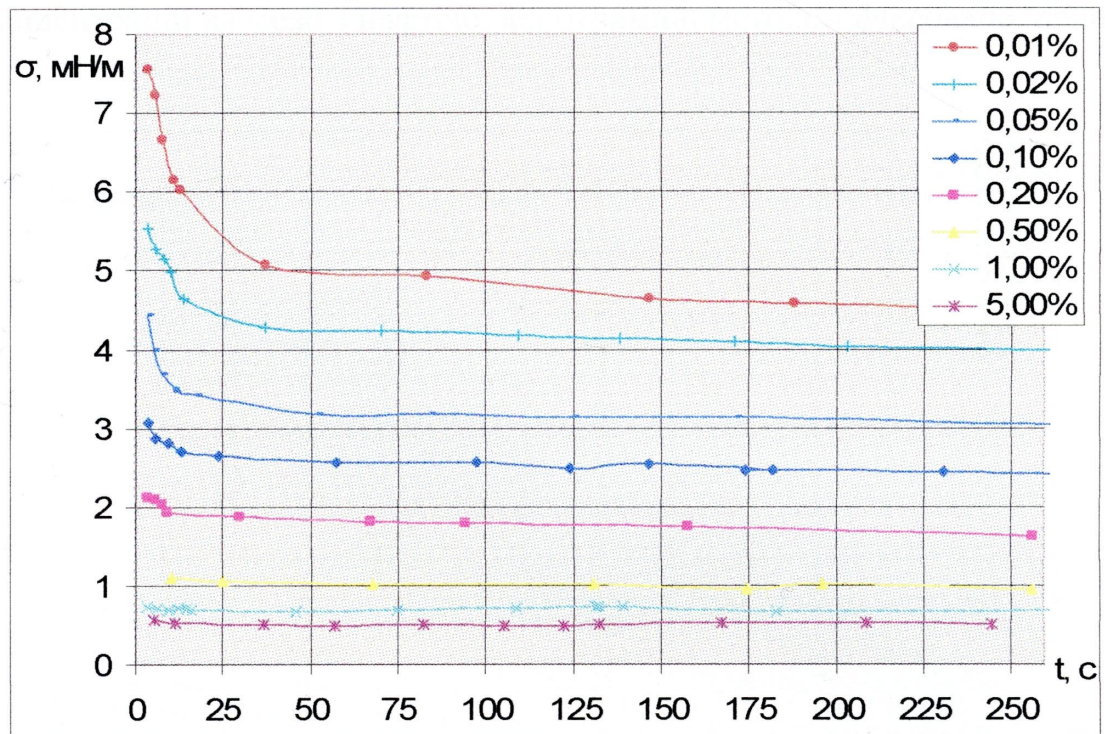


Рис. 5.3. Результати визначення ДМН водних розчинів тіполу різних концентрацій на межі з нафтою, які отримані методом вільної краплі

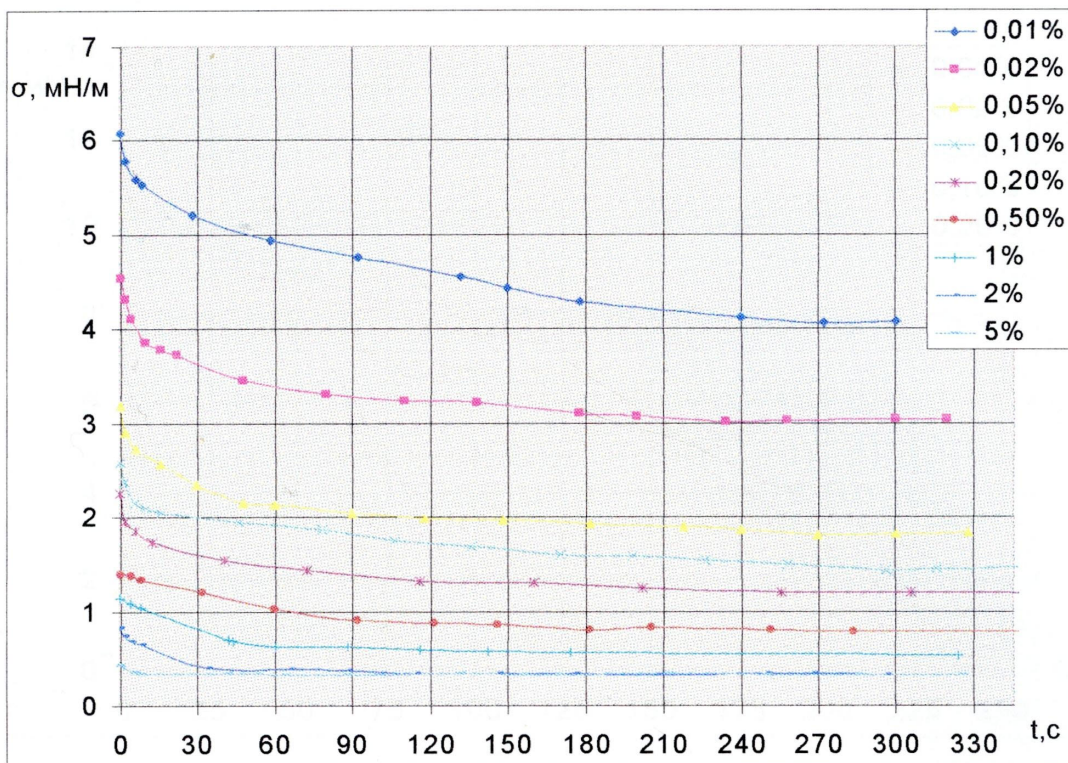


Рис. 5.4. Результати визначення ДМН водних розчинів савенолу різних концентрацій на межі з нафтою, які отримані методом фіксованої краплі

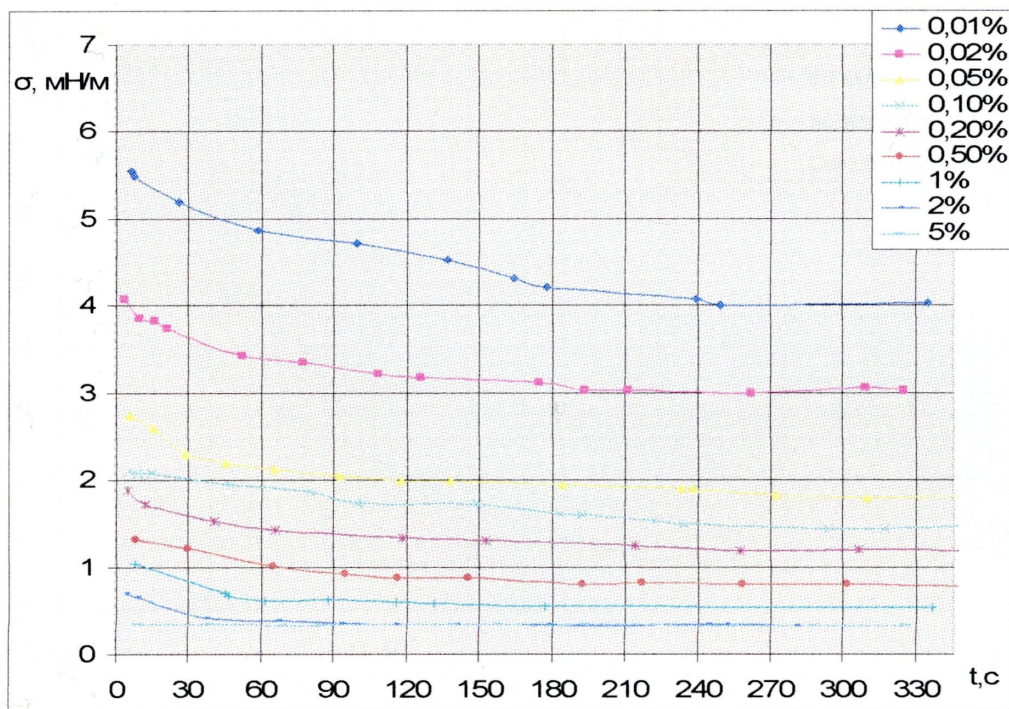


Рис. 5.5. Результати визначення ДМН водних розчинів савенолу різних концентрацій на межі з нафтою, які отримані методом вільної краплі

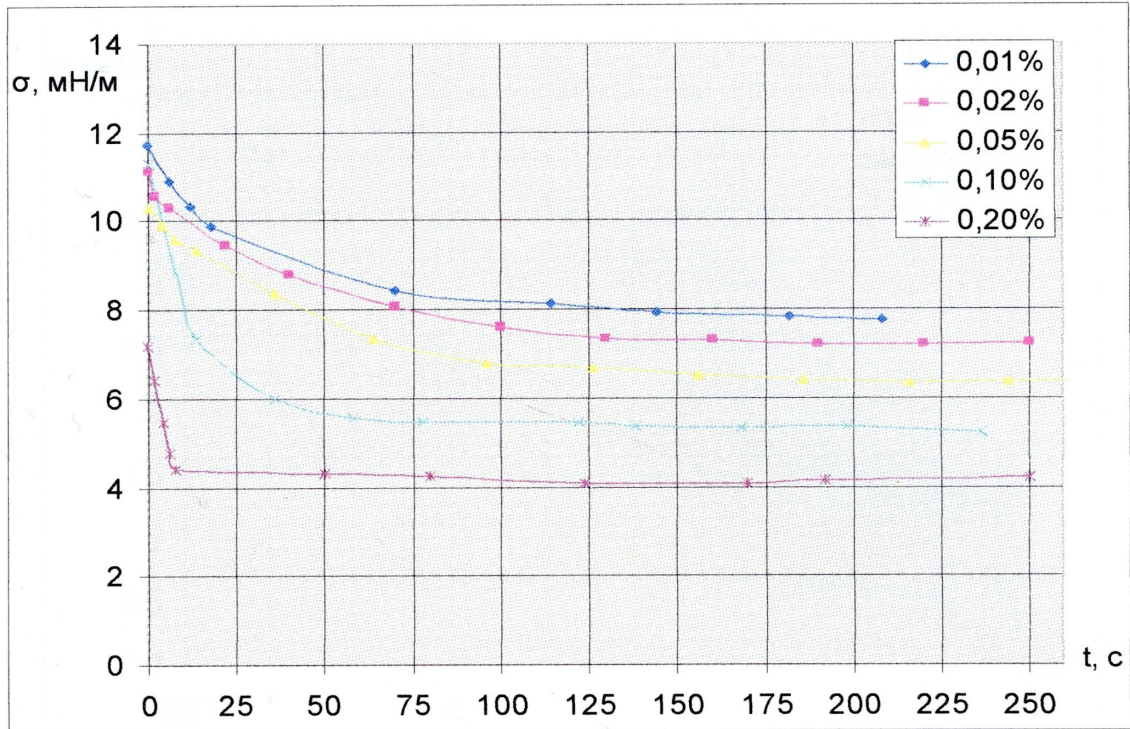


Рис. 5.6. Результати визначення ДМН водних розчинів жириноксу різних концентрацій на межі з нафтою, які отримані методом фіксованої краплі

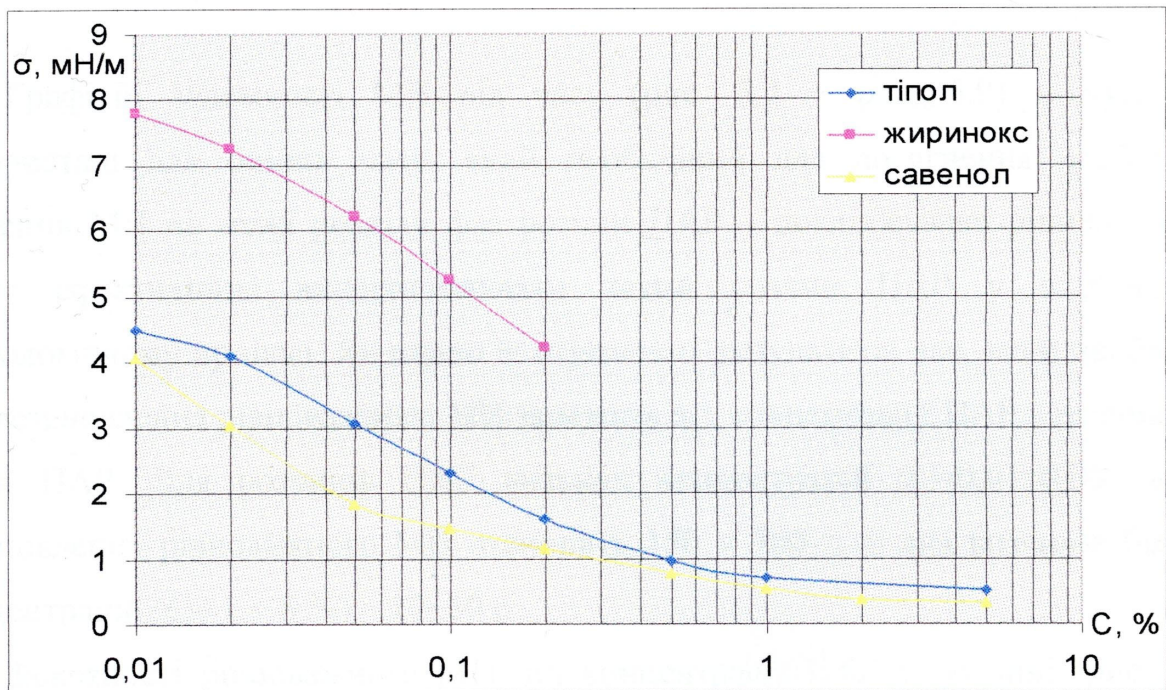


Рис. 5.7. Залежності рівноважного МН від концентрації тіполу, жириноксу і савенолу у розчині на межі з нафтою, які отримані методом фіксованої обертової краплі

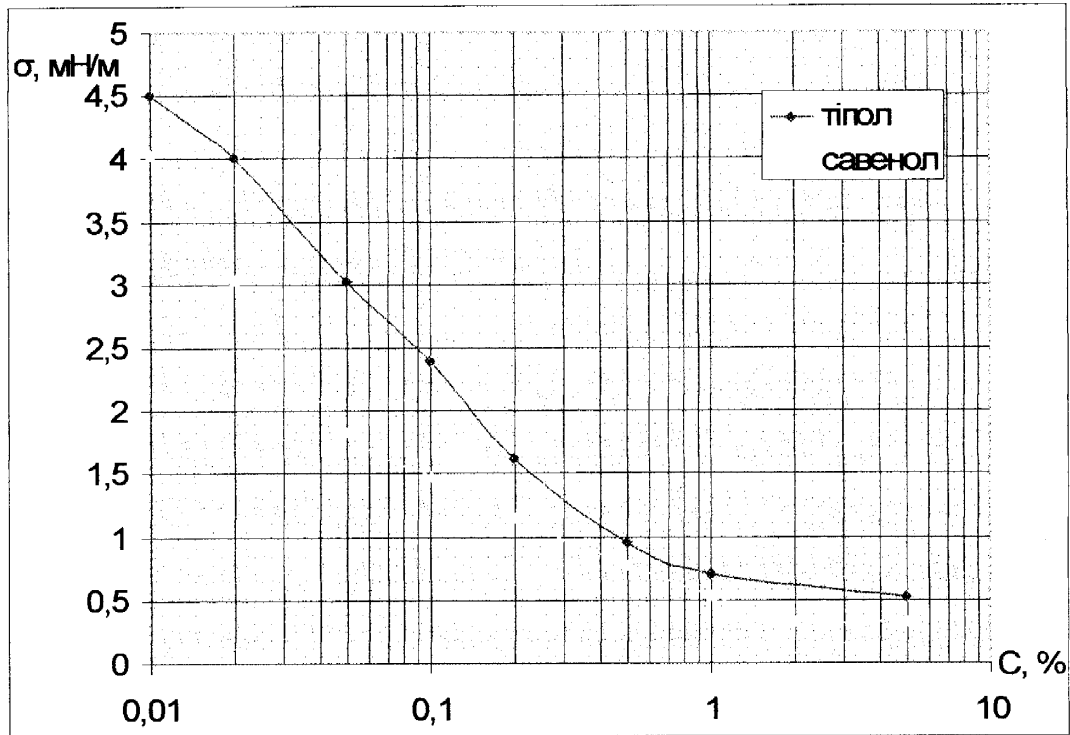


Рис. 5.8. Залежності рівноважного МН від концентрації тіполу, жириноксу і савенолу у розчині на межі з нафтою, які отримані методом вільної обертової краплі

Графічні залежності МН від часу (рис. 5.2 ÷ рис. 5.9) можуть бути використані для оцінки часу, який необхідний для досягнення необхідного значення МН на межі розділу фаз розчин ПАР – досліджувана рідина, що дає змогу ефективніше використовувати такий розчин ПАР у відповідному технологічному процесі. Як видно із отриманих результатів час, який необхідний для встановлення рівноважного МН залежить від концентрації ПАР у розчині і від самої ПАР. Для розчинів ПАР низьких концентрацій ($C=0,01\div0,05$ %) час встановлення рівноважного МН становить $150 \div 300$ с, а для розчинів більших концентрацій ($C=1 \div 5$ %) – $10\div60$ с.

Залежності рівноважного МН від концентрації ПАР у розчині (рис. 5.7 ÷ рис. 5.8) використовують для оцінки поверхневої активності досліджуваної ПАР, визначення оптимальної концентрації ПАР у розчині. Як видно із графічних залежностей на рис. 5.7 ÷ рис. 5.8 оптимальна концентрація ПАР тіполу і савенолу у розчині знаходиться в межах $1\div2\%$. При більших концентраціях ПАР у розчині

утворюються міцелярні розчини, які також використовують для інтенсифікації нафтовидобутку і солубілізації нафт.

5.3 Результати натурних випробувань приладу для дослідження динамічного міжфазного натягу і їх аналіз

Натурні випробування розробленого приладу проводились у НДПІ ВАТ "Укрнафта" з метою отримання залежностей МН від часу і концентрації на межі розділу фаз досліджуваного розчину ПАР з гасом. Отримані залежності МН від часу і концентрації дають змогу оптимізувати компонентний склад розчинів ПАР, які використовують для оброблення привибійних зон пластів експлуатаційних нафтових свердловин ВАТ "Укрнафта".

У випробуваннях для дослідження зміни МН використовували розчини стінолу і сульфонолу. Як видно із результатів визначення ДМН водних розчинів стінолу (рис. 5.9, рис. 5.10) і сульфонолу (рис. 5.11, рис. 5.12) максимальний час, який проходить до встановлення рівноважного значення МН розчинів обох ПАР, є меншим 10с. починаючи з 15-ої секунди значення МН практично не змінюється. На основі графічних залежностей (рис. 5.9 ÷ рис. 5.12) будують залежності рівноважного МН розчину ПАР від її концентрації, які наведені на рис. 5.13. Як видно із рис. 5.13 рівноважний МН стінолу при однакових значеннях його концентрації у розчині порівняно із сульфонолом є меншим на 0,08 мН/м, що свідчить про його вищу поверхневу активність. Значення концентрації ПАР у розчині, більше якої рівноважний МН зменшується повільно для стінолу складає 2%, а для сульфонолу 1%.

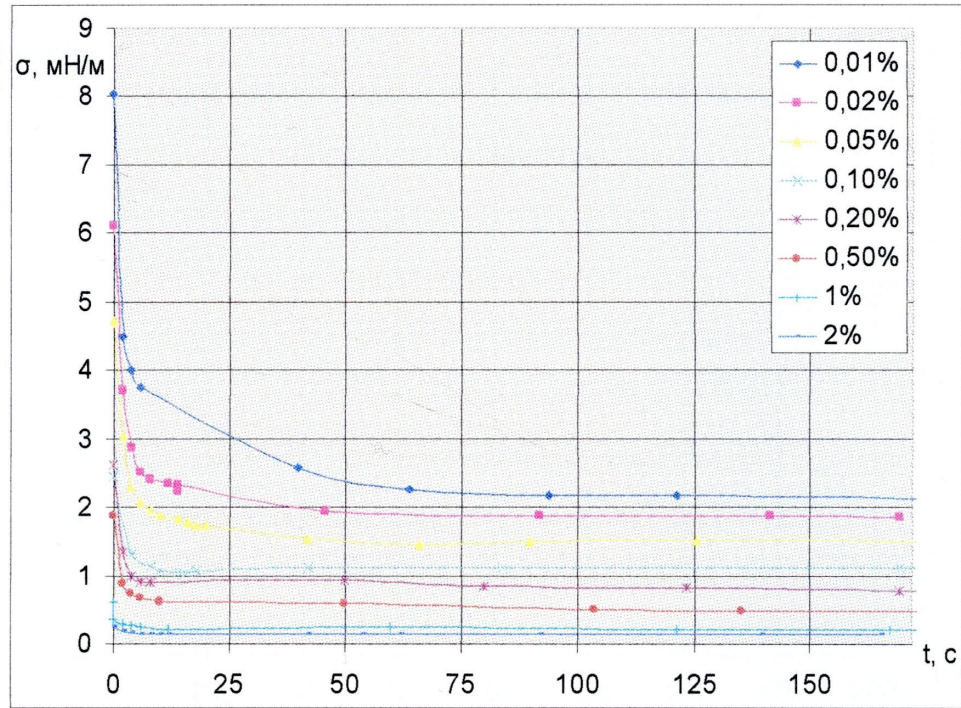


Рис. 5.9. Результати визначення ДМН водних розчинів стінолу різних концентрацій на межі з гасом отримані методом фіксованої краплі

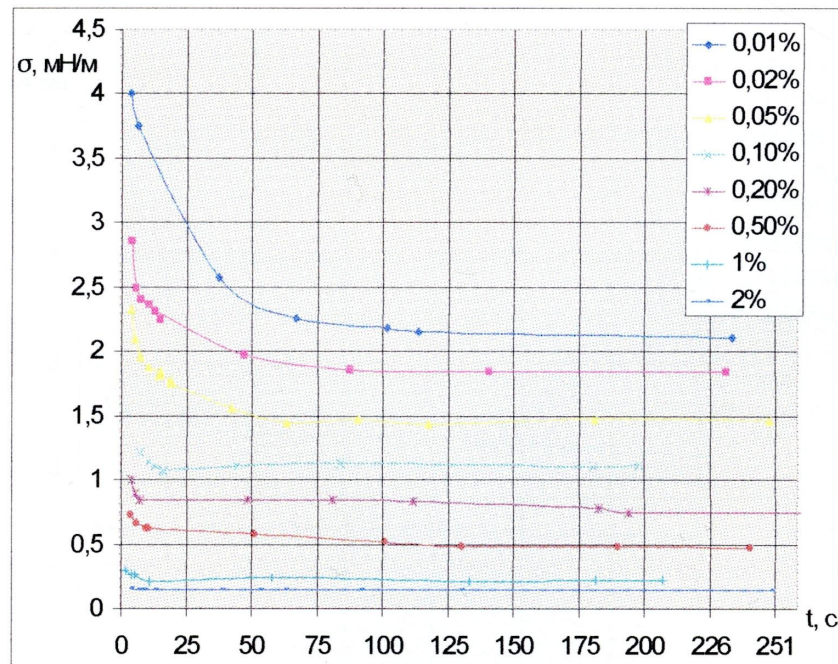


Рис. 5.10. Результати визначення ДМН водних розчинів стінолу різних концентрацій на межі з гасом отримані методом вільної краплі

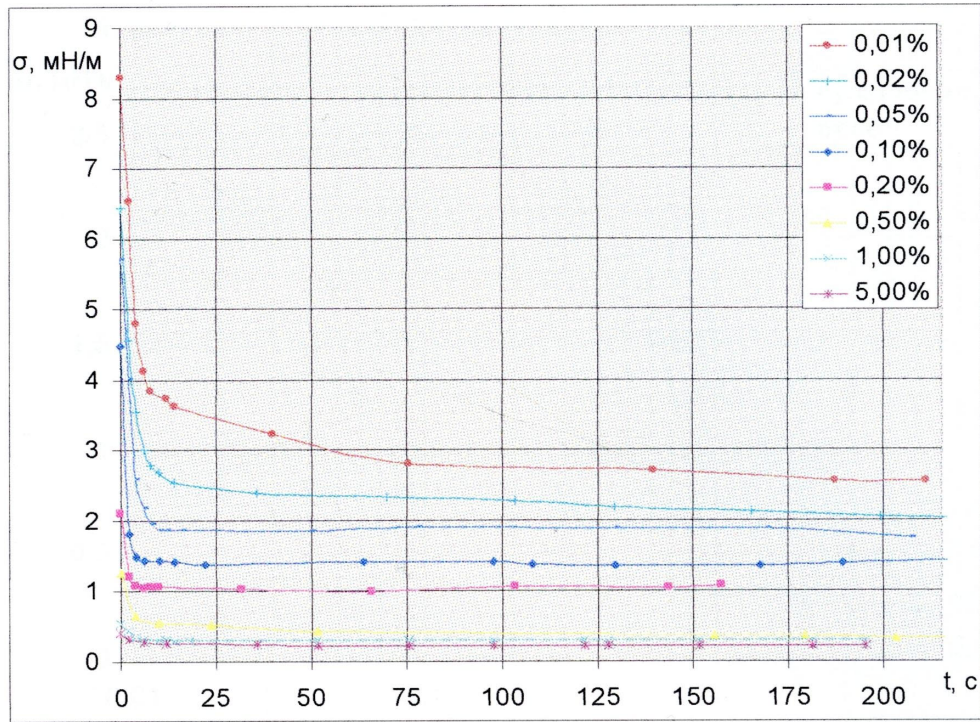


Рис. 5.11. Результати визначення ДМН водних розчинів сульфонолу різних концентрацій на межі з гасом отримані методом фіксованої краплі

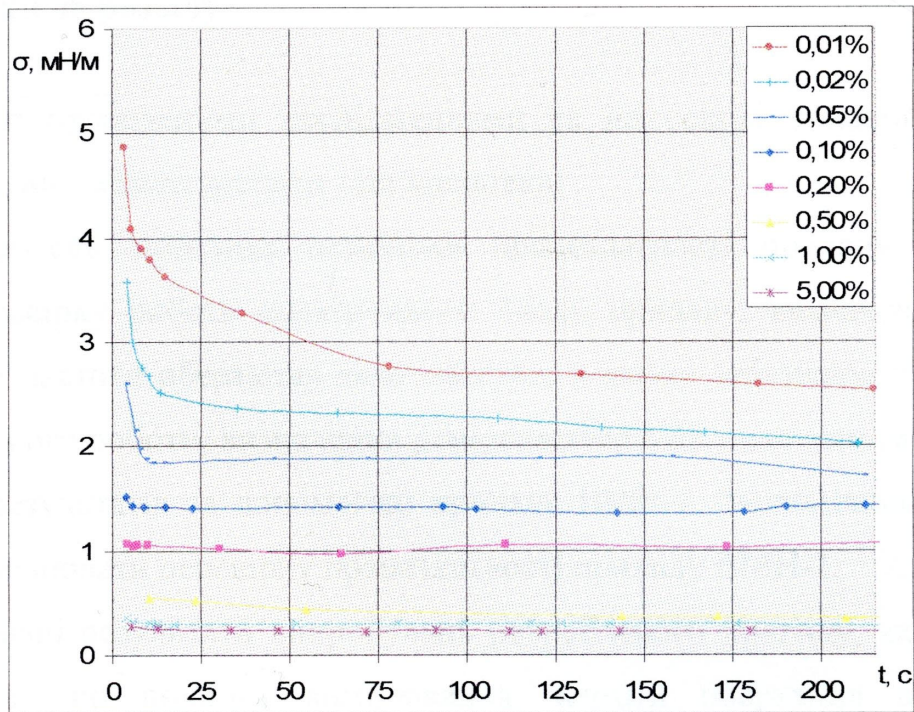


Рис. 5.12. Результати визначення ДМН водних розчинів сульфонолу різних концентрацій на межі з гасом отримані методом вільної краплі

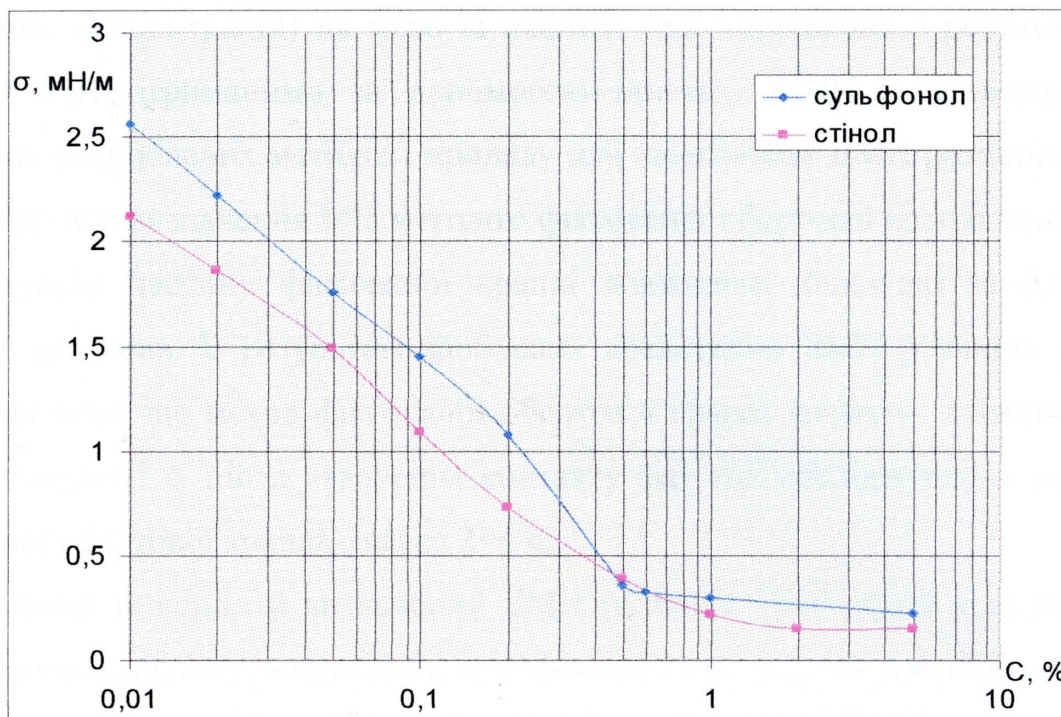


Рис. 5.13. Залежності рівноважного МН від концентрації стінолу і сульфонолу у розчині на межі з гасом

Висновки до розділу

Згідно із проведеними дослідженнями та на основі поданого в п'ятому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) розроблена методика перевірки працездатності приладу ВМН-2, яка включає перевірку роботи електронного блоку приладу, визначення діапазону регулювання частоти обертання вала двигуна, в якому забезпечується необхідна стабільність його роботи, визначення рівноважного МН з наступним порівнянням отриманих результатів за допомогою приладу ВМН-1. Запропонована методика дозволяє здійснювати перевірку працездатності приладу ВМН-2;

б) отримані результати випробувань розробленого приладу, які дозволяють стверджувати, що похибка вимірювання частоти обертання вала двигуна електронним блоком приладу не перевищує 0,02 об/с в діапазоні від 10 до 200 об/с, діапазон зміни частоти обертання вала двигуна, в якому забезпечується необхідна стабільність його роботи, складає 20÷120 об/с. Отримані результати визначення рівноважного МН різних рідин (дистильованої води і водного розчину

тіполу різних концентрацій) на межі із нафтою при порівняння з результатами визначення МН отриманими за допомогою приладу ВМН-1 підтверджують застосування розроблених методів і приладу для визначення ДМН розчинів ПАР. Показано, що для визначення МН методом фіксованої обертової краплі необхідно використовувати частину фіксованої краплі довжиною, більшою за 0,63 від загальної її довжини. В результаті зроблених досліджень ДМН розчинів різних ПАР встановлено, що метод фіксованої обертової краплі дозволяє досліджувати ДМН рідин через 1 с. після утворення контакту фаз цих досліджуваних рідин, а метод вільної обертової краплі – через 2÷4 с;

в) отримані результати визначення ДМН розчинів ПАР різної концентрації таких як тіполу, савенолу, жириноксу, сульфонолу і стінолу. На основі отриманих результатів показано, що час досягнення рівноважного значення МН досліджуваних рідин залежить від типу ПАР і її концентрації у розчині. Отримані залежності ДМН вказаних ПАР дозволяють оптимально вибирати як тип ПАР, так і його концентрацію у водному розчині з прив'язкою до часу існування межі розділу фаз до конкретних виробничих умов, наприклад, оброблення привибійної зони пластів експлуатаційних свердловин.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна задача, яка полягає в розробці методу фіксованої і удосконаленню методу вільної обертових крапель для визначення ДМН розчинів ПАР на межі їх контакту з нерозчинними в них рідинами, а також приладу, який реалізує визначення ДМН цими методами, що дозволяє здійснювати оптимальний вибір ПАР і його концентрації у розчинах, які використовують у різних процесах з урахуванням часу існування межі розділу розчин ПАР –технологічна рідина. При цьому отримані такі результати:

1. Проведений аналіз відомих модифікацій методу обертової краплі і приладів для визначення ДМН розчинів ПАР цим методом, на основі чого визначено основні недоліки цих модифікацій методу обертової краплі приладів, запропоновано розробляти такі методи визначення ДМН розчинів ПАР, які дозволять підвищити точність отримуваних результатів і проводити дослідження на малих частотах обертання трубки із досліджуваними рідинами.

2. Вперше розроблено метод фіксованої обертової краплі, який дозволяє підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР, проводити визначення ДМН розчинів ПАР при малих частотах обертання краплі (до 6000 об/хв.), не допускає неконтрольоване переміщення краплі легшої рідини в трубці з важчою рідиною під час їх обертання.

3. Удосконалено метод вільної обертової краплі визначення ДМН розчинів ПАР, який підвищує точність отримуваних результатів і дозволяє проводити дослідження при малих частотах обертання трубки із досліджуваними рідинами.

4. Вперше отримано залежності для визначення коефіцієнта оптичного збільшення обертової скляної трубки з контактуючими рідинами, які дозволяють підвищити точність визначення ДМН розчинів ПАР методами фіксованої і вільної обертових крапель.

5. Розроблено структуру і конструкцію приладу ВМН-2 і його окремих вузлів для визначення ДМН розчинів ПАР розробленим методом фіксованої і

удосконаленням методом вільної обертових крапель, проведені лабораторні і натурні випробування розробленого приладу, які підтвердили працездатність запропонованих методів фіксованої і вільної обертових крапель. За допомогою приладу ВМН-2 можна здійснювати підбір ПАР і їх концентрації у розчинах, які використовують у різних технологічних процесах.

6. Здійснений метрологічний аналіз розробленого методу фіксованої і удосконаленого методу вільної обертових крапель, а також приладу для визначення ДМН розчинів ПАР цими методами. Розроблено методику його метрологічної атестації і повірки. Сумарна приведена до діапазону вимірювання похибка визначення ДМН розчинів ПАР розробленим приладом складає $\gamma_{\sigma}=1,1\%$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабалян Г. А. Разработка нефтяных месторождений с применением поверхностно-активных веществ / Г. А. Бабалян, Б. И. Леви, А. Б. Тумасян, Э. М. Халимов. - М.: Недра, 1983. - 216 с.
2. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. — М. "Мир", 1979, 568 с.
3. Русанов А. И. Межфазная тензиометрия / А. И. Русанов, В. А. Прохоров – СПб: Химия, 1994. – 400с.
4. Vonnegut B. Rotating Bubble Method for the Determination of Surface and Interface Tensions // Rev. Sci. Instr.– 1942.– V13, №1. – P. 6–9.
5. Princen H. M. Measurement Of Interfacial Tension From The Shape Of A Rotating Drop / H. M. Princen, I. Y. Z. Zia, S. G. Mason // J. Colloid Interface Sci. – 1967. - № 23. - P. 99-107.
6. Slattery J. C. Alternative solution for spinning drop interfacial tensiometer / J. C. Slattery, J. D. Chen // J. Colloid Interface Sci. – 1978 – V64, №2 – P. 371–373.
7. Кісіль Р. І. Удосконалена методика і прилад для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі./ Р. І. Кісіль, С. А. Чеховський // Методи та прилади контролю якості. – 1999. – №4. – С. 36–39.
8. Patent №4644782 United States G01N 13/02 Spinning Rod Interfacial Tensiometer / D. D. Joseph, Feb. 24, 1987.
9. Than P. Measurement of interfacial tension between immiscible liquids with the spinning rod tensiometer / P. Than, L. Preziosi, D. D. Joseph and M. Arney // J. Colloid Interface Sci. – 1988 – Vol. 124. – №2. – P. 552-559.
10. Silberberg A. Interfacial Tension and Phase Separation in Two Polymer-Solvent Systems // University of Basel (Switzerland). – 1952.
11. Coucoulas L. M. The Refraction Correction For The Spinning Drop Interfacial Tensiometer / L. M. Coucoulas, R. A. Dawe , E. G. Mahers // J. Colloid Interface Sci. – 1983. - Vol. 93. - № 1. – P.281-284.
12. Torza S. The Rotating-Bubble Apparatus // Rev. Sci. Instrum. 1975. - Vol. 46. -

№ 6. – P. 778-783.

13. Manning C. D. On Interfacial Tension Measurement With a Spinning Drop in Gyrostatic Equilibrium / C. D. Manning, L. E. Scriven // Rev. Sci. Instrum. – 1977. - Vol. 48. - № 12. – P. 1699-1705.

14. Seeto Y. Precision Spinning Drop Interfacial Tensiometer / Y. Seeto, L. E. Scriven // Rev. Sci. Instrum. – 1982. – Vol. 53. - № 11. – 1982. – P. 1757-1761.

15. Городнов В. П. Метод и прибор для измерения низких величин межфазного натяжения / В. П. Городнов, И. И. Акимов, Ю. П. Гырышкин // Нефтепромышленное дело и транспорт нефти. НТИС. – 1984. - № 12. – С. 41-43.

16. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: зб. тез доповідей, 2–5 грудня 2008р., Івано-Франківськ. — Івано-Франківськ.: Факел, 2008. — с. 200–202.

17. M6500 Spinning Drop Tensiometer [електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.graceinstrument.com/M6500_Spinning_Drop_Tensiometer.shtml. — Назва з екрану.

18. Spinning Drop Interfacial Tensiometer Model 510 [електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.corelab.com/rd/Instruments/TEMCO/pdf/Spinning_Drop_ITF.pdf — Назва з екрану.

19. SVT 20N Spinning Drop Video Tensiometer [електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.dataphysics.de/english/produkte_svt-20.htm — Назва з екрану.

20. Site100 Spinning Drop Tensiometer [електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.kruss.de/en/products/tensiometer/spinning-drop-tensiometer-site100.html> — Назва з екрану.

21. Сумм Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания. / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. — М., "Химия", 1976, 232 с.

22. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. / А. Д. Зимон. — М., "Химия", 1974, 416 с.

23. Дерягин Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. — М.: Наука, 1985. — 398 с.

24. Кісіль Р. І. Контроль міжфазного натягу рідин методом обертової краплі: дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук. 05.11.13 / Кісіль Р. І. — Івано-Франківськ, 2001, — 184 с.

25. Боднар Р. Т. Метод оперативного визначення крайового кута змочування / Р. Т. Боднар, М.М. Дранчук, В. Б. Біліщук, Б.В. Костів // Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – №3(12). – С.154-161

26. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. Под. ред. И. Н. Жестковой. — М.: Машиностроение, 2001, — 920 с.

27. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. — М.: Мир, 1977. — 583с.

28. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельников. — М.: Наука, 1993. — 630с.

29. Іващенко Ю. Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів по методу лежачої краплі. Ю. Н. Іващенко, В. Н. Єременко. — К.: Наукова думка, 1971. — 234с.

30. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов, изд. 8-е переработанное, Главная редакция физико-математической дитературы издательства "Наука", М., 1977, 440 стр.

31. Вишневецкий С. Л. Подобия теория // Физическая энциклопедия [електронний ресурс] — Режим доступу: www.femto.com.ua — Назва з екрану.

32. Колмогоров. А. Н. Подобия теория [електронний ресурс] — Режим доступу: <http://bse.sci-lib.com> — Назва з екрану.

33. Тирский Г. А. Подобие и физическое моделирование / Г. А. Тирский // Соросовский образовательный журнал, т. 7 — 2001 — №8 — С. 122–127.

34. Patterson H. T. Measurement of Interfacial and Surface Tension in Polymer Systems / H. T. Patterson, K. H. Hu, T. H. Grindstaff // J. Polymer Sci.: Part C. – 1971. –N35. PP. 31–43.

35. Fink T. R. Multicell Spinning Drop Interfacial Tensiometer / T. R. Fink, D. P. Hearn // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – Vol. 49. N 2. – P. 188–193.

36. Cayias J. L. The Measurement of Low Interfacial Tension via the Spinning Drop Technique / J. L. Cayias, R. S. Schechter, W. H. Wade // Adsorption at Interfaces, Symposium Series, American Chemical Society. – 1975. – N 8. – P.234.

37. Currie P. K. Buoyancy effects in the spinning drop interfacial tensiometer. / P. K. Currie, J. V. Nicuwkoop // J. Colloid and Interface Sci. – 1982. – v. 87, N 2 – P. 301–316.

38. K. C. Taylor, L. L. Schramm. Measurement of short-term low dynamic interfacial tensions: Application to surfactant enhanced alkaline flooding in enhanced oil recovery // Colloids and Surfaces, V47, 1990, PP. 245–253.

39. Сергеев О. Стабилизатор частоты вращения коллекторного двигателя / О. Сергеев // Схемотехника. – 2001. – №4. – с. 6.

40. 5A/2A Step-Down, PWM, Switch-Mode DC-DC Regulators [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.maxim.com> – Назва з екрану.

41. Білінський Й.Й. Класифікація методів крайового детектування зображень / Білінський Й.Й. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007.- № 1. – С.161–169.

42. Fisher R. B. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection / R. B. Fisher, D. K. Naidu // Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision. – Springer-Verlag, 1996.– P. 205–229.

43. Порев В. А. Виділення контуру обертової краплі методом радіальної розгортки при вимірюванні міжфазного натягу / В. А. Порев, Г. В. Порев, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості – 2000. №6. – С. 32–36.

44. Canny J. A Computation Approach to Edge Detection. // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell – 1986. – Vol. 8, №6. – P. 679–698.

45. Микроскоп стереоскопический МБС-9. Паспорт. [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.laboratorium.dp.ua/item/12/manual> – Назва з екрану.

46. Лабораторный измеритель плотности жидкостей ВИП-2М [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.neftekontrol.ru/katalog/opr_plotnosty/vip_2m.html – Назва з екрану.

47. Автоматический лабораторный плотномер UDE40 [электронный ресурс] –

Режим доступу: <http://ugnlab.ru/content/view/288/53>– Назва з екрану.

48. R. Kakarala & A.O. Hero On the achievable accuracy in edge location, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 1992, – 14 (7), P.777–781.

49. H.D. Tagare and R.J.P de Figueiredo, On the localization performance measure and optimal edge detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 1990, – 12(12), – P. 1186 – 1190.

50. J. Koplowitz and V. Greco, On the edge location error for local maximum and zero crossing edge detectors, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 1994, – 16(12), – P. 1207 – 1212.

51. P. Rockett, The accuracy of sub-pixel localisation in the canny edge detector, In Proc. of the British Machine Vision Conference, 1999, – P. 392–401.

52. Рефрактометр лабораторный ИРФ-454Б2М [электронный ресурс] – Режим доступу: <http://www.laborkomplekt.ru/?page=7&sid=3&srid=45&iid=2124> – Назва з екрану.

53. Лабораторные рефрактометры KRUSS, ЕкоИнструмент. Серия DR 6000 [электронный ресурс] – Режим доступу: http://www.ecoinstrument.ru/print_product.asp?id=563 – Назва з екрану.

54. Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования: ГОСТ 8074-82. 1982 – М.: Государственный комитет по стандартам, 1982. – 23 с.

55. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: зб. тез доповідей, 2–5 грудня 2008р., Івано-Франківськ. — Івано-Франківськ.: Факел, 2008. — с. 200–202.

56. C. C. V. Chan, J. A. W. Elliot and M. C. Williams Investigation of the dependence of inferred interfacial tension on rotation rate in a spinning drop tensiometer // J. Colloid Interface Sci. – 2003. – Vol. 260. – №1. – P. 211–218.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

Результати розрахунку параметрів фіксованої обертової краплі для $K_c=1$

Φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,034915	0,000305	5,84E-07	0,00383	0,034917	0,008728
3	0,104961	0,002752	4,76E-05	0,034634	0,105009	0,026222
5	0,175667	0,0077	0,000373	0,097132	0,175891	0,043831
7	0,24753	0,015258	0,001467	0,193217	0,248155	0,06164
9	0,32115	0,025612	0,00414	0,326057	0,322502	0,07975
11	0,397296	0,039049	0,009647	0,500607	0,399829	0,098286
13	0,477042	0,056014	0,019914	0,724595	0,481364	0,11742
15	0,562019	0,077223	0,038011	1,010541	0,568952	0,137403
17	0,654994	0,103918	0,069229	1,380449	0,665689	0,158654
18	0,706013	0,12001	0,09267	1,609195	0,719186	0,169983
19	0,761556	0,138604	0,12416	1,879257	0,777759	0,182001
20	0,823815	0,160665	0,167764	2,208257	0,843813	0,195026
21	0,897428	0,188214	0,231954	2,633298	0,922412	0,209726
22	0,996882	0,227462	0,342769	3,269633	1,029332	0,228174
21	1,394101	0,389798	1,076349	6,49239	1,458455	0,279606
20	1,456513	0,41316	1,225409	7,089182	1,525096	0,283664
19	1,50735	0,431176	1,349685	7,591378	1,579032	0,286049
18	1,551241	0,445872	1,457636	8,036139	1,625319	0,287429
17	1,590376	0,458218	1,553317	8,441147	1,666355	0,288119
16	1,62599	0,468772	1,639054	8,816478	1,7035	0,2883
15	1,658862	0,477893	1,716332	9,168529	1,737615	0,288085
14	1,689522	0,485825	1,786169	9,501666	1,769285	0,287552
13	1,718345	0,492747	1,849299	9,819025	1,798928	0,286757
12	1,745611	0,498795	1,906276	10,12296	1,826857	0,285742
11	1,771534	0,504071	1,957527	10,41527	1,853312	0,284539
10	1,796283	0,50866	2,003394	10,6974	1,878483	0,283173
9	1,819993	0,512629	2,044152	10,97052	1,902523	0,281665
8	1,842772	0,516035	2,08003	11,23556	1,925556	0,280032
7	1,864713	0,518924	2,11122	11,49332	1,947687	0,278286
6	1,885892	0,521338	2,137884	11,74448	1,969002	0,276441
5	1,906372	0,523312	2,160163	11,98961	1,989578	0,274507
4	1,92621	0,524874	2,178179	12,22921	2,009478	0,27249
3	1,945453	0,526052	2,192039	12,46371	2,028757	0,270401
2	1,964142	0,526868	2,201838	12,69347	2,047464	0,268244
1	1,982314	0,527345	2,207662	12,91885	2,065642	0,266025
1,93E-10	2	0,5275	2,209587	13,14013	2,083329	0,26375

Результати розрахунку параметрів фіксованої обертової краплі для $K_c=1,4$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,024935	0,000218	2,13E-07	0,001953	0,024936	0,008727
3	0,074841	0,001961	1,73E-05	0,017608	0,074875	0,026199
5	0,124856	0,005459	0,000134	0,049068	0,125015	0,043722
7	0,175057	0,010737	0,000517	0,096635	0,175495	0,061332
9	0,225526	0,017831	0,001425	0,160784	0,226463	0,079065
11	0,276353	0,026795	0,003217	0,242172	0,278077	0,096961
13	0,327639	0,037699	0,006364	0,341678	0,330512	0,115064
15	0,379502	0,050633	0,011471	0,46044	0,383966	0,133421
17	0,432078	0,065714	0,019306	0,59992	0,438665	0,152088
19	0,485537	0,083089	0,030835	0,761992	0,49488	0,171127
21	0,540086	0,102949	0,04729	0,949071	0,552935	0,190616
23	0,595991	0,125544	0,070251	1,164315	0,613236	0,210647
25	0,6536	0,151203	0,101786	1,411932	0,676304	0,231339
27	0,713391	0,180377	0,144686	1,697692	0,742836	0,252845
29	0,776044	0,213707	0,202861	2,029819	0,813806	0,27538
31	0,842591	0,252151	0,282101	2,420702	0,890664	0,299257
33	0,914732	0,297264	0,391697	2,890535	0,975754	0,324974
35	0,995642	0,351894	0,548544	3,476572	1,073384	0,353434
37	1,092738	0,422551	0,791022	4,264619	1,193474	0,38669
39	1,237181	0,535852	1,275422	5,608793	1,377061	0,433123
37	1,622604	0,847689	3,284159	10,0606	1,872875	0,522425
35	1,705931	0,908343	3,811736	11,13828	1,975945	0,532462
31	1,829822	0,989156	4,604122	12,78123	2,123893	0,540575
29	1,880969	1,018709	4,923641	13,46987	2,182967	0,541588
27	1,927666	1,043556	5,206633	14,10279	2,235866	0,541358
25	1,970939	1,064676	5,458672	14,69256	2,28402	0,540187
23	2,011463	1,082729	5,683477	15,2476	2,328385	0,538279
19	2,086006	1,111409	6,061218	16,27586	2,408271	0,532793
17	2,120621	1,122662	6,217574	16,7569	2,444672	0,529403
15	2,153747	1,132166	6,353912	17,2197	2,479137	0,525673
13	2,18554	1,140098	6,471167	17,6664	2,511905	0,521655
11	2,216122	1,146603	6,570109	18,09878	2,543173	0,517391
9	2,245595	1,151803	6,651385	18,5183	2,573103	0,512917
7	2,274042	1,155805	6,715547	18,92621	2,601831	0,50826
5	2,301532	1,158697	6,763074	19,32357	2,629475	0,503446
3	2,328124	1,160559	6,794393	19,7113	2,656133	0,498495
1	2,353866	1,161461	6,809885	20,09019	2,681892	0,493427
1,99E-10	2,366432	1,161571	6,811805	20,27654	2,694458	0,490853

Результати розрахунку параметрів фіксованої обертової краплі для $K_c=1,8$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,019393	0,000169	1,00E-07	0,001182	0,019394	0,008727
3	0,058178	0,001524	8,10E-06	0,010641	0,058205	0,026192
5	0,096966	0,004236	6,26E-05	0,029595	0,09709	0,04369
7	0,135758	0,008314	0,000241	0,058117	0,136097	0,061241
9	0,174555	0,013767	0,00066	0,096317	0,175277	0,07887
11	0,213359	0,02061	0,001477	0,144343	0,214682	0,096598
13	0,252173	0,028861	0,002891	0,202386	0,254365	0,11445
15	0,290999	0,038543	0,005146	0,27068	0,294383	0,13245
17	0,329842	0,049682	0,008532	0,349505	0,334793	0,150623
19	0,368704	0,062311	0,013388	0,439194	0,375657	0,168999
21	0,407591	0,076466	0,020105	0,540137	0,417043	0,187605
23	0,44651	0,092192	0,029135	0,652785	0,459021	0,206473
25	0,485467	0,109539	0,040992	0,777664	0,501668	0,225637
27	0,524471	0,128565	0,056258	0,915377	0,545067	0,245133
29	0,563533	0,149338	0,075599	1,066624	0,589312	0,265003
31	0,602666	0,171935	0,099767	1,23221	0,634503	0,28529
33	0,641886	0,196446	0,129619	1,41307	0,680754	0,306045
35	0,681212	0,222976	0,166133	1,610286	0,728195	0,327323
37	0,720668	0,251647	0,21043	1,825124	0,77697	0,349187
39	0,760282	0,282603	0,263799	2,059067	0,827247	0,371708
41	0,800089	0,316013	0,327739	2,313871	0,87922	0,394972
43	0,840136	0,352079	0,404005	2,591628	0,933115	0,419074
45	0,880477	0,391045	0,494675	2,894862	0,989206	0,444129
47	0,921185	0,433211	0,602246	3,226656	1,047818	0,470275
49	0,962351	0,478944	0,729763	3,590834	1,109354	0,497681
51	1,0041	0,528715	0,881018	3,992233	1,174319	0,526556
53	1,046595	0,583127	1,060851	4,437114	1,243363	0,557166
55	1,090068	0,642989	1,275628	4,933825	1,317348	0,589862
57	1,13485	0,709418	1,534063	5,49393	1,397466	0,625121
59	1,181448	0,78404	1,848715	6,134274	1,485447	0,663626
61	1,230686	0,869395	2,239034	6,881185	1,58399	0,706431
63	1,284056	0,969885	2,738519	7,780357	1,697779	0,755329
65	1,344775	1,094596	3,415995	8,926274	1,836493	0,813962
67	1,422923	1,270735	4,476915	10,60247	2,0292	0,893046
68	1,485395	1,421953	5,48199	12,09762	2,192816	0,95729
67	1,672122	1,884683	9,105977	17,0454	2,691812	1,127121
65	1,744984	2,048951	10,61167	18,97409	2,871523	1,174195
63	1,799979	2,161928	11,72631	20,37326	2,997181	1,201085

1	2	3	4	5	6	7
61	1,847188	2,25083	12,65481	21,5265	3,097845	1,218517
59	1,889827	2,324756	13,46544	22,52836	3,183191	1,230142
57	1,92939	2,38812	14,19118	23,42461	3,257895	1,237759
55	1,966702	2,443473	14,85095	24,24165	3,324652	1,242422
53	2,002268	2,492453	15,45682	24,99638	3,385186	1,244815
51	2,036422	2,53619	16,01702	25,70046	3,440682	1,245415
49	2,069395	2,575503	16,53744	26,36229	3,491994	1,244568
47	2,101353	2,61101	17,02247	26,98823	3,539768	1,242538
45	2,13242	2,643192	17,47546	27,58319	3,584501	1,239527
43	2,162688	2,672432	17,89906	28,15107	3,626588	1,235699
41	2,192231	2,699041	18,29535	28,69504	3,66635	1,231185
39	2,221105	2,723277	18,66605	29,21772	3,704049	1,226091
37	2,249356	2,745355	19,01254	29,72128	3,739905	1,220507
35	2,277019	2,765459	19,336	30,20759	3,774104	1,214509
33	2,304126	2,783748	19,63742	30,67821	3,806805	1,208158
31	2,330699	2,800358	19,91761	31,13452	3,838144	1,20151
29	2,35676	2,815408	20,17729	31,5777	3,86824	1,194609
27	2,382325	2,829004	20,41709	32,00881	3,897197	1,187497
25	2,407407	2,841241	20,63754	32,42877	3,925106	1,180208
23	2,432018	2,852201	20,83911	32,83838	3,952049	1,172772
21	2,456167	2,861961	21,02224	33,2384	3,978097	1,165214
19	2,479863	2,870588	21,1873	33,62946	4,003316	1,157559
17	2,503113	2,878145	21,33464	34,01218	4,027764	1,149826
15	2,525921	2,884687	21,46457	34,38708	4,051494	1,142034
13	2,548293	2,890267	21,57738	34,75466	4,074552	1,134197
11	2,570233	2,894932	21,67335	35,11535	4,096983	1,126331
9	2,591743	2,898727	21,75274	35,46958	4,118826	1,118447
7	2,612826	2,901691	21,81579	35,81771	4,140118	1,110557
5	2,633484	2,903864	21,86274	36,16009	4,160891	1,10267
3	2,653719	2,90528	21,89382	36,49704	4,181177	1,094796
1	2,673533	2,905973	21,90925	36,82886	4,201004	1,086941
4,87E-10	2,683282	2,906059	21,91117	36,99293	4,210753	1,083024

Результати розрахунку параметрів фіксованої обертової краплі для $K_c=1,889$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,018479	0,000161	8,65E-08	0,001073	0,01848	0,008727
3	0,055434	0,001452	7,01E-06	0,00966	0,055459	0,026191
5	0,092381	0,004036	5,41E-05	0,026863	0,092499	0,043686
7	0,129317	0,007918	0,000208	0,052733	0,12964	0,061231
9	0,166235	0,013107	0,00057	0,087354	0,166922	0,078847
11	0,20313	0,019613	0,001274	0,130835	0,204389	0,096556
13	0,239999	0,027451	0,002491	0,183315	0,242084	0,114379
15	0,276835	0,036636	0,004428	0,244967	0,28005	0,132339
17	0,313635	0,047189	0,00733	0,315993	0,318334	0,150459
19	0,350392	0,059134	0,01148	0,396632	0,356986	0,168764
21	0,387103	0,072497	0,017203	0,487162	0,396055	0,18728
23	0,423762	0,087309	0,024869	0,587898	0,435596	0,206034
25	0,460364	0,103608	0,034894	0,699205	0,475665	0,225056
27	0,496905	0,121432	0,047743	0,821493	0,516323	0,244376
29	0,53338	0,140828	0,063936	0,955228	0,557637	0,264029
31	0,569784	0,161848	0,084052	1,100937	0,599675	0,284052
33	0,606112	0,184551	0,108735	1,259217	0,642516	0,304484
35	0,642359	0,209004	0,1387	1,430739	0,686242	0,325369
37	0,678521	0,235281	0,17474	1,616263	0,730945	0,346755
39	0,714593	0,263467	0,217741	1,816652	0,776726	0,368696
41	0,750571	0,293661	0,268687	2,032881	0,823697	0,39125
43	0,786449	0,325971	0,328681	2,266063	0,871982	0,414485
45	0,822223	0,360524	0,398957	2,517466	0,921721	0,438475
47	0,85789	0,397465	0,480908	2,788546	0,973073	0,463306
49	0,893444	0,43696	0,576108	3,080978	1,026216	0,489074
51	0,928881	0,479202	0,686348	3,396702	1,081357	0,515892
53	0,964197	0,524416	0,813683	3,737975	1,138732	0,543889
55	0,999389	0,572867	0,960482	4,10745	1,198618	0,573217
57	1,034453	0,624866	1,129508	4,508258	1,261338	0,604055
59	1,069384	0,680787	1,324007	4,944137	1,327276	0,636616
61	1,104181	0,74108	1,547841	5,419591	1,396893	0,671158
63	1,138841	0,806294	1,805661	5,940115	1,470749	0,707995
65	1,173362	0,877107	2,103156	6,512499	1,549532	0,747516
67	1,207743	0,954373	2,447397	7,145274	1,634106	0,790212
69	1,241985	1,039184	2,847352	7,849355	1,725574	0,836713
71	1,276092	1,13297	3,314662	8,639024	1,825374	0,887844
73	1,31007	1,237653	3,864869	9,533471	1,935439	0,944723
75	1,343934	1,355903	4,519447	10,55937	2,058448	1,008906

Продовження табл. А.4

1	2	3	4	5	6	7
77	1,377707	1,491592	5,309373	11,75535	2,198285	1,082663
79	1,411437	1,650653	6,281937	13,18064	2,360891	1,169484
81	1,445219	1,842903	7,51516	14,93318	2,556096	1,275172
83	1,479273	2,086558	9,15354	17,19475	2,802132	1,41053
85	1,514233	2,422758	11,52295	20,37578	3,140161	1,59999
87	1,553338	2,99985	15,79755	25,95635	3,718606	1,931229
85	1,658732	5,152252	33,12041	47,62689	5,873765	3,10614
83	1,692403	5,476183	35,97437	51,05383	6,199458	3,235744
81	1,724737	5,707606	38,09511	53,56149	6,433141	3,309261
79	1,756371	5,887672	39,80787	55,56039	6,615973	3,35218
77	1,787524	6,034607	41,25655	57,23233	6,766182	3,37596
75	1,818291	6,158239	42,51853	58,67534	6,893592	3,386829
73	1,84872	6,264512	43,64052	59,94868	7,004141	3,388568
71	1,878836	6,357308	44,65289	61,09105	7,101707	3,383643
69	1,908653	6,439309	45,57651	62,12918	7,188965	3,373745
67	1,938179	6,512447	46,42635	63,08232	7,267842	3,360086
65	1,967417	6,578163	47,21347	63,96481	7,339773	3,343553
63	1,99637	6,637561	47,94629	64,78763	7,405854	3,324815
61	2,025037	6,691505	48,63132	65,55937	7,466945	3,304386
59	2,053418	6,740684	49,2737	66,28688	7,523729	3,282666
57	2,08151	6,785661	49,87756	66,97573	7,576761	3,25997
53	2,136821	6,864772	50,98254	68,25495	7,67331	3,212609
51	2,164035	6,899616	51,48867	68,85232	7,717524	3,18831
49	2,190951	6,931703	51,96657	69,42533	7,759407	3,163787
47	2,217566	6,96127	52,41783	69,9763	7,799191	3,139149
45	2,243876	6,988523	52,84382	70,50725	7,837074	3,114487
43	2,26988	7,013641	53,2457	71,01993	7,873229	3,089873
41	2,295573	7,036781	53,62447	71,51587	7,907808	3,06537
39	2,320952	7,058082	53,98098	71,99644	7,940944	3,041028
37	2,346015	7,077668	54,31599	72,46281	7,972754	3,016889
35	2,370759	7,09565	54,63014	72,91607	8,003342	2,992987
33	2,395179	7,112125	54,92403	73,35715	8,032802	2,96935
31	2,419273	7,127184	55,19814	73,78692	8,061217	2,946002
29	2,443039	7,140908	55,45294	74,20614	8,088662	2,922962
27	2,466472	7,153371	55,68884	74,61551	8,115204	2,900245
25	2,489569	7,164639	55,90618	75,01567	8,140905	2,877863
23	2,512329	7,174775	56,10532	75,40719	8,165821	2,855826
21	2,534747	7,183834	56,28655	75,79059	8,190002	2,834142
19	2,556821	7,191871	56,45015	76,16637	8,213494	2,812817
17	2,578548	7,198932	56,59639	76,53496	8,236341	2,791855
15	2,599925	7,205064	56,72551	76,89677	8,258581	2,771258

Результати розрахунку параметрів фіксованої обертової краплі для $K_c=1,8898$

Φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,018471	0,000161	8,64E-08	0,001072	0,018472	0,008727
3	0,05541	0,001451	7,00E-06	0,009652	0,055436	0,026191
5	0,092342	0,004034	5,41E-05	0,02684	0,09246	0,043686
7	0,129262	0,007915	0,000208	0,052688	0,129584	0,061231
9	0,166164	0,013101	0,000569	0,087279	0,166851	0,078847
11	0,203043	0,019605	0,001272	0,130722	0,204301	0,096556
13	0,239895	0,027439	0,002488	0,183157	0,241979	0,114378
15	0,276715	0,03662	0,004423	0,244753	0,279927	0,132338
17	0,313497	0,047168	0,00732	0,315715	0,318194	0,150458
19	0,350236	0,059107	0,011464	0,396279	0,356827	0,168762
21	0,386929	0,072463	0,017179	0,486723	0,395877	0,187277
23	0,423569	0,087268	0,024835	0,587362	0,435397	0,20603
25	0,460152	0,103558	0,034845	0,698558	0,475444	0,225051
27	0,496672	0,121372	0,047675	0,82072	0,51608	0,24437
29	0,533126	0,140757	0,063843	0,954314	0,557369	0,264022
31	0,569507	0,161764	0,083928	1,099864	0,599382	0,284042
33	0,605811	0,184452	0,108571	1,257963	0,642195	0,304472
35	0,642034	0,208888	0,138485	1,429282	0,685892	0,325354
37	0,67817	0,235146	0,174462	1,614577	0,730562	0,346736
39	0,714214	0,263311	0,217384	1,814705	0,776308	0,368672
41	0,750161	0,293479	0,268233	2,030639	0,82324	0,391221
43	0,786008	0,325761	0,328107	2,263484	0,871481	0,41445
45	0,821748	0,360281	0,398236	2,514502	0,921173	0,438432
47	0,857377	0,397183	0,480005	2,785139	0,972471	0,463253
49	0,89289	0,436633	0,57498	3,07706	1,025554	0,48901
51	0,928283	0,478822	0,684943	3,392189	1,080625	0,515814
53	0,963551	0,523973	0,811935	3,732767	1,137921	0,543794
55	0,998689	0,57235	0,958308	4,101421	1,197715	0,573101
57	1,033692	0,62426	1,126801	4,501253	1,260327	0,603913
59	1,068556	0,680072	1,32063	4,935959	1,326137	0,636441
61	1,103276	0,740233	1,543614	5,409988	1,395601	0,67094
63	1,137848	0,805281	1,800347	5,928756	1,46927	0,707723
65	1,172268	0,875886	2,096433	6,498944	1,547822	0,747173
67	1,20653	0,952886	2,43882	7,128923	1,632104	0,789773
69	1,240632	1,037347	2,836291	7,829367	1,723195	0,836144
71	1,274568	1,130664	3,300199	8,614184	1,822496	0,887096
73	1,308336	1,234696	3,84561	9,501957	1,931877	0,943715
75	1,341932	1,352011	4,493182	10,51831	2,053914	1,007511

1	2	3	4	5	6	7
77	1,375355	1,486288	5,272382	11,69995	2,192295	1,080657
79	1,408605	1,643072	6,227453	13,10222	2,352574	1,166453
81	1,441685	1,831298	7,429471	14,81426	2,543694	1,270248
83	1,474609	2,066786	9,00402	16,99388	2,781485	1,401582
85	1,507422	2,38191	11,20771	19,96399	3,098329	1,580121
87	1,540299	2,862441	14,71988	24,58013	3,580008	1,858368
89	1,575223	3,982067	23,29057	35,56696	4,700234	2,527938
87	1,633974	6,90762	46,74142	64,93551	7,626544	4,227496
85	1,665991	7,375859	50,7397	69,7974	8,0959	4,42731
83	1,697515	7,678717	53,42793	73,01339	8,40041	4,523506
81	1,728721	7,901977	55,48482	75,43909	8,625851	4,570997
79	1,759653	8,078022	57,16636	77,39745	8,804602	4,590691
77	1,790325	8,222683	58,59752	79,04636	8,952486	4,592843
75	1,820743	8,344906	59,84877	80,475	9,078444	4,583242
73	1,850906	8,450246	60,96373	81,73877	9,188023	4,565466
71	1,880812	8,542395	61,97128	82,87444	9,284908	4,541865
69	1,91046	8,623929	62,89149	83,90769	9,37167	4,514059
67	1,939846	8,69672	63,73883	84,85717	9,450173	4,483201
65	1,968967	8,762172	64,52408	85,73684	9,521815	4,450136
63	1,99782	8,821365	65,25547	86,55744	9,587668	4,415495
61	2,026401	8,875146	65,93939	87,3274	9,648576	4,379758
59	2,054707	8,924196	66,58091	88,05346	9,70521	4,343295
57	2,082733	8,969067	67,18409	88,74111	9,758117	4,306393
55	2,110477	9,010215	67,75224	89,39486	9,807746	4,269279
53	2,137934	9,04802	68,28808	90,01848	9,854473	4,232133
51	2,165101	9,082804	68,79386	90,61513	9,898611	4,195094
49	2,191975	9,114841	69,27146	91,18751	9,940429	4,158278
47	2,218551	9,144366	69,72249	91,73794	9,980155	4,121773
45	2,244827	9,171582	70,14829	92,26842	10,01799	4,085652
43	2,270799	9,19667	70,55001	92,78069	10,0541	4,049971
41	2,296463	9,219783	70,92864	93,27626	10,08864	4,014776
39	2,321815	9,241062	71,28504	93,7565	10,12174	3,980102
37	2,346854	9,260629	71,61996	94,22258	10,15352	3,945977
35	2,371574	9,278593	71,93405	94,67558	10,18408	3,91242
33	2,395973	9,295054	72,22787	95,11642	10,21351	3,879449
31	2,420047	9,310101	72,50194	95,54597	10,2419	3,847074
29	2,443794	9,323814	72,7567	95,965	10,26933	3,815303
27	2,467209	9,336267	72,99257	96,37419	10,29585	3,784141
25	2,490291	9,347528	73,20989	96,77419	10,32153	3,753589
23	2,513035	9,357656	73,409	97,16555	10,34643	3,723647
21	2,535439	9,366711	73,59022	97,54882	10,3706	3,694315

Продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7
19	2,5575	9,374742	73,75381	97,92447	10,39408	3,665589
17	2,579214	9,381799	73,90003	98,29294	10,41691	3,637465
15	2,600579	9,387927	74,02915	98,65464	10,43914	3,609937
13	2,621592	9,393168	74,14137	99,00995	10,46079	3,583002
11	2,64225	9,397561	74,23694	99,35922	10,48191	3,556651
9	2,66255	9,401142	74,31607	99,70277	10,50253	3,530879
7	2,682489	9,403945	74,37896	100,0409	10,52267	3,505679
5	2,702066	9,406004	74,42582	100,3739	10,54235	3,481042
3	2,721276	9,407349	74,45686	100,702	10,56161	3,456962
1	2,740118	9,408008	74,47228	101,0255	10,58046	3,433432
4,58E-10	2,7494	9,408089	74,4742	101,1856	10,58975	3,42187

Додаток Б

Таблиця Б.1

Результати розрахунку параметрів вільної обертової краплі для $K_c=1,89$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
3	0,055404	0,001451	7,00E-06	0,00965	0,05543	0,026191
6	0,110792	0,005811	0,000112	0,038669	0,110995	0,052451
9	0,166146	0,0131	0,000569	0,08726	0,166833	0,078847
12	0,221449	0,023352	0,001804	0,155772	0,223085	0,105451
15	0,276684	0,036616	0,004421	0,2447	0,279897	0,132338
18	0,331835	0,052956	0,009214	0,354702	0,337424	0,159585
21	0,386885	0,072455	0,017174	0,486613	0,395832	0,187277
24	0,441817	0,095213	0,029507	0,641468	0,455299	0,215504
27	0,496614	0,121357	0,047658	0,820527	0,516019	0,244369
30	0,551259	0,151035	0,073331	1,025312	0,578211	0,273981
33	0,605736	0,184428	0,108529	1,25765	0,642115	0,304469
36	0,660028	0,221753	0,155601	1,51974	0,708008	0,335975
39	0,714119	0,263272	0,217295	1,814219	0,776203	0,368666
42	0,767991	0,309299	0,296841	2,144272	0,847069	0,402738
45	0,821629	0,36022	0,398056	2,513762	0,921036	0,438421
48	0,875015	0,416502	0,525484	2,927413	0,998619	0,475994
51	0,928134	0,478727	0,684593	3,391062	1,080443	0,515795
54	0,980968	0,547621	0,882051	3,912005	1,167273	0,558245
57	1,033502	0,624108	1,126126	4,499506	1,260075	0,603877
60	1,085718	0,709384	1,42727	5,165537	1,360078	0,653377
63	1,137601	0,805029	1,799024	5,925925	1,468901	0,707655
66	1,189132	0,913191	2,259452	6,802153	1,588726	0,767948
69	1,240294	1,03689	2,833542	7,824394	1,722603	0,836003
72	1,291069	1,180553	3,557454	9,036872	1,874992	0,9144
75	1,341435	1,351047	4,486682	10,50813	2,05279	1,007165
78	1,391365	1,559862	5,71335	12,35286	2,267516	1,121102
81	1,440817	1,828469	7,408608	14,78526	2,540668	1,26905
84	1,489694	2,204655	9,951956	18,28202	2,920059	1,479938
87	1,53759	2,83626	14,51501	24,31772	3,55355	1,844614
90	1,574868	4,723665	29,01879	42,86998	5,44152	2,999403
93	1,53759	6,611069	43,52257	61,42225	7,329489	4,29963
96	1,489694	7,242674	48,08563	67,45795	7,96298	4,861854
99	1,440817	7,61886	50,62897	70,95471	8,342371	5,287877
102	1,391365	7,887467	52,32423	73,38711	8,615524	5,66887
105	1,341435	8,096282	53,5509	75,23183	8,830249	6,035538
108	1,291069	8,266776	54,48013	76,70309	9,008047	6,403046

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7
111	1,240294	8,410439	55,20404	77,91557	9,160436	6,781002
114	1,189132	8,534138	55,77813	78,93781	9,294314	7,17678
117	1,137601	8,6423	56,23856	79,81404	9,414138	7,596954
120	1,085718	8,737945	56,61031	80,57443	9,522961	8,048077
123	1,033502	8,823221	56,91146	81,24046	9,622964	8,537207
126	0,980968	8,899708	57,15553	81,82796	9,715766	9,07237
129	0,928134	8,968602	57,35299	82,3489	9,802597	9,663048
132	0,875015	9,030827	57,5121	82,81255	9,88442	10,32077
135	0,821629	9,087109	57,63953	83,2262	9,962003	11,05987
138	0,767991	9,13803	57,74074	83,59569	10,03597	11,89861
141	0,714119	9,184057	57,82029	83,92574	10,10684	12,86068
144	0,660028	9,225576	57,88198	84,22022	10,17503	13,97754
147	0,605736	9,262901	57,92905	84,48231	10,24092	15,29197
150	0,551259	9,296294	57,96425	84,71465	10,30483	16,86374
153	0,496614	9,325972	57,98992	84,91944	10,36702	18,77912
156	0,441817	9,352116	58,00807	85,09849	10,42774	21,16739
159	0,386885	9,374875	58,02041	85,25335	10,48721	24,23167
162	0,331835	9,394373	58,02837	85,38526	10,54562	28,31034
165	0,276684	9,410713	58,03316	85,49526	10,60314	34,01245
168	0,221449	9,423977	58,03578	85,58419	10,65995	42,556
171	0,166146	9,434229	58,03701	85,6527	10,71621	56,78284
174	0,110792	9,441518	58,03747	85,70129	10,77204	85,2184
177	0,055404	9,445878	58,03758	85,73031	10,82761	170,4895
180	-5,30E-07	9,447329	58,03758	85,73996	10,88304	-1,8E+07

Таблиця Б.2

Результати розрахунку параметрів вільної обертової краплі для $K_c=1,891$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
3	0,055375	0,00145	6,99E-06	0,00964	0,0554	0,026191
6	0,110733	0,005808	0,000112	0,038628	0,110936	0,05245
9	0,166057	0,013093	0,000568	0,087167	0,166744	0,078847
12	0,221329	0,023339	0,001801	0,155604	0,222964	0,105451
15	0,276533	0,036595	0,004414	0,244433	0,279744	0,132337
18	0,331652	0,052926	0,009199	0,354309	0,337238	0,159583
21	0,386668	0,072413	0,017144	0,486066	0,395609	0,187273
24	0,441564	0,095157	0,029456	0,640732	0,455037	0,215499
27	0,496323	0,121282	0,047573	0,819564	0,515716	0,244361
30	0,550928	0,150938	0,073196	1,024075	0,577862	0,27397
33	0,605362	0,184304	0,108324	1,256087	0,641715	0,304453
36	0,659607	0,221597	0,155296	1,517785	0,70755	0,335954
39	0,713646	0,263076	0,216851	1,811792	0,775681	0,368637
42	0,767461	0,309056	0,296206	2,141274	0,846472	0,402699
45	0,821036	0,359916	0,397158	2,510068	0,920352	0,438368
48	0,874351	0,416123	0,524227	2,922862	0,997832	0,475922
51	0,927389	0,478253	0,682845	3,385442	1,07953	0,515699
54	0,98013	0,547025	0,879627	3,905033	1,166208	0,558115
57	1,032554	0,623354	1,122762	4,490792	1,258816	0,6037
60	1,084641	0,708417	1,422582	5,154531	1,358571	0,653135
63	1,136366	0,803771	1,792435	5,911821	1,467064	0,707317
66	1,187702	0,911523	2,250065	6,783725	1,586433	0,767468
69	1,238616	1,034618	2,819886	7,799672	1,719657	0,835302
72	1,289061	1,177344	3,536979	9,002488	1,871053	0,913335
75	1,338969	1,346279	4,454572	10,45782	2,047225	1,005459
78	1,38822	1,55223	5,65943	12,2735	2,259008	1,118144
81	1,436562	1,814727	7,30742	14,64435	2,52595	1,263243
84	1,48332	2,17418	9,719799	17,97337	2,888472	1,465752
87	1,525882	2,730808	13,6916	23,25998	3,446788	1,789658
90	1,549099	3,695539	20,8948	32,60843	4,411906	2,385606
93	1,525882	4,660271	28,09799	41,95688	5,377024	3,054149
96	1,48332	5,216899	32,06979	47,2435	5,93534	3,517042
99	1,436562	5,576352	34,48217	50,57251	6,297863	3,881735
102	1,38822	5,838849	36,13016	52,94336	6,564805	4,205998
105	1,338969	6,0448	37,33502	54,75904	6,776587	4,514519
108	1,289061	6,213735	38,25261	56,21438	6,95276	4,820358
111	1,238616	6,356461	38,96971	57,41719	7,104156	5,131908
114	1,187702	6,479556	39,53953	58,43314	7,237379	5,455539

Продовження табл. Б.2

1	2	3	4	5	6	7
117	1,136366	6,587308	39,99716	59,30504	7,356749	5,796818
120	1,084641	6,682662	40,36701	60,06233	7,465242	6,161173
123	1,032554	6,767725	40,66683	60,72607	7,564997	6,554352
126	0,98013	6,844053	40,90996	61,31183	7,657605	6,982803
129	0,927389	6,912826	41,10675	61,83142	7,744282	7,454076
132	0,874351	6,974956	41,26536	62,294	7,825981	7,977295
135	0,821036	7,031163	41,39243	62,7068	7,903461	8,563772
138	0,767461	7,082023	41,49339	63,07559	7,977341	9,227857
141	0,713646	7,128003	41,57274	63,40507	8,048132	9,988154
144	0,659607	7,169482	41,6343	63,69908	8,116262	10,86933
147	0,605362	7,206775	41,68127	63,96078	8,182098	11,90491
150	0,550928	7,240141	41,7164	64,19279	8,245951	13,14172
153	0,496323	7,269797	41,74202	64,3973	8,308097	14,64731
156	0,441564	7,295922	41,76014	64,57613	8,368775	16,52292
159	0,386668	7,318666	41,77245	64,7308	8,428203	18,92753
162	0,331652	7,338153	41,78039	64,86255	8,486575	22,12607
165	0,276533	7,354483	41,78518	64,97243	8,544068	26,59528
168	0,221329	7,36774	41,78779	65,06126	8,600848	33,28857
171	0,166057	7,377986	41,78902	65,1297	8,657069	44,43046
174	0,110733	7,385271	41,78948	65,17824	8,712877	66,69431
177	0,055375	7,389629	41,78958	65,20722	8,768412	133,4467
180	-1,84E-06	7,391079	41,78959	65,21686	8,823814	-4015448

Результати розрахунку параметрів вільної обертової краплі для $K_c=1,9$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
3	0,055113	0,001443	6,89E-06	0,009549	0,055138	0,026191
6	0,110206	0,00578	0,00011	0,038261	0,110408	0,05245
9	0,165262	0,01303	0,00056	0,086334	0,165945	0,078845
12	0,22026	0,023225	0,001775	0,154104	0,221887	0,105446
15	0,275183	0,036414	0,004349	0,242051	0,278378	0,132327
18	0,33001	0,052658	0,009062	0,350809	0,335567	0,159565
21	0,384722	0,072037	0,016885	0,481183	0,393616	0,187244
24	0,439299	0,094649	0,029001	0,634168	0,452698	0,215454
27	0,49372	0,120613	0,046819	0,810974	0,513003	0,244294
30	0,547965	0,150073	0,072004	1,013057	0,574739	0,273873
33	0,602012	0,183202	0,106502	1,242163	0,638139	0,304317
36	0,655839	0,220207	0,152588	1,50038	0,703466	0,335764
39	0,709421	0,261335	0,212913	1,790204	0,771021	0,368379
42	0,762733	0,306885	0,290577	2,114632	0,841149	0,402348
45	0,815749	0,357213	0,389219	2,477274	0,914258	0,437896
48	0,868437	0,412758	0,513136	2,88251	0,990825	0,475289
51	0,920762	0,474053	0,667449	3,335698	1,071426	0,514849
54	0,972686	0,541758	0,858326	3,843451	1,156759	0,556971
57	1,024159	0,616698	1,093295	4,414038	1,247684	0,602151
60	1,075121	0,699922	1,381683	5,057935	1,345283	0,651017
63	1,125495	0,79278	1,735261	5,788631	1,450937	0,704384
66	1,175173	0,897044	2,16919	6,623818	1,566444	0,763329
69	1,224004	1,015087	2,70345	7,587182	1,694203	0,829317
72	1,271755	1,150163	3,365038	8,711157	1,837487	0,90439
75	1,318057	1,306827	4,191343	10,04115	2,000869	0,99148
78	1,362271	1,491563	5,235123	11,6418	2,190844	1,09491
81	1,403227	1,713533	6,570456	13,60444	2,416586	1,221137
84	1,438671	1,984556	8,2926	16,04706	2,689948	1,379437
87	1,464361	2,314222	10,47907	19,06611	3,020651	1,580363
90	1,474115	2,691589	13,04397	22,55522	3,398187	1,825901
93	1,464361	3,068956	15,60887	26,04434	3,775723	2,095765
96	1,438671	3,398622	17,79534	29,06339	4,106426	2,362335
99	1,403227	3,669645	19,51748	31,50601	4,379788	2,615147
102	1,362271	3,891614	20,85282	33,46865	4,60553	2,856711
105	1,318057	4,076351	21,8966	35,06929	4,795506	3,092697
108	1,271755	4,233014	22,7229	36,39929	4,958887	3,328482
111	1,224004	4,36809	23,38449	37,52327	5,102172	3,568691
114	1,175173	4,486134	23,91875	38,48663	5,229931	3,817424

117	1,125495	4,590397	24,35268	39,32182	5,345438	4,07856
120	1,075121	4,683255	24,70626	40,05251	5,451091	4,356026
123	1,024159	4,766479	24,99465	40,69641	5,54869	4,654044
126	0,972686	4,84142	25,22962	41,267	5,639616	4,977374
129	0,920762	4,909124	25,42049	41,77475	5,724948	5,331588
132	0,868437	4,970419	25,57481	42,22794	5,805549	5,723411
135	0,815749	5,025964	25,69872	42,63317	5,882116	6,161166
138	0,762733	5,076293	25,79736	42,99582	5,955225	6,655395
141	0,709421	5,121842	25,87503	43,32024	6,025354	7,21975
145	0,637922	5,17575	25,95216	43,69952	6,114916	8,113447
148	0,58402	5,211438	25,99411	43,94778	6,179569	8,923391
151	0,529904	5,243323	26,02526	44,16766	6,242387	9,894847
154	0,475598	5,2716	26,04779	44,36114	6,303621	11,08415
157	0,421123	5,296432	26,06354	44,52986	6,363496	12,57693
160	0,366499	5,317954	26,07408	44,67518	6,422214	14,51016
163	0,311746	5,336278	26,08074	44,79825	6,479958	17,11738
166	0,256885	5,351496	26,08465	44,89999	6,536897	20,83225
169	0,201935	5,36368	26,08669	44,98115	6,593188	26,56141
172	0,146915	5,372889	26,08759	45,04231	6,648979	36,57136
175	0,091845	5,379165	26,08789	45,0839	6,704413	58,56797
178	0,036743	5,382536	26,08794	45,10621	6,759624	146,4921
180	2,48E-07	5,383177	26,08794	45,11045	6,796374	21697417

Результати розрахунку параметрів вільної обертової краплі для $K_c=1,96$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
3	0,053423	0,001399	6,27E-06	0,008972	0,053448	0,026191
6	0,106817	0,005602	0,0001	0,035944	0,107013	0,052446
9	0,160151	0,012625	0,000509	0,081077	0,160813	0,078832
12	0,213394	0,022495	0,001613	0,144646	0,21497	0,105415
15	0,266516	0,035251	0,00395	0,227041	0,269607	0,132265
18	0,319483	0,050943	0,008218	0,328777	0,324857	0,159456
21	0,372262	0,069637	0,015287	0,450499	0,380855	0,187065
24	0,424816	0,09141	0,026203	0,592998	0,437748	0,215177
27	0,477108	0,116358	0,042201	0,757224	0,495693	0,243882
30	0,529097	0,144592	0,06472	0,944301	0,554859	0,273281
33	0,580736	0,176244	0,095418	1,155556	0,615434	0,303484
36	0,631976	0,211469	0,136194	1,39254	0,677621	0,334616
39	0,68276	0,250449	0,189212	1,65706	0,741648	0,366818
42	0,733025	0,293392	0,25693	1,951223	0,807767	0,400248
45	0,782697	0,340544	0,342139	2,277475	0,876263	0,43509
48	0,831689	0,392189	0,447998	2,638653	0,947457	0,471557
51	0,879898	0,448657	0,578085	3,038052	1,021713	0,509896
54	0,9272	0,510328	0,736446	3,479479	1,099444	0,550397
57	0,973443	0,577643	0,927644	3,967329	1,181122	0,593403
60	1,018436	0,651105	1,156803	4,506636	1,267277	0,639319
63	1,061942	0,731284	1,429621	5,103101	1,358509	0,688628
66	1,10366	0,818808	1,752326	5,763058	1,455479	0,741903
69	1,143203	0,914351	2,131521	6,4933	1,558893	0,799815
72	1,180078	1,01858	2,573806	7,300664	1,669465	0,863147
75	1,213659	1,132074	3,085058	8,191204	1,787837	0,932777
78	1,243174	1,255166	3,669166	9,168741	1,914432	1,009647
81	1,267704	1,387713	4,326124	10,23266	2,049245	1,094666
84	1,286249	1,528805	5,049645	11,37512	2,191567	1,188576
87	1,297854	1,676515	5,825104	12,5787	2,339749	1,29176
90	1,30181	1,827876	6,629332	13,81606	2,491179	1,404104
93	1,297854	1,979237	7,433561	15,05343	2,642609	1,525008
96	1,286249	2,126947	8,20902	16,25701	2,790791	1,653604
99	1,267704	2,268039	8,93254	17,39947	2,933113	1,789091
102	1,243174	2,400585	9,589498	18,46339	3,067926	1,931014
105	1,213659	2,523677	10,17361	19,44092	3,194521	2,079395
108	1,180078	2,637171	10,68486	20,33146	3,312893	2,234744
111	1,143203	2,741401	11,12714	21,13883	3,423465	2,398001
114	1,10366	2,836943	11,50634	21,86907	3,526879	2,570487

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7
117	1,061942	2,924468	11,82904	22,52903	3,623849	2,753886
120	1,018436	3,004646	12,10186	23,12549	3,715081	2,950256
123	0,973443	3,078108	12,33102	23,6648	3,801236	3,162085
126	0,9272	3,145423	12,52222	24,15265	3,882913	3,392388
129	0,879898	3,207095	12,68058	24,59407	3,960645	3,644847
132	0,831689	3,263563	12,81067	24,99347	4,034901	3,924017
135	0,782697	3,315208	12,91653	25,35465	4,106095	4,235619
138	0,733025	3,36236	13,00173	25,6809	4,174591	4,586963
141	0,68276	3,405303	13,06945	25,97507	4,24071	4,987554
144	0,631976	3,444282	13,12247	26,23959	4,304737	5,450024
147	0,580736	3,479507	13,16325	26,47657	4,366924	5,991551
150	0,529097	3,51116	13,19394	26,68782	4,427498	6,636142
153	0,477108	3,539394	13,21646	26,8749	4,486665	7,418427
156	0,424816	3,564341	13,23246	27,03913	4,54461	8,390313
159	0,372262	3,586114	13,24338	27,18163	4,601503	9,633318
162	0,319483	3,604808	13,25045	27,30335	4,657501	11,28326
165	0,266516	3,620501	13,25471	27,40509	4,71275	13,58457
168	0,213394	3,633257	13,25705	27,48748	4,767388	17,02603
171	0,160151	3,643127	13,25816	27,55105	4,821545	22,74808
174	0,106817	3,650149	13,25856	27,59618	4,875345	34,17194
177	0,053423	3,654352	13,25866	27,62315	4,92891	68,40348
179,9979	-1,84E-07	3,655752	13,25866	27,63213	4,982358	-2E+07

Результати розрахунку параметрів вільної обертової краплі для $K_c=2$

φ	x_c	z_c	V_c	S_c	l_c	z_c/x_c
1	2	3	4	5	6	7
3	0,052354	0,001371	5,90E-06	0,008617	0,052378	0,02619
6	0,104672	0,005489	9,45E-05	0,034515	0,104864	0,052444
9	0,156917	0,012369	0,000479	0,077836	0,157566	0,078824
12	0,209054	0,022033	0,001517	0,138821	0,210597	0,105396
15	0,261043	0,034517	0,003711	0,21781	0,26407	0,132228
18	0,312844	0,049864	0,007714	0,315251	0,318103	0,15939
21	0,364417	0,068131	0,014335	0,431702	0,372822	0,186958
24	0,415717	0,089384	0,024542	0,567842	0,428356	0,215012
27	0,466697	0,113705	0,039471	0,724481	0,484846	0,243638
30	0,517304	0,141188	0,060434	0,90257	0,542442	0,272931
33	0,567483	0,171945	0,088932	1,103217	0,601303	0,302996
36	0,61717	0,206102	0,126662	1,327701	0,661605	0,333947
39	0,666296	0,243807	0,175535	1,577491	0,72354	0,365914
42	0,714779	0,285227	0,237686	1,854266	0,787314	0,399042
45	0,762528	0,330552	0,315493	2,159935	0,853158	0,433495
48	0,809436	0,379999	0,411586	2,496655	0,921322	0,469461
51	0,855378	0,433808	0,528862	2,866854	0,992083	0,507153
54	0,900204	0,492248	0,670487	3,273234	1,065744	0,546819
57	0,943737	0,555615	0,839885	3,718773	1,142632	0,588739
60	0,985762	0,624225	1,040705	4,206691	1,223099	0,633241
63	1,02602	0,69841	1,276745	4,740377	1,307513	0,680698
66	1,064199	0,778498	1,551817	5,323245	1,396246	0,731534
69	1,099918	0,864788	1,86951	5,958486	1,489648	0,78623
72	1,132728	0,957506	2,232822	6,648663	1,588011	0,84531
75	1,162099	1,05674	2,643618	7,39512	1,691512	0,909337
78	1,187431	1,162352	3,10191	8,197188	1,800132	0,978879
81	1,208082	1,273882	3,605014	9,05125	1,913571	1,054467
84	1,223413	1,390458	4,146792	9,949893	2,031164	1,13654
87	1,23287	1,510749	4,71729	10,8815	2,15184	1,225392
90	1,236068	1,633019	5,303164	11,83072	2,274165	1,32114
93	1,23287	1,755288	5,889038	12,77993	2,396491	1,423742
96	1,223413	1,875579	6,459537	13,71154	2,517166	1,53307
99	1,208082	1,992155	7,001314	14,61018	2,634759	1,649023
102	1,187431	2,103686	7,504418	15,46424	2,748199	1,771627
105	1,162099	2,209298	7,96271	16,26631	2,856819	1,901127
108	1,132728	2,308531	8,373506	17,01277	2,960319	2,038027
111	1,099918	2,401249	8,736818	17,70294	3,058682	2,183115
114	1,064199	2,487539	9,054511	18,33819	3,152085	2,337477

Продовження табл. Б.5

1	2	3	4	5	6	7
117	1,02602	2,567628	9,329583	18,92105	3,240817	2,502512
120	0,985762	2,641812	9,565623	19,45474	3,325231	2,67997
123	0,943737	2,710422	9,766443	19,94266	3,405698	2,872011
126	0,900204	2,773789	9,935841	20,3882	3,482586	3,081289
129	0,855378	2,832229	10,07747	20,79458	3,556247	3,311085
132	0,809436	2,886038	10,19474	21,16478	3,627009	3,565491
135	0,762528	2,935485	10,29084	21,5015	3,695173	3,849674
138	0,714779	2,98081	10,36864	21,80716	3,761017	4,170255
141	0,666296	3,02223	10,43079	22,08394	3,824791	4,53587
144	0,61717	3,059935	10,47967	22,33373	3,886725	4,958008
147	0,567483	3,094092	10,5174	22,55821	3,947028	5,45231
150	0,517304	3,124849	10,54589	22,75886	4,005889	6,040642
153	0,466697	3,152332	10,56686	22,93695	4,063484	6,754564
156	0,415717	3,176653	10,58179	23,09359	4,119974	7,64138
159	0,364417	3,197906	10,59199	23,22973	4,175509	8,775398
162	0,312844	3,216173	10,59861	23,34618	4,230227	10,28043
165	0,261043	3,23152	10,60262	23,44362	4,284261	12,37928
168	0,209054	3,244004	10,60481	23,52261	4,337734	15,51756
171	0,156917	3,253668	10,60585	23,58359	4,390764	20,73491
174	0,104672	3,260548	10,60623	23,62692	4,443467	31,1502
177	0,052354	3,264666	10,60632	23,65281	4,495953	62,35765
180	-2,14E-06	3,266037	10,60633	23,66143	4,548333	-1529703

Додаток В.1

Текст підпрограми для розв'язку системи диференційних рівнянь числовим методом Рунге-Кутта 4-го порядку

```

unit RKutta;
interface
uses classes, math, difur, typeconst, sysutils, UListPoints, dialogs;
procedure ClearList(Points:tlist);
procedure EnumRunge(Points:tlistpoints;aData:tRungeData);
procedure RungeStep(aData:tRungeData;var ResData:tRungeRes);
var dFi1,dFi2,dFi3,dFi4,  dX1, dX2, dX3, dX4,  dZ1, dZ2, dZ3, dZ4,
    dV1, dV2, dV3, dV4,  dS1, dS2, dS3, dS4,  dfip2,dxp2,ha6:tnumber;
implementation
uses MisCalcFormU, AdvancU;
procedure ClearList(Points:tlist);
var i:integer;
begin
  for i:=points.Count-1 downto 0 do begin
    freemem(points.Items[i],sizeRungeRes); end;{forb}points.Clear;
end;{proc}
var fi,roundfi:tnumber;nearpi2,nearpi_down,merid,nearendangle:boolean;
procedure EnumRunge(Points:tlistpoints;aData:tRungeData);
label NextK,NextVol,exit,next;
var ResData,ResData2:tRungeRes; i,md,maxi:integer;
vpResdata:pRungeRes;
MisCalc,MiscalcV,MisCalcx,MisCalcS,MisCalcFi:tnumber; acceptpoint:boolean;
procedure NextPoint(var AcceptPoint:boolean);label next,next1,done;
var counter:word;
begin adata.lastpoint:=false;nearendangle:=false;
fi:=adata.Fi;nearpi2:=false;merid:=false;nearpi_down:=false;counter:=10000;
next:adata.SaveData(0);rungestep(adata,resdata);

```

```

if (resdata.Fi>=vpi)or(resdata.Fi<=0)or(adata.ha=0) then begin
adata.lastpoint:=true; adata.LoadData(0);
adata.ha:=adata.ha*c05;goto next; end;{ifb}
if adata.lastpoint then
if (vpi-resdata.Fi<cParAccur)or(resdata.Fi<cParAccur) then begin goto done;
end {ifb}else begin counter:=counter-1;
if counter=0 then goto done else goto next;end;
roundfi:=round((resdata.Fi)/cpi180)*cpi180;
if (nearpi2)or (advancedform.OnlyMultiply and (resdata.Fi-
roundfi>cParAccur)and(roundfi<>0)
and((resdata.Fi>roundfi)and(fi<roundfi))) then begin nearpi2:=true;
if resdata.Fi>roundfi then adata.LoadData(0); adata.ha:=adata.ha*c05;
if abs(resdata.Fi-roundfi)>cParAccur then goto next else goto done; end;
if (nearpi_down)or(advancedform.OnlyMultiply and (roundfi-
resdata.Fi>cParAccur)and(roundfi<>0)
and((resdata.Fi<roundfi)and(fi>roundfi))) then begin nearpi_down:=true;
if resdata.Fi<roundfi then adata.LoadData(0); adata.ha:=adata.ha*c05;
if abs(resdata.Fi-roundfi)>cParAccur then goto next else goto done;end;
if (nearendangle)or(((resdata.Fi>adata.EndAngle)and(fi<adata.EndAngle))or
((resdata.Fi<adata.EndAngle)and(fi>adata.EndAngle)))and(abs(resdata.Fi-
adata.EndAngle)>cParAccur) then begin nearendangle:=true;
if ((resdata.Fi>adata.EndAngle)and(fi<adata.EndAngle))or
((resdata.Fi<adata.EndAngle)and(fi>adata.EndAngle)) then adata.LoadData(0);
adata.ha:=adata.ha*c05;
if abs(resdata.Fi-adata.EndAngle)>cParAccur then goto next else goto done; end;
adata.LoadData(0);adata.ha:=adata.ha*c05;rungestep(adata,resdata2);
rungestep(adata,resdata2);miscalc:=abs(c1615*(resdata2.za-resdata.za));
miscalcx:=abs(c1615*(resdata2.xa-resdata.xa));
miscalcV:=abs(c1615*(resdata2.Volumea-resdata.Volumea));
MisCalcFi:=abs(c1615*(resdata2.fi-resdata.fi));

```

```

MisCalcS:=abs(c1615*(resdata2.areaa-resdata.areaa));
if miscalc<miscalcx then miscalc:=miscalcx;
if miscalc<miscalcfi then miscalc:=miscalcfi;
if miscalc<miscalcs then miscalc:=miscalcs;
if miscalc<miscalcv then miscalc:=miscalcv;
  if (miscalc<adata.MinP) then begin  adata.LoadData(0);
  if adata.ha>=adata.Maxha then goto next1;  adata.ha:=adata.ha*2;
  goto next;end;
  if miscalc>adata.MaxP then begin  adata.LoadData(0);  adata.ha:=adata.ha/3;
  goto next;end;
next1: adata.loaddata(0); adata.SaveData(0);rungestep(adata,resdata);
adata.loaddata(0);adata.ha:=adata.ha*c05;rungestep(adata,resdata2);
rungestep(adata,resdata2);adata.LoadData(0);
miscalc:=c1615*(resdata2.Fi-resdata.Fi);
adata.MisCalcFi:=adata.MisCalcFi+abs(c1615*(resdata2.fi-resdata.fi));
adata.MisCalcXa:=adata.MisCalcXa+abs(c1615*(resdata2.xa-resdata.xa));
adata.MisCalcza:=adata.MisCalcza+abs(c1615*(resdata2.za-resdata.za));
adata.MisCalcv:=adata.MisCalcv+abs(c1615*(resdata2.Volumea-
resdata.Volumea));
  adata.MisCalcArea:=adata.MisCalcarea+abs(c1615*(resdata2.areaa-
resdata.areaa));
done:acceptpoint:=adata.lastpoint or nearpi2 or nearendangle or nearpi_down;
adata.Xa:=resdata.Xa;adata.Za:=resdata.Za;adata.Volumea:=resdata.Volumea;
adata.Areaa:=resdata.areaa;adata.Fi:=resdata.Fi;adata.La:=resdata.La;end;{proc}
begin adata.InitStep;nextVol:nextK:i:=0;adata.Reset;adata.ErrorCode:=0;
repeat nextpoint(acceptpoint);inc(i);
  if i mod 10000=0 then if assigned(adata.CallBackProc)then begin
    adata.DotsProcessed:=i;  adata.CallBackProc;end;{ifb}until adata.stoprepeat;
miscalcform.CountPoints:=i;md:=(i-adata.MaxDots) div adata.MaxDots+1;
maxi:=i;i:=0;adata.Reset;adata.ErrorCode:=0;points.StartPoint.Xa:=adata.Xa;

```

```

points.StartKurvature:=adata.K;points.StartHa:=adata.ha;
points.StartPoint.Fi:=adata.Fi;miscalcformu.ex:=0;miscalcformu.ez:=0;
miscalcformu.ev:=0;miscalcformu.es:=0;miscalcformu.efi:=0;
repeat nextpoint(acceptpoint);inc(i);
if acceptpoint or ((i=1)or(i=maxi)or((i mod md)=0))and(not
advancedform.OnlyMultiply) then begin
points.AddPoint(adata.xa,adata.za,adata.volumea,adata.areaa,adata.fi,adata.La);end;
if i mod 10000=0 then if assigned(adata.CallBackProc)then begin
adata.DotsProcessed:=i; adata.CallBackProc;end;{ifb}
if advancedform.EnumCalcErrors then begin enumerror(adata); end;{ifb}
until adata.stoprepeat;maxi:=points.Count;
for i:=points.Count-1 downto 0 do begin
if abs(points[i].Fi-adata.EndAngle)<cParAccur then begin maxi:=i+1;
if not adata.firstangle then break; end;{ifb} end;{forb}
for i:=points.Count-1 downto maxi do begin points.Delete(i); end;{forb}
points.EndPoint.Xa:=points[points.Count-1].Xa;
points.EndPoint.Za:=points[points.Count-1].Za;
points.EndPoint.Volumea:=points[points.Count-1].Volumea;
points.EndPoint.areaa:=points[points.Count-1].Areaa;
points.EndPoint.Fi:=points[points.Count-1].Fi;
points.EndPoint.la:=points[points.Count-1].la;
points.EndKurvature:=adata.K;points.EndHa:=adata.ha;
points.Miscalcs.Xa:=adata.MisCalcXa;points.Miscalcs.Za:=adata.MisCalcZa;
points.Miscalcs.Volumea:=adata.MisCalcV;
points.Miscalcs.areaa:=adata.MisCalcArea;
points.Miscalcs.Fi:=adata.MisCalcFi;exit:end;{proc}
procedure RungeStep(aData:tRungeData;var ResData:tRungeRes);
begin begin
dFi1:=adata.PartdFi(adata.Za,adata.Xa,adata.Fi,adata)*adata.ha;
dX1:=adata.PartdX(adata.Fi)*adata.ha;dZ1:=adata.PartdZ(adata.Fi)*adata.ha;

```



```

dV1:=adata.PartdV(adata.Xa,adata.Fi);dS1:=adata.partdarea(adata.Xa);
dfip2:=dfi1*c05+adata.fi;dxp2:=dx1*c05+adata.xa;
dFi2:=adata.PartdFi(adata.Za+dz1*c05,dxp2,dfip2,adata)*adata.ha;
dX2:=adata.PartdX(dfip2)*adata.ha;dZ2:=adata.PartdZ(dfip2)*adata.ha;
dV2:=adata.PartdV(dxp2,dfip2);ds2:=adata.partdarea(dxp2);
dfip2:=dfi2*c05+adata.fi;dxp2:=dx2*c05+adata.xa;
dFi3:=adata.PartdFi(adata.Za+dz2*c05,dxp2,dfip2,adata)*adata.ha;
dX3:=adata.PartdX(dfip2)*adata.ha;dZ3:=adata.PartdZ(dfip2)*adata.ha;
dV3:=adata.PartdV(dxp2,dfip2);ds3:=adata.partdarea(dxp2);
dfip2:=adata.Fi+dfi3;//dxp2:=Xa+dx3;dxp2:=dx3+adata.xa;
dFi4:=adata.PartdFi(adata.Za+dz3,dxp2,dfip2,adata)*adata.ha;
dX4:=adata.PartdX(dfip2)*adata.ha;dZ4:=adata.PartdZ(dfip2)*adata.ha;
dV4:=adata.PartdV(dxp2,dfip2);ds4:=adata.partdarea(dxp2);ha6:= 1/6;
adata.Xa:=adata.Xa+(dx1+dx2+dx2+dx3+dx3+dx4)*ha6;
adata.Za:=adata.Za+(dz1+dz2+dz2+dz3+dz3+dz4)*ha6;
adata.Fi:=adata.Fi+(dfi1+dfi2+dfi2+dfi3+dfi3+dfi4)*ha6;
adata.Volumea:=adata.Volumea+(dv1+dv2+dv2+dv3+dv3+dv4)*ha6*adata.ha;
adata.areaa:=adata.areaa+(ds1+ds2+ds2+ds3+ds3+ds4)*ha6*adata.ha;
adata.La:=adata.La+adata.ha;
resdata.Xa:=adata.xa;resdata.Za:=adata.Za;resdata.Fi:=adata.Fi;
resdata.Volumea:=adata.Volumea;resdata.areaa:=adata.areaa;
resdata.La:=adata.La;end; end; end.

```

Додаток В.2

Текст підпрограми для розв'язку системи рівнянь (1.9)

```

unit Difur;
interface
uses TypeConst, sysutils, controls, dialogs;
type tProcedure=procedure; tSaveData=record
Za,Xa,Fi,Volumea,ha,Areaa,La:tnumber;end;
tStoppedPoint=record countcrossing:integer;StopPoint:tstoppoint;end;
tRungeData=class
protected
ManualMode:boolean;aSaveData:array[0..1]of tSaveData;
aStopPoints:array[0..127]of tStoppedPoint;
procedure AddStopPoint(Xa,Za,K:tnumber;CountCrossing:integer);
public
StopCheck,lastpoint,FirstAngle:boolean;ErrorCode:byte;
MaxDots,Iteration,MaxKi,Ki,DotsProcessed,CountStopPoints:integer;
CallBackProc:tProcedure;
MaxZa,MaxXa,Za,Xa,Fi,dVolumea,Volumea,La,ha,dVolume,K,AccuracyVol,Max
P,MinP,PrevV,PrevK,MisCalcFi,MisCalcXa,MisCalcZa,MisCalcV,Maxha,Areaa,MisC
alcArea,maxvolumea,EndAngle:tnumber;
maxvolpoint:trungeres;
procedure SaveData(DataIndex:word);procedure LoadData(DataIndex:word);
procedure ReadStopPoint(index: integer;var CountCrossing:integer;var Xa, Za,
K:tnumber);
procedure Reset;virtual;procedure ReduseToA;virtual;
function PartdFi(aParZ,aParX,aParFi:tnumber;aData:tRungeData):tnumber;virtual;
function PartdX(aPar:tnumber):tnumber;virtual;
function PartdZ(aPar:tnumber):tnumber;virtual;
function PartdArea(aParX:tnumber):tnumber;virtual;
function PartdV(aParX,aParFi:tnumber):tnumber;virtual;

```

```

procedure InitK;virtual;abstract;procedure Init;virtual;abstract;
procedure InitStep;virtual;abstract;function EnumK:boolean;virtual;abstract;
virtual;abstract;function StopRepeat:boolean;virtual;abstract;end; {tRungeData}
tSpinningDrop=class(tRungeData)
private   Sw,maxfi2,minr: boolean;Mm:integer;
Initia,dxa,MinX,MaxX,E,M,prevvolumea: tnumber;
public
lastVolumea:tnumber;procedure InitK;override;procedure Init;override;
procedure Initstep;override;procedure Reset;override;
function EnumK:boolean;override;function StopRepeat:boolean;override;end;
implementation
uses rkutta, math, ManualK;
procedure tRungeData.AddStopPoint(Xa, Za, K:tnumber; CountCrossing:integer );
begin  if countstoppoints=127 then countstoppoints:=0;
astoppoints[countstoppoints].countcrossing:=CountCrossing;
astoppoints[countstoppoints].StopPoint.Xa:=xa;
astoppoints[countstoppoints].StopPoint.Za:=za;
astoppoints[countstoppoints].StopPoint.K:=k;inc(countstoppoints);end;
procedure tRungeData.LoadData(DataIndex: word);
begin za:=aSavedata[dataindex].Za;xa:=aSavedata[dataindex].Xa;
ha:=aSavedata[dataindex].ha;fi:=aSavedata[dataindex].Fi;
la:=aSavedata[dataindex].la;areaa:=aSavedata[dataindex].areaa;
volumea:=aSavedata[dataindex].Volumea;end;
function tRungeData.PartdArea(aParX: tnumber): tnumber;
begin result:=2*vpi*aParX; end;
function tRungeData.PartdFi(aParZ, aParX, aParFi: tnumber;
aData: tRungeData): tnumber;var buf:tnumber;
begin  if aparx=0 then buf:=adata.K else buf:=sin(aparfi)/aparx;
result:=(adata.K-buf-0.5*sqr(aparx));end;
function tRungeData.PartdV(aParX, aParFi: tnumber): tnumber;

```

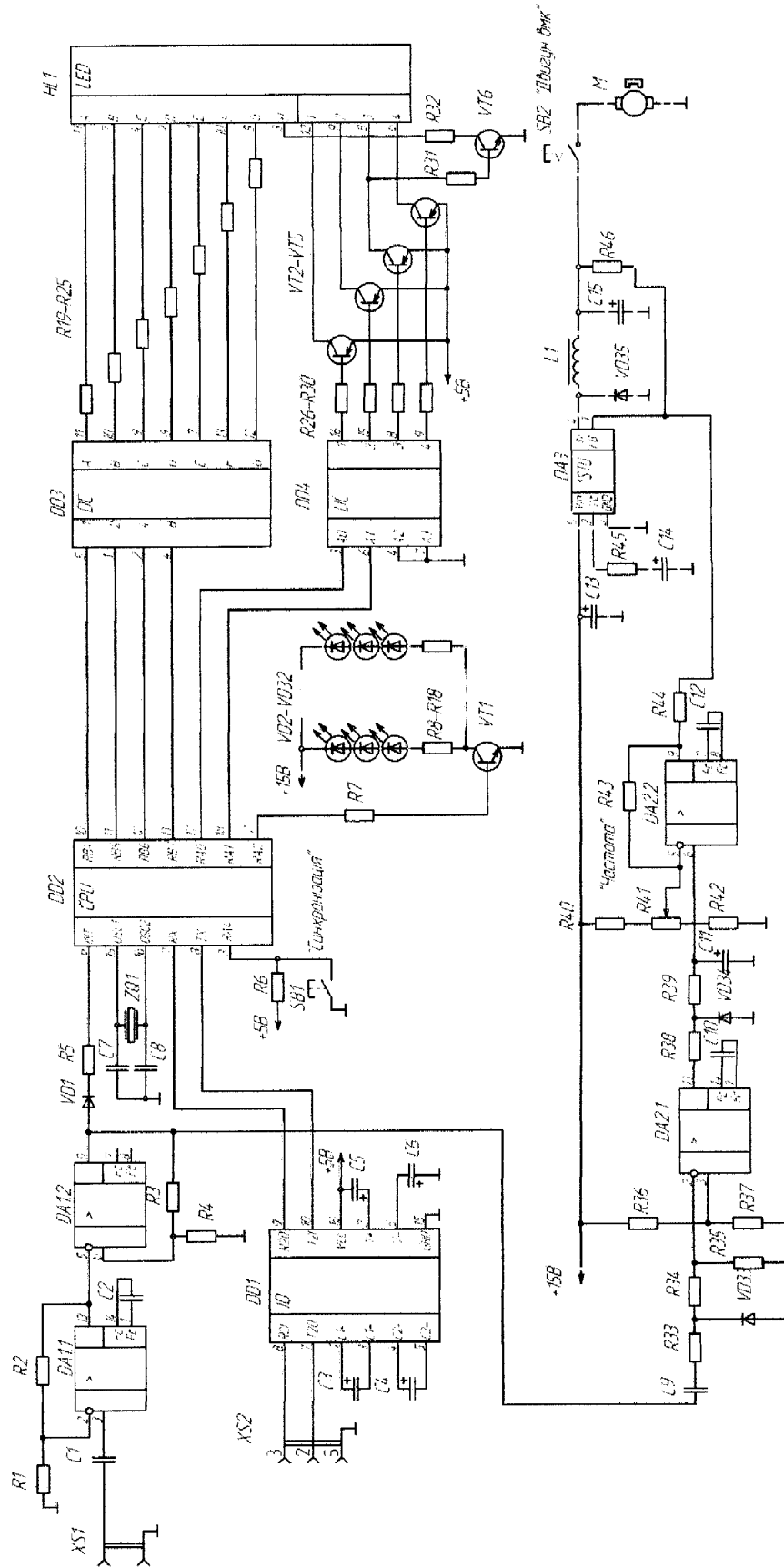
```

begin result:=vpi*sqr(aparx)*sin(aparfi);end;
function tRungeData.PartdX(aPar: tnumber): tnumber;begin result:=cos(apar);end;
function tRungeData.PartdZ(aPar: tnumber): tnumber;begin result:=sin(apar);end;
procedure tRungeData.ReadStopPoint(index: integer;var CountCrossing:integer;
var Xa, Za, K:tnumber); begin xa:=astoppoints[index].StopPoint.Xa;
za:=astoppoints[index].StopPoint.Za;k:=astoppoints[index].StopPoint.K;
CountCrossing:=astoppoints[index].countcrossing;end;
procedure tRungeData.ReduseToA;
begin dVolumea:=dVolume;end;procedure tRungeData.Reset;
begin Xa:=0;Za:=0;Fi:=0;Volumea:=0;areaa:=0;la:=0;miscalcFi:=0;
miscalcv:=0;miscalcxa:=0;miscalcza:=0;miscalcarea:=0;end;
procedure tRungeData.SaveData(DataIndex: word);
begin aSavedata[dataindex].Za:=za;aSavedata[dataindex].Xa:=xa;
aSavedata[dataindex].Fi:=fi;aSavedata[dataindex].Volumea:=volumea;
aSavedata[dataindex].areaa:=areaa;aSavedata[dataindex].ha:=ha;
aSavedata[dataindex].la:=la;end;
function tSpinningDrop.EnumK: boolean;label exit;begin end;
procedure tSpinningDrop.Init;begin errorcode:=0; initha:=ha;maxha:=0.1;end;
procedure tSpinningDrop.InitK;var buf2,Vol:tnumber;
begin if prevk=0 then begin Vol:=maxvolumea;
buf2:=sqrt(9*sqr(Vol)+power(maxXa,6)*sqr(vpi));
buf2:=power((3*vol+buf2)*sqr(vpi),c13);maxza:=buf2/vpi;
maxza:=maxza-sqr(maxxa)*vpi/buf2;
K:=4*maxza/(sqr(maxxa)+sqr(maxza));end else k:=prevk;
e:=power(10,trunc(log10(k)));mm:=1;m:=0;k:=m+mm*e;
if k=0 then showmessage('k=0');ki:=0;end;
procedure tSpinningDrop.Reset; begin inherited;ha:=initha;end;
function tSpinningDrop.StopRepeat: boolean;
begin result:=stopcheck or(fi>=vpi)or(fi<0)or lastpoint;end;end.

```

Додаток Д

Електрична принципова схема приладу ВМН-2



Додаток Е

Текст програми мікроконтролера для вимірювання частоти обертання трубки

```

#include "counter.h"
#int_EXT
void EXT_isr(void)
{++counter;--stroboscop;
if (0==stroboscop){stroboscop=10;
bit_set(copyporta,0);output_a(copyporta);
delay_us(10);bit_clear(copyporta,0);
output_a(copyporta);}}
#int_RDA
void RDA_isr(void) {command=getc();
data=getc();if (command==0x31){
putc(data);putc(data);}}
#int_TIMER1
void TIMER1_isr(void) {set_timer1(0x0bdb);copycounter=counter;
counter=0;updatetable=true;} void outtetr(char tetr){
copyportb=tetr;output_b(copyportb);
bit_set(copyportb,3);output_b(copyportb);delay_cycles(20);bit_clear(copyportb,3);
output_b(copyportb);}
void OutDigit(char digit,index){
digit=digit<<4;index=index<<1;
copyportb=copyportb&0b00001111;copyportb=copyportb|digit;
copyporta=copyporta&0b11111001;copyporta=copyporta|index;
output_b(copyportb);output_a(copyporta);}
void main(){
set_tris_a(0b11111000);set_tris_b(0b00001011);
copyporta=0;copyportb=0;digit0=8;digit1=8;digit2=8;digit3=8;
output_b(0);output_a(0);counter=0;
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_256);setup_wdt(WDT_18MS);

```

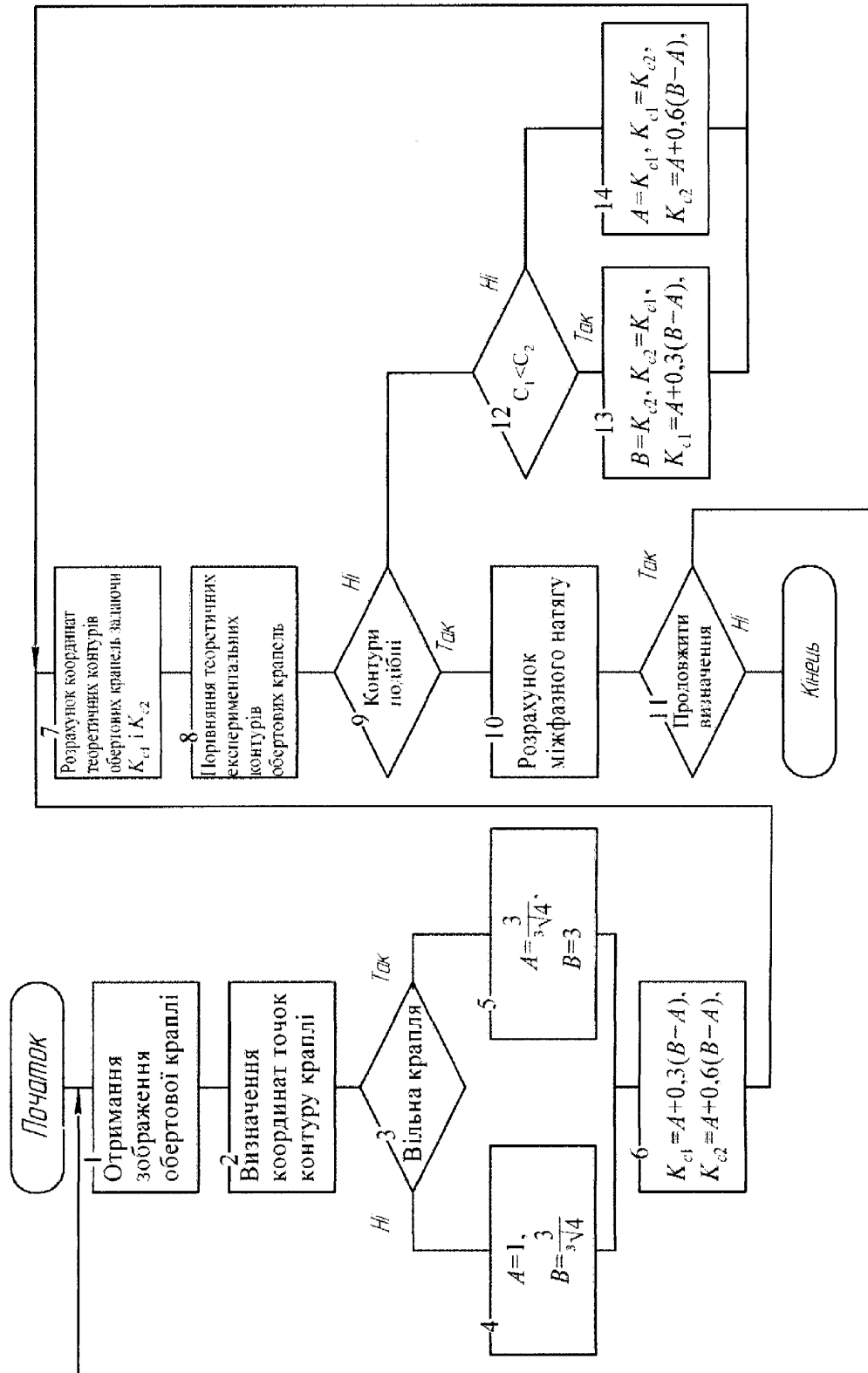
```

setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_4);
setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1); enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(INT_RDA); enable_interrupts(INT_TIMER1);
set_timer1(0x0bdb); enable_interrupts(GLOBAL);
updatetable=false;copycounter=0;stroboscop=1;buttonpushed=false;
pcounter=&copycounter;
while(true){restart_wdt();outdigit(digit0,0);delay_us(250);outdigit(digit1,1);
delay_us(250);if((digit2!=0)||((digit3!=0))){outdigit(digit2,2);delay_us(250);}
if(digit3!=0){outdigit(digit3,3);delay_us(250);}
if (updatetable){
updatetable=false;transfer=copycounter;transferhi=*(pcounter+1);putc(transfer);
putc(transferhi);copycounter1=copycounter;
templong=copycounter1/1000;digit3=templong;
templong=templong*1000;copycounter1=copycounter1-templong;
templong=copycounter1/100;digit2=templong;
templong=templong*100;copycounter1=copycounter1-templong;
digit1=copycounter1/10;templong=digit1*10;
copycounter1=copycounter1-templong;digit0=copycounter1;}
if (input_state(PIN_A5)&&(!buttonpushed)){
buttonpushed=true;++stroboscop;}
if(buttonpushed&&!input_state(PIN_A5)){
buttonpushed=false;}}}

```

Додаток Ж

Алгоритм визначення ДМН розчинів ПАР з регресійним способом розрахунку координат точок подібних теоретичних контурів вільних і фіксованих обертових крапель



Додаток И

Текст підпрограми для визначення МН методами вільної і фіксованої обертових крапель

```

procedure TSpnFrame.EnumActionExecute(Sender: TObject);
var
i:integer; h:string; z:real; r:real; kus:real; nom:integer;
ii:integer; aa:real; bb,SS1,SS2,SSX,SSZ:double;
A,B:Double; iii:integer; S1,ffd : Double; S2 : Double; U1 : Double;
U2 : Double; FU1 : Double; FU2 : Double; nextfu1,nextfu2:double;
N : Integer;
label exit,nextvol,exit1,c1,c2,1,2;
var useCompareResult:boolean; BestK,BestCompareResult:tnumber;
begin
clearpointslist;dots.Clear;cleartable;rungedata:=SpinningDrop;
es:=0;ex:=0;ez:=0;ev:=0;efi:=0;
begin
ksi:=backgroundpoints.EndPoint.Fi; N:=40;
Label6.Caption:=floattostr(radtodeg(ksi)); r:=3/power(4,1/3);
h:=floattostrf(r,ffgeneral,8,2); z:=strtofloat(h);
A:=1.3; B:=z; S1 := (3-Sqrt(5))/2; S2 := (Sqrt(5)-1)/2;
U1 := A+S1*(B-A); U2 := A+S2*(B-A); ku:=U1;
clearpointslist; fillrungedata; rungedata.Init;
enumrunge(points,rungedata); DeletePoints; compareprofiles;
bestk:=ku;
bestcompareresult:=compareresult;
fu1:=compareresult; ku:=U2; clearpointslist;
fillrungedata; rungedata.Init; enumrunge(points,rungedata);
DeletePoints; compareprofiles; fu2:=compareresult;
iii:=1;i:=0; usecompareresult:=true;

```

```

while i<=N do
begin
if FU1<=FU2 then
begin
B := U2; U2 := U1; FU2 := FU1; U1 := A+S1*(B-A); ku:=U1;
clearpointslst; fillrangedata; rangedata.Init;
enumrunge(points,rangedata); DeletePoints;
compareprofiles;
usecomparerresult:=usecomparerresult    and    (comparerresult>0.05){(abs(fu1-
comparerresult)/comparerresult>0.0001)};
fu1:=ifthen(usecomparerresult,comparerresult,
abs(((points.EndPoint.Xa)/(points.EndPoint.Za))-
((backgroundpoints.EndPoint.Xa)/(backgroundpoints.EndPoint.Za))));
bestk:=ifthen(bestcomparerresult>=fu1,ku,bestk);
bestcomparerresult:=ifthen(bestcomparerresult>=fu1,fu1,bestcomparerresult);
end
else
begin
A := U1; U1 := U2; FU1 := FU2; U2 := A+S2*(B-A); ku:=U2;
clearpointslst; fillrangedata; rangedata.Init;
enumrunge(points,rangedata); DeletePoints;
compareprofiles;
usecomparerresult:=usecomparerresult    and(comparerresult>0.05){(abs(fu2-
comparerresult)/comparerresult>0.0001)};
fu2:=ifthen(usecomparerresult,comparerresult,
abs(((points.EndPoint.Xa)/(points.EndPoint.Za))-
((backgroundpoints.EndPoint.Xa)/(backgroundpoints.EndPoint.Za))));
bestk:=ifthen(bestcomparerresult>=fu2,ku,bestk);
bestcomparerresult:=ifthen(bestcomparerresult>=fu2,fu2,bestcomparerresult);
end;


```

```
Inc(i);
end;
maxvolumea:=rungedata.Volumea;
end;{forb}
exit: ku:=bestk;
clearpointlist; fillrungedata; rungedata.Init;
enumrunge(points,rungedata); DeletePoints;
compareprofiles; showpoints;
{      if      backgroundpoints.Count>0      then      begin
resultlabel.Caption:=resultlabel.Caption+#10#13+'CA='+floattostrf(compareresult,ffgen
eral,15,15);
end;}{ifb}
saveenum.Enabled:=true;
end;
```

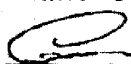
Додаток К

Методика метрологічної атестації зразкових зображень обертових крапель

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової
роботи ІФНТУНГ
_____ О. Карпан
"20" 10 2010р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

В.о. генерального директора
ДП "Івано-Франківськстандартметрологія"
_____ В. Соколовський
"15" 10 2010р.

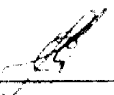


Стандартний зразок обертової краплі

(СЗОК-2)

Програма і методика метрологічної атестації

СЗОК-2.00.00.000 ПІМА

Керівник д/т Д6-10П


_____ І. Кісіль
"20" 09 2010р.Начальник відділу наукового та
метрологічного забезпечення вимірювань
_____ П. Джочко
"14" 10 2010р.Молодший науковий
співробітник д/т Д6-10П
_____ В. Біліщук
"16" 09 2010р.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Ця програма і методика метрологічної атестації поширюється на стандартні зразки обертових крапель, які використовують для атестації приладу для вимірювання міжфазного натягу рідин ВМН-2, і встановлює зміст та методику метрологічної атестації.

1.2 Призначення стандартних зразків обертових крапель

Стандартні зразки обертових крапель призначені для перевірки і метрологічної атестації приладів ВМН-2.

1.3 Мета метрологічної атестації

Метою метрологічної атестації є визначення метрологічних характеристик стандартних зразків обертової краплі.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Під час метрологічної атестації стандартних зразків обертової краплі необхідно проводити експериментальне визначення метрологічних характеристик в об'ємі і послідовності, які зазначені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Операції атестації

Назва операції	Пункт методики	Засоби вимірювальної техніки	Примітка
1	2	3	4
1 Зовнішній огляд	3.1		
2 Визначення метрологічних характеристик зразкових зображень	3.2	Інструментальний мікроскоп ИМЦЛ 100х50, діапазон вимірювання довжин 0 – 50 мм, похибка вимірювання лінійних розмірів $\pm 0,003$ мм.	

СЗОК-2.00.00.000 ПМА

2.2 Під час проведення метрологічної атестації можна використовувати інші типи засобів вимірювальної техніки, які мають аналогічні вказаним в таблиці 2.1 метрологічні характеристики.

2.3 При проведенні метрологічної атестації повинні витримуватись наступні умови:

- температура навколишнього повітря (20 ± 5) °С;
- відносна вологість повітря від 30 до 80 %;
- відсутність вібрацій, тряски, ударів.

2.4 Для контролю умов проведення метрологічної атестації необхідно використовувати гігрометр психрометричний ВИТ-1 (діапазон вимірювання температури від 0 до 50 °С, похибка вимірювання $\pm 0,2$ °С; діапазон вимірювання вологості від 10 до 100%).

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Зовнішній огляд

3.1.1 Стандартні зразки обертових крапель входять в комплект поставки приладу для вимірювання міжфазного натягу ВМН-2. Загальний вигляд стандартних зразків обертових крапель приведений в додатку А. Їхні характеристики в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри стандартних зразків обертової краплі

Позначення зразка	Характеристики зразка		
	Значення міжфазного натягу, мН/м	Частота, об/с	Різниця густин фаз, кг/м ³
1	2	3	4
СЗОК-2-Ф-10-25-180	10	25	180
СЗОК-2-Ф-10-50-180	10	50	180
СЗОК-2-Ф-10-80-180	10	80	180
СЗОК-2-Ф-5-25-180	5	25	180
СЗОК-2-Ф-5-50-180	5	50	180
СЗОК-2-Ф-5-80-180	5	80	180

СЗОК-2.00.00.000 ПМА

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
СЗОК-2-Ф-1-25-180	1	25	180
СЗОК-2-Ф-1-50-180	1	50	180
СЗОК-2-Ф-1-80-180	1	80	180
СЗОК-2-Ф-0,5-25-180	0,5	25	180
СЗОК-2-Ф-0,5-50-180	0,5	50	180
СЗОК-2-Ф-0,5-80-180	0,5	80	180
СЗОК-2-Ф-0,1-25-180	0,1	25	180
СЗОК-2-В-10-25-180	10	25	180
СЗОК-2-В-10-50-180	10	50	180
СЗОК-2-В-10-80-180	10	80	180
СЗОК-2-В-5-25-180	5	25	180
СЗОК-2-В-5-50-180	5	50	180
СЗОК-2-В-5-80-180	5	80	180
СЗОК-2-В-1-25-180	1	25	180
СЗОК-2-В-1-50-180	1	50	180
СЗОК-2-В-1-80-180	1	80	180
СЗОК-2-В-0,5-25-180	0,5	25	180
СЗОК-2-В-0,5-50-180	0,5	50	180
СЗОК-2-В-0,5-80-180	0,5	80	180
СЗОК-2-В-0,1-25-180	0,1	25	180
СЗОК-2-В-0,1-50-180	0,1	50	180

3.1.2 Стандартні зразки обертових крапель не повинні мати зовнішні пошкодження і дефекти. Стандартні зразки, які не задовольняють вказаним вимогам подальшій атестації не підлягають.

3.2 Визначення метрологічних характеристик стандартних зразків обертової краплі

3.2.1 Визначення похибки лінійних розмірів стандартних зразків

3.2.2 Перевірку стандартних зразків проводять за допомогою інструментального мікроскопа ИМЦЛ 100х50.

3.2.3 Підготовлюють мікроскоп до роботи згідно його інструкції по експлуатації.

3.2.4 На координатний стіл мікроскопу поміщують стандартний зразок обертової краплі таким чином, щоб в полі зору мікроскопу знаходилась горизонтальна лінійка на стандартному зразку.

3.2.5 За допомогою мікроскопа вимірюють відстань між сусідніми лініями лінійки на стандартному зразку.

3.2.6 Визначають середнє арифметичне значення результату вимірювання за формулою:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i, \quad (4.1)$$

де l_i – виміряні значення відстаней між сусідніми лініями лінійки на стандартному зразку, n – кількість вимірювань ($n=20$).

3.2.7 Визначають сумарну похибку вимірювання за формулою:

$$\Delta_l = \frac{1,672}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2 / (n-1)}. \quad (4.2)$$

3.2.8 Розміщують на координатному столі мікроскопа стандартний зразок обертової краплі таким чином, щоб в полі зору мікроскопа була вертикальна лінійка стандартного зразка. Дослід згідно п. 3.2.5 – 3.2.7 повторюють для вертикальної лінійки.

3.2.9 За похибку лінійних розмірів стандартного зразка обертової краплі вибирають найбільше значення із визначених похибок і заносять в табл. додатку Б.

4 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АТЕСТАЦІЇ

4.1 При позитивних результатах метрологічної атестації на атестовані стандартні зразки обертових крапель оформляють атестат по формі згідно додатку Б.

4.2 При негативних результатах метрологічної атестації стандартних зразків обертової краплі оформляють протокол, в який вносять одержані результати, зауваження та висновки про непридатність стандартних зразків обертової краплі до застосування з відповідним обґрунтуванням.

ДОДАТОК А

Загальний вигляд стандартних зразків обертових крапель



Стандартний зразок
з вигнутим дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з випуклим дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з вигнутим дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з випуклим дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з вигнутим дном



Стандартний зразок
з плоским дном



Стандартний зразок
з випуклим дном



Стандартний зразок
з плоским дном

СЗОК-2.00.00.000 ПМА

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Форма атестата

АТЕСТАТ № _____

На стандартні зразки обертових кранель СЗОК-2-Ф-10-25-180,
 СЗОК-2-Ф-10-50-180, СЗОК-2-Ф-10-80-180, СЗОК-2-Ф-5-25-180, СЗОК-2-Ф-5-50-180,
 СЗОК-2-Ф-5-80-180, СЗОК-2-Ф-1-25-180, СЗОК-2-Ф-1-50-180, СЗОК-2-Ф-1-80-180,
 СЗОК-2-Ф-0,5-25-180, СЗОК-2-Ф-0,5-50-180, СЗОК-2-Ф-0,5-80-180, СЗОК-2-Ф-0,1-25-180,
 СЗОК-2-В-10-25-180, СЗОК-2-В-10-50-180, СЗОК-2-В-10-80-180, СЗОК-2-В-5-25-180,
 СЗОК-2-В-5-50-180, СЗОК-2-В-5-80-180, СЗОК-2-В-1-25-180, СЗОК-2-В-1-50-180,
 СЗОК-2-В-1-80-180, СЗОК-2-В-0,5-25-180, СЗОК-2-В-0,5-50-180, СЗОК-2-В-0,5-80-180,
 СЗОК-2-В-0,1-25-180, СЗОК-2-В-0,1-50-180

виготовлене _____

(назва підприємства-виробника)

належить _____

(назва підприємства)

Позначення зразка	Похибка	Позначення зразка	Похибка
1	2	3	4
СЗОК-2-Ф-10-25-180		СЗОК-2-В-10-25-180	
СЗОК-2-Ф-10-50-180		СЗОК-2-В-10-50-180	
СЗОК-2-Ф-10-80-180		СЗОК-2-В-10-80-180	
СЗОК-2-Ф-5-25-180		СЗОК-2-В-5-25-180	
СЗОК-2-Ф-5-50-180		СЗОК-2-В-5-50-180	
СЗОК-2-Ф-5-80-180		СЗОК-2-В-5-80-180	
СЗОК-2-Ф-1-25-180		СЗОК-2-В-1-25-180	
СЗОК-2-Ф-1-50-180		СЗОК-2-В-1-50-180	
СЗОК-2-Ф-1-80-180		СЗОК-2-В-1-80-180	
СЗОК-2-Ф-0,5-25-180		СЗОК-2-В-0,5-25-180	
СЗОК-2-Ф-0,5-50-180		СЗОК-2-В-0,5-50-180	
СЗОК-2-Ф-0,5-80-180		СЗОК-2-В-0,5-80-180	
СЗОК-2-Ф-0,1-25-180		СЗОК-2-В-0,1-25-180	
		СЗОК-2-В-0,1-50-180	

СЗОК-2.00.00.000 ПМА

На основі результатів первинної (періодичної, позачергової) атестації, проведеної _____

назва організації або підрозділу, який проводив атестацію

в зв'язку з _____

чим обумовлено проведення атестації

" ____ " _____ 20__ р., встановлено, що виробувальне обладнання відповідає вимогам нормативно-технічної документації і допускається до використання.

Строк дії атестата " ____ " _____ 20__ р.

М. П.

Підпис керівника організації, яка проводила атестацію

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Ця програма і методика метрологічної атестації поширюється на прилад для вимірювання міжфазного натягу рідин ВМН-2 і встановлює зміст та методику метрологічної атестації.

Найменування виробу у відповідності з основним конструкторським документом – прилад для вимірювання міжфазного натягу рідин ВМН-2 (далі – прилад ВМН-2).

1.2 Призначення ВМН-2

Прилад ВМН-2 призначений для вимірювання міжфазного натягу на межі розділу водних розчинів поверхнево-активних речовин-нафта. Вимірювання міжфазного натягу рідин здійснюється в лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища від +15 до –30°C і вологості повітря від 30 до 90%.

1.3 Мета метрологічної атестації

Метою метрологічної атестації є визначення метрологічних характеристик приладу ВМН-2.

2 РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

2.1 Прилади ВМН-2 представляють на метрологічну атестацію разом з комплектом технічної документації, який включає:

- технічне завдання;
- програма і методика метрологічної атестації приладу ВМН-2 (ВМН-2.00.00.000 ПМА);
- паспорт на прилад для вимірювання міжфазного натягу рідин ВМН-2 (ВМН-2.00.00.000 ПС).

2.2 Під час розгляду технічної документації перевіряють:

- відповідність нормованих значень метрологічних та технічних характеристик приладу ВМН-2, який атестується, вимогам технічних умов (ВМН-2.00.00.000 ТУ);
- експлуатаційну документацію на прилад ВМН-2 з точки зору зручності для

застосування та безпеки експлуатації приладу ВМН-2:

- обґрунтування вибраних методів та засобів повірки приладу ВМН-2;
- перевірка повноти, правильності та способу вираження метрологічних характеристик;
- перевірка повноти та правильності вибраних методів та засобів повірки.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Під час метрологічної атестації приладу ВМН-2 необхідно проводити експериментальне визначення метрологічних характеристик в об'ємі і послідовності, які зазначені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Операції атестації

Назва операції	Пункт методики	Засоби вимірювальної техніки, що застосовуються під час атестації	Примітка
1	2	3	4
1 Зовнішній огляд	4.1		
2 Опробування	4.2		
3 Визначення метрологічних характеристик пристрою вимірювання частоти	4.3	Генератор ГЗ-113 (діапазон задавання частоти 10 Гц – 100 кГц амплітудою вих. сигналу 0,1В–10В). Частотомір ЧЗ-44 (діапазон вимірювання частоти 0,1–60МГц, похибка вимірювання частоти $\pm 0,00001$, напруга вхідного сигналу 10мВ–10В)	
4 Перевірка оптичної системи приладу	4.4	Калібр з сіткою (крок сітки 1 мм, похибка лінійних розмірів $\pm 0,01$ мм)	

ВМН-2.00.00.000 ПМА

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
5 Визначення приведеної похибки вимірювання міжфазного натягу	4.5	Стандартні зразки обертових кранель (похибка лінійних розмірів $\pm 0.5\%$), конусоподібний калібр (похибка лінійних розмірів ± 0.01 мм)	
6 Дослідна перевірка методики повірки	п. 6 методики повірки	п.2 методики повірки ВМН-2.00.00.000 МП	

3.2 Для виконання операцій опробування і визначення метрологічних характеристик приладу ВМН-2 необхідно додатково використовувати: етиловий спирт, хромову суміш (двохромовий калій), дистильовану воду, авіаційний бензин.

3.3 Під час проведення метрологічної атестації можна використовувати інші типи засобів вимірювальної техніки, які мають аналогічні вказаним в таблиці 3.1 метрологічні характеристики.

3.4 При проведенні метрологічної атестації використовують IBM-сумісний персональний комп'ютер.

3.5 Всі використовувані засоби вимірювальної техніки повинні мати діючі свідоцтва про повірку, свідоцтво про метрологічну атестацію або атестати.

3.6 При проведенні метрологічної атестації повинні дотримуватися наступні умови:

- температура навколишнього повітря (20 ± 5) °С;
- відносна вологість повітря від 30 до 90 %;
- атмосферний тиск - від 86,0 до 106 кПа (від 645 до 800 мм. рт. ст.);
- відсутність вібрацій, тряски, ударів, зовнішні магнітні і електричні полів, які впливають на роботу приладу.

3.7 Для контролю умов проведення метрологічної атестації використовують:

- гігрометр психрометричний ВІТ-1 (діапазон вимірювання температури від

ВМН-2.00.00.000 ПМА

0 до 50 °С, похибка вимірювання ± 0.2 °С; діапазон вимірювання вологості від 10 до 100%);

- барометр БАММ-1 (діапазон вимірювання тиску від 80 до 106 кПа, похибка ± 200 Па).

4 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Зовнішній огляд

4.1.1 Комплект поставки приладу повинен відповідати комплекту, який вказаний в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Комплект поставки приладу ВМН-2

№ п/п	Назва	Кількість
1	2	3
1	Прилад ВМН-2	1
2	Тара (футляр)	1
3	Скляна трубка	3
4	Набір пробок	2
5	Калібр з сіткою	1
6	Конусоподібний калібр	1
7	Рівень	1
8	Кабель для підключення генератора і частотоміра	1
9	Кабель для підключення приладу до персонального комп'ютера	1
10	Набір стандартних зразків обертових кранель	1
11	Диск з програмним забезпеченням	1
12	Паспорт на прилад ВМН-2.00.00.000 ПС	1
13	Методика перевірки приладу ВМН-2.00.00.000 МП	1

4.1.2 Блоки приладу не повинні мати зовнішніх пошкоджень і дефектів. Прилад, який не задовольняє вказаним вимогам, подальшій атестації не підлягає.

4.1.3 На задній стінці електронного і механічного блоків приладу повинна

бути табличка, яка містить: назву підприємства-виробника, умовне позначення приладу, номер приладу, рік виготовлення приладу.

4.1.4 Маркування і надписи повинні бути нанесені способом, який забезпечує їх чіткість і збереження під час строку експлуатації приладу.

4.2 Опробування

4.2.1 При опробуванні проводять перевірку органів керування і блоків приладу вцілому.

4.2.2 Вмикають прилад кнопкою "Мережа". При ввімкненні приладу повинно загорітись цифрове табло, на якому спочатку протягом 1с повинно індикуватись число "888.8", після чого покази табло повинні змінитись на "0,0".

4.2.3 Здійснюють горизонтування механічного блоку приладу. Для цього встановлюють на основу механічного блоку рівень і за допомогою ніжок блоку відрегульовують нахил механічного блоку так, щоб бульбашка повітря в рівні розміщувався по центру шкали рівня.

4.2.4 Переконуються в працездатності механізму обертання трубки і пристрою вимірювання частоти. Для цього вмикають електродвигун кнопкою "Двигун ВМК" і, змінюючи частоту його обертання за допомогою ручки "Частота", відслідковують зміну показів пристрою вимірювання частоти обертання трубки приладу.

4.2.5 Перевіряють працездатність пристрою стробоскопічного освітлювача трубки. Для цього вмикають двигун, через візор фотоапарата перевіряють наявність статичного зображення патрона зі скляною трубкою. При натисканні на кнопку "Синхронізація" зображення патрона у візирі фотоапарата повинно змінюватись відповідно до іншого положення патрона в момент освітлення.

4.2.6 Якщо в процесі опробування прилад не витримає однієї із перевірок, прилад підлягає ремонту і повторного проходження опробування в повному об'ємі.

4.2.7 При позитивних результатах опробування здійснюють метрологічну атестацію приладу.

4.3 Визначення метрологічних характеристик пристрою вимірювання частоти

4.3.1 Визначення похибки вимірювання частоти обертання трубки проводять шляхом порівняння показів частотоміра і пристрою вимірювання частоти обертання трубки приладу.

4.3.2 Перевірку пристрою вимірювання частоти обертання трубки приладу проводять за допомогою генератора ГЗ-113 і частотоміра ЧЗ-44.

4.3.3 До електронного блоку приладу через з'єднувач підключають генератор ГЗ-113 і частотомір ЧЗ-44 згідно схеми додатку А.

4.3.4 Перевірку пристрою вимірювання частоти здійснюють на частотах 200, 500, 800 і 1000 Гц, яку відраховують по таблицю частотоміра ЧЗ-44. Напругу на виході генератора ГЗ-113 задають 0,1; 0,2; 0,3 В для кожного значення частоти обертання трубки.

4.3.5 За допомогою генератора ГЗ-113 подають на вхід електронного блоку сигнал напругою 0,1В і частотою 200Гц.

4.3.6 За допомогою частотоміра ЧЗ-44 вимірюють частоту на вході електронного блоку.

4.3.7 Визначають частоту обертання трубки приладу 10 разів при незмінній частоті сигналу на виході генератора ГЗ-113.

4.3.8 Визначають середнє арифметичне значення результату вимірювання за формулою:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad (4.1)$$

де f_i – значення i -го вимірювання частоти, n – кількість вимірювань ($n=10$).

4.3.9 Визначають середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення частоти:

$$\sigma_{\bar{f}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 / (n-1)}. \quad (4.2)$$

4.3.10 Операції п.п. 4.3.6 – 4.3.9 повторюють для інших значень частот і напруг вхідного сигналу, вказаних в п. 4.3.4.

4.3.11 За середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення частоти вибирають найбільше значення із усіх визначених середніх квадратич-

них відхилень.

4.4 Перевірка оптичної системи приладу

4.4.1 Перевірку оптичної системи приладу проводять шляхом порівняння розрахованого значення коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу із значенням, занесеним в паспорт приладу.

4.4.2 Перевірку оптичної системи приладу проводять за допомогою калібру з сіткою і персонального комп'ютера.

4.4.3 Знімають з вала двигуна патрон, попередньо викрутивши гвинти з нього за допомогою викрутки. Включають освітлювач приладу, натиснувши на одну секунду кнопку "Синхронізація".

4.4.4 Встановлюють на скло освітлювача калібр з сіткою таким чином, щоб лінії сітки при спостереженні їх через візир фотоапарату були строго вертикальними або строго горизонтальними.

4.4.5 Відрегулюють чіткість зображення сітки у візирі фотоапарата за допомогою вузла фокусування приладу.

4.4.6 Фотографують калібр з сіткою за допомогою фотоапарата приладу.

4.4.7 Завантажують програмне забезпечення до приладу в пам'ять персонального комп'ютера. В меню "Калібрування" програмного забезпечення вибирають команду "Визначення коефіцієнта перетворення". У вікні, яке відкриється натискають кнопку "Завантажити...". В діалоговому вікні вибирають файл із зображенням калібрувальної сітки.

4.4.8 Визначення коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу здійснюють у п'яти зонах зображення, розміщених так, як це показано в додатку Б. В кожній зоні, за допомогою вказівника маніпулятора типу "миша" комп'ютера, відраховують кількість точок зображення, яка відповідає двом сусіднім лініям сітки у вертикальному і горизонтальному напрямках використовуючи координати вказівника, які відображається у статусному рядку вікна програми. Відрахована кількість точок зображення відповідає коефіцієнту перетворення оптичної системи приладу.

4.4.9 Розраховують абсолютну похибку перетворення оптичної системи при-

ладу за формулою:

$$\Delta K_n = \pm (K_n - K_{ном}). \quad (4.3)$$

де K_n – визначений коефіцієнт перетворення, $K_{ном}$ – значення коефіцієнта перетворення оптичної системи згідно із паспортом приладу (197 піксел/мм). Розраховану абсолютну похибку заносять в табл. додатку В.

4.4.10 За абсолютну похибку перетворення оптичної системи приладу вибирають найбільше отримане значення з усіх розрахованих похибок для різних зон зображення сітки.

4.5 Визначення приведеної похибки вимірювання міжфазного натягу

4.5.1 Визначення основної приведеної похибки приладу здійснюють шляхом порівняння визначеного значення міжфазного натягу за допомогою зразкового зображення обертової краплі із значенням, яке нанесене на зразковому зображенні.

4.5.2 В трубку, яка заповнена дистильованою водою встановлюють конусоподібний калібр.

4.5.3 Трубку з конусоподібним калібром встановлюють в патрон і приводять в обертання з частотою 30–80 об/с.

4.5.4 Натискаючи кнопку "Синхронізація", отримують зображення конусоподібного калібра у фотоапараті.

4.5.5 Відрегулюють чіткість зображення калібра у візирі фотоапарата за допомогою вузла фокусування приладу і фотографують калібр.

4.5.6 Завантажують програмне забезпечення до приладу в пам'ять персонального комп'ютера. В меню "Калібрування" програмного забезпечення вибирають команду "Оптичне збільшення". У вікні, яке відкріється, натискають кнопку "Завантажити...". В діалоговому вікні вибирають файл із зображенням конусоподібного калібра. Програма автоматично визначить коефіцієнт оптичного збільшення скляної трубки при різних розмірах обертової краплі. У випадку, коли програма не зможе автоматично визначити коефіцієнт оптичного збільшення скляної трубки повторюють дії п.п. 4.5.5 – 4.5.6.

4.5.7 Знімають з вала двигуна патрон так, як це описано в п. 4.4.3.

4.5.8 Визначення міжфазного натягу для кожного стандартного зразка обертової краплі здійснюють 10 разів.

4.5.9 На скло освітлювача поміщують стандартний зразок обертової краплі.

4.5.10 Вмикають підсвітку трубки приладу, натиснувши кнопку "Синхронізація" на одну секунду.

4.5.11 Відрегулюють чіткість зображення обертової краплі у візирі фотоапарата за допомогою вузла фокусування приладу і фотографувати його.

4.5.12 Визначають значення міжфазного натягу за допомогою програмного забезпечення до приладу. Для цього виконують наступні дії. Завантажують програмне забезпечення до приладу в пам'ять персонального комп'ютера. В меню "Зображення" вибирають команду "Завантажити з камери". В двох наступних діалогових вікнах вказують файл із сфотографованим зразковим зображенням обертової краплі і робочу папку для файлів програми. В меню "Зображення" вибирають команду "Відкрити". В наступному діалоговому вікні вказують файл із зразковим зображенням обертової краплі у робочій папці. У відповідних вікнах редагування записують різницю густин і частоту, які вказані на стандартному зразку обертової краплі. В меню "Натяг" вибирають команду "Статичний". Визначене значення міжфазного натягу повинне відобразитись у вікні програми.

4.5.13 Визначають середнє арифметичне значення результату вимірювання за формулою:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i, \quad (4.4)$$

де σ_i – значення i -го вимірювання міжфазного натягу, n – кількість вимірювань ($n=10$).

4.5.14 Визначають середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення міжфазного натягу:

$$\sigma_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 / (n-1)}. \quad (4.5)$$

4.5.15 Знаходять суму середньо квадратичних відхилень середнього арифметичного значення частоти і середнього арифметичного значення міжфазного натягу

гу за формулою:

$$\sigma_{\sigma\Sigma} = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_{\sigma}^2}. \quad (4.6)$$

де σ_f – найбільше значення середнє квадратичного відхилення середнього арифметичного значення частоти.

4.5.16 Розраховують сумарну відносну похибку вимірювання міжфазного натягу за формулою:

$$\delta\sigma = \frac{1,808 \cdot \sigma_{\sigma\Sigma}}{\sigma_{em}}, \quad (4.7)$$

де σ_{em} – значення міжфазного натягу на стандартному зразку обертової краплі.

4.5.17 Розраховують згідно п.п. 4.5.9 – 4.5.16 відносну похибку для інших стандартних зразків обертової краплі.

4.5.18 За основну відносну похибку приладу приймають найбільше значення відносної похибки вимірювання міжфазного натягу. Розраховану похибку заносять в табл. додатку В.

5 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АТЕСТАЦІЇ

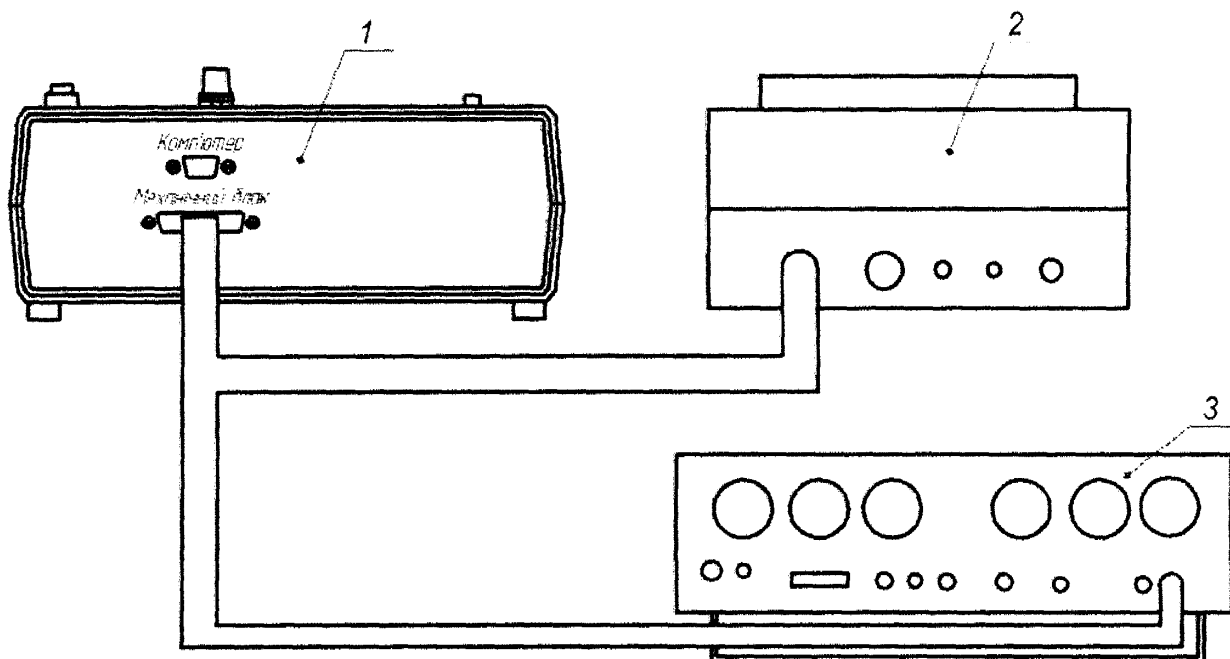
5.1 При позитивних результатах метрологічної атестації на атестовані приладі ВМН-2 оформляють свідоцтво про метрологічну атестацію по формі згідно додатку В.

5.2 При негативних результатах метрологічної атестації приладу ВМН-2 оформляють протокол, в якій вносять одержані результати, зауваження та висновки про непридатність приладу ВМН-2 до застосування з відповідним обґрунтуванням.

5.3 Свідоцтво про метрологічну атестацію підлягає обліку і його зберігають протягом усього періоду експлуатації приладу ВМН-2.

ДОДАТОК А

Схема підключення генератора і частотоміра до електронного блоку приладу
ВМН-2

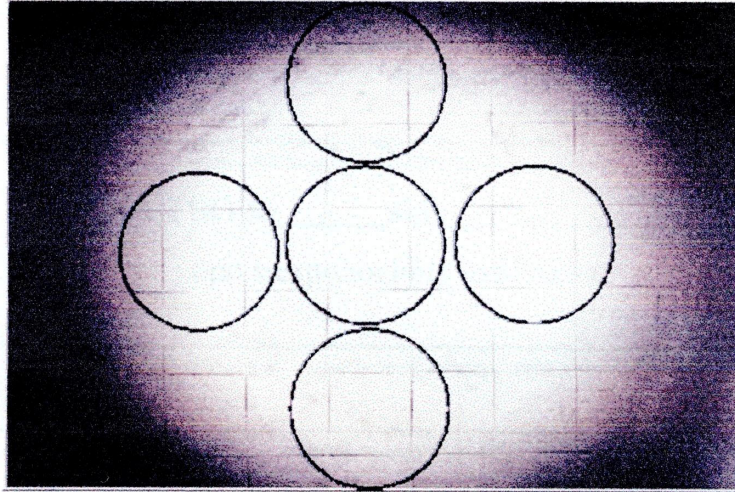


1 – електронний блок приладу ВМН-2; 2 – частотомір ЧЗ-44;

3 – генератор ГЗ-113

ДОДАТОК Б

Зони контролю коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу на зображенні калібру з сіткою



ДОДАТОК В
(обов'язковий)

Форма свідоцтва про метрологічну атестацію

(назва організації, яка провела атестацію)

СВІДОЦТВО № _____ від _____ р.

про метрологічну атестацію

назва, позначення, порядковий номер, дата виготовлення

Виробник _____

(назва підприємства)

Належить _____

(назва підприємства або організації)

Призначення _____

ствела характеристика об'єкту для якого

призначенні засіб вимрювальної техніки

Результати метрологічних досліджень

Назва метрологічної характеристики	Одержане значення метрологічної характеристики	Тип (клас, розряд) зразкових засобів
Визначення абсолютної похибки вимірювання частоти приладу		
Перевірка оптичної системи приладу		
Визначення приведеної похибки вимірювання міжфазного натягу		

За результатами метрологічної атестації (протокол № _____
від _____ р. _____

позначення, порядковий номер

ВМН-2.00.00.000 ПМА

визнано таким, що відповідає _____
назва технічної документації.

_____ яка містить вимоги до метрологічних характеристик

Повірку проводити відповідно до _____
назва та позначення

_____ документа на повірку чи експлуатаційного документа.

_____ якій містить розділ "Повірка"

Повірку провести не пізніше _____ 20__ р.

М. П.

Керівник організації
(підприємства), яке про-
водило атестацію

підпис, прізвище, ініціали

Додаток М

Паспорт на прилад ВМН-2

Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЗАТВЕРДЖЕНО
 Проректор з наукової
 роботи ІФНТУНГ
 _____ О. М. Карнаш
 "22" _____ 2010р.

ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ РІДИН

(ПРИЛАД ВМН-2)

Паспорт

ВМН-2.00.00.000 ПС

Керівник д/г Д6-10П

_____ І. Кісіль
 "22" _____ 2010р.

Молодший науковий

співробітник д/г Д6-10П

_____ В. Білішук
 "16" _____ 2010р.

ЗМІСТ

1	Призначення приладу ВМН-2.....	3
2	Технічні характеристики.....	3
3	Склад приладу ВМН-2.....	3
4	Підготовка приладу ВМН-2 до роботи.....	8
5	Проведення вимірювань міжфазного натягу приладом ВМН-2.....	9
6	Заходи безпеки.....	10
7	Технічне обслуговування.....	11
8	Можливі несправності приладу і способи їх усунення.....	11
9	Гарантії виготовлювача.....	12
10	Транспортування і зберігання.....	13
11	Методика повірки.....	13

					ВМН-2.00.00.000 ПС			
<i>Зм</i>	<i>Арж</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	Прилад ВМН-2	<i>Літера</i>	<i>Аржцш</i>	<i>Аржцшв</i>
<i>Разроб.</i>							20	2
<i>Перев.</i>					Паспорт	ІФНТУНГ		
<i>Н кантр.</i>								
<i>Затв.</i>								

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИЛАДУ ВМН-2

1.1 Прилад ВМН-2 призначений для вимірювання міжфазного натягу рідин межі розділу флюїд-нафта, які дозволяють залежно від конкретних фізико-хімічних властивостей вибирати оптимальний компонентний склад розчинів, які закачують в продуктивні пласти для інтенсифікації видобутку нафти.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1 Основні технічні характеристики приладу ВМН-2 наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики приладу ВМН-2

Показник	Значення
1. Діапазон вимірювання міжфазного натягу, мН/м	від 0,001 до 10
2. Основна приведена похибка вимірювання, %	не більше 1,5
3. Робоча температура, °С	15÷25 °С
4. Частота обертання краплі, оберти/хв.	від 5 до 6000
5. Термін безперервної роботи приладу, год.	8
6. Споживана потужність, В·А	40
7. Габаритні розміри, мм, не більше	350x350x400
8. Маса приладу, кг, не більше	20
9. Інтерфейси для підключення до ПК	RS-232, USB

3 СКЛАД ПРИЛАДУ ВМН-2

3.1 Комплект поставки приладу ВМН-2 приведений в табл. 2.

Таблиця 2 – Склад приладу ВМН-2

№ п/п	Назва	Кількість
1	2	3
1	Прилад ВМН-2	1
2	Тара (футляр)	1
3	Скляна трубка	3

					ВМН-2.00.00.000 ПС	Арх
Зм	Арх	№ докум	Підп	Дата		3

Продовження таблиці 2

1	2	3
4	Набір пробок	2
5	Калібр з сіткою	1
6	Конусоподібний калібр	1
7	Рівень	1
8	З'єднувач для підключення генератора і частото- міра	1
9	Кабель для під'єднання приладу до персонального комп'ютера	1
10	Диск з програмним забезпеченням	1
11	Набір стандартних зразків обертових крапель	1
12	Паспорт на прилад ВМН-2.00.00.000 ПС	1

3.2 Прилад ВМН-2 складається з електронного і механічного блоків.

3.3 На верхній панелі електронного блоку (рис. 1) розміщені: цифровий індикатор 1, регулятор частоти обертання двигуна 2, кнопка ввімкнення двигуна 3, кнопка ввімкнення живлення 4, кнопка синхронізації 5. На задній панелі електронного блоку (рис. 2) розміщені з'єднувачі для під'єднання персонального комп'ютера 1 і механічного блоку 2.

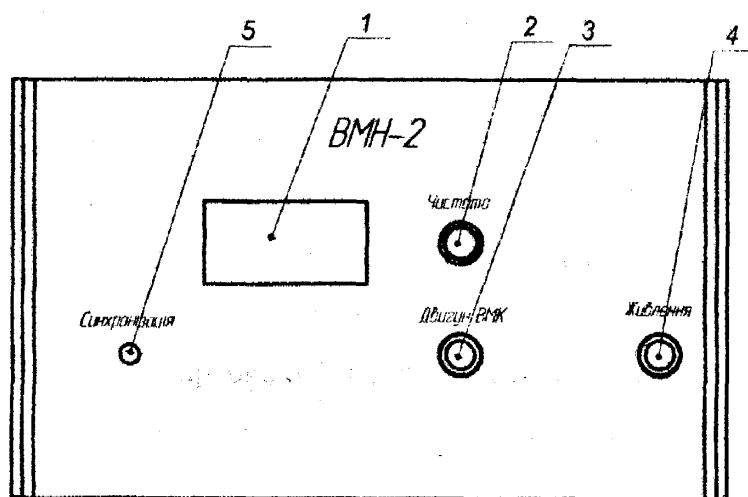


Рис. 1 – Панель електронного блоку

					ВМН-2.00.00.000 ПС	Арк
Зм.	Арк	№ док.	Підп.	Дата		4

3.4 На механічному блоці (рис. 3) знаходяться фотокамера 1, ручки 2 для наведення фотокамери 1 на чіткість, патрон 3, ручка 4 для витискання краплі.

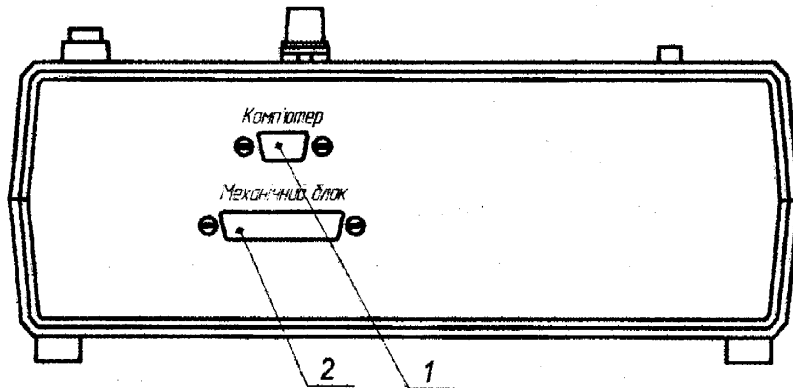


Рис. 2 – Задня панель електронного блоку

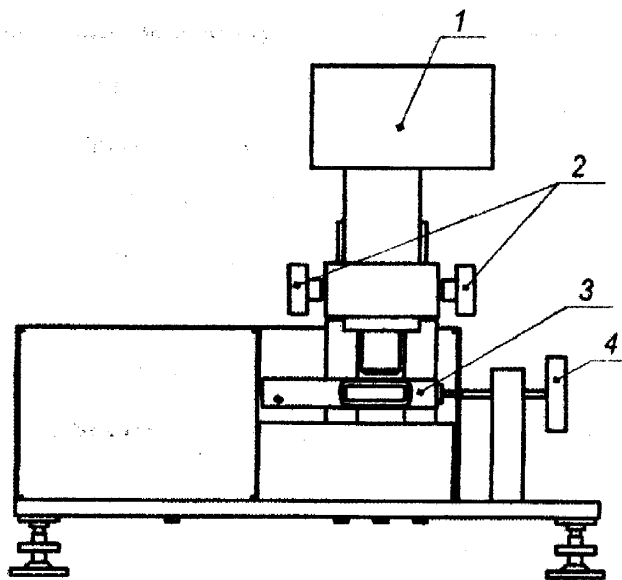


Рис. 3 – Загальний вигляд механічного блоку

3.5 Вимірювальна трубка приладу (рис. 4.) складається з скляної трубки 1, всередині якої встановлено пробку 2 з отвором. Пробка 2 розділяє скляну трубку 1 на камери 6 і 7, які заповнюють, відповідно, легшою і важчою рідинами. З одного боку в трубку встановлено поршень 3 і конусоподібну пробку 5. З іншого боку трубка 1 закрита пробкою 4. Пробка 4 всередині має порожнину і отвори, через які в порожнину може поступати важча рідина з камери 7. Також в пробці 4 є отвір, який призначений для відводу надлишку важчої рідини з камери 7.

						ВМН-2.00.00.000 ПС	АДК
Зм.	АДК	№ док.	Підп.	Дата			5

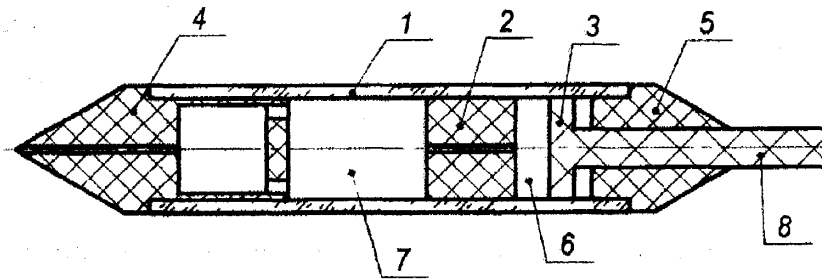


Рис. 4. Будова вимірювальної трубки

3.6 Структурна схема приладу ВМН-2 зображена на рис. 5. Структурна схема містить наступні блоки і вузли:

1 – електронний ключ, який забезпечує необхідну величину струму для живлення освітлювача 2;

2 – освітлювач, який забезпечує освітлення трубки з рідинами в певні моменти часу короткими спалахами світла. Освітлювач 2 живиться короткими імпульсами струму від електронного ключа 1 і забезпечує синхронне освітлення обертової краплі в трубці відносно положення вала двигуна;

3 – давач обертів двигуна 4 призначений для вироблення імпульсів, частота яких в 10 разів більша за частоту обертання вала двигуна 5, що забезпечує вимірювання частоти обертання вала двигуна з точністю до 0,1Гц;

4 – двигун постійного струму призначений для приведення в обертання трубки 14 з досліджуваними рідинами;

5 – вал двигуна, на якому механічно закріплюють патрон 9. За допомогою вала 5 приводиться в обертальний рух патрон 9 разом із скляною трубкою 14;

6 – тригер Шміта, який призначений для перетворення імпульсів довільної форми, які надходять з освітлювача 3 у імпульси прямокутної форми амплітудою 5 В;

7 – блок керування двигуном, який призначений для зміни і стабілізації частоти обертання вала 5 двигуна 4;

8, 10 – конусоподібні пробки, які призначені для закривання трубки 14 з обох боків;

9 – патрон призначений для механічного закріплення в ньому трубки з рідинами за допомогою гвинта 11;

						ВМН-2.00.00.000 ПС	Арж
Зм.	Арж	№ док.	Ліст.	Дата			6

11 – гвинт;

12 – важча рідина;

13 – крапля легшої рідини;

14 – скляна трубка;

15 – об'єктив, який забезпечує необхідне збільшення краплі 13;

16 – вузол фокусування, який призначений для переміщення об'єктива разом із фотокамерою 17 відносно трубки 14 для отримання чіткого зображення краплі 13 на світлочутливій матриці фотокамери 17;

17 – фотокамера, за допомогою якої отримують зображення краплі 13 в процесі її обертання.

18 – мікроконтролер, який здійснює вимірювання частоти обертання трубки 13, вироблення коротких імпульсів для електронного ключа 1, керування індикатором 19, передавання даних про значення частоти на персональний комп'ютер 20;

19 – блок індикації для оперативного контролю значення частоти обертання вала 5 двигуна 4;

20 – персональний комп'ютер, за допомогою якого здійснюється оброблення отриманих зображень з фотокамери 17 і визначення міжфазного натягу.

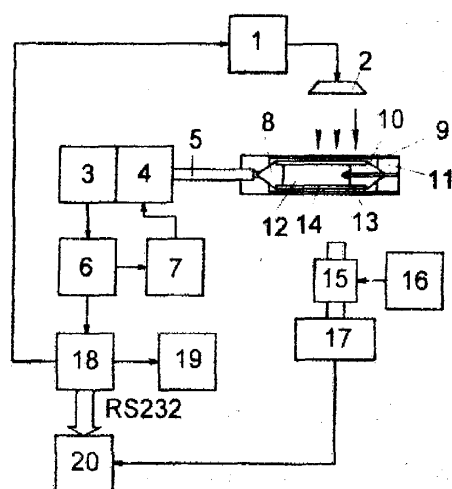


Рис. 5. Структурна схема приладу для вимірювання міжфазного натягу методом фіксованої обертової краплі

					ВМН-2.00.00.000 ПС	Арж
Зм	Арж	№ док-м	Підп.	Дата		7

4 ПІДГОТОВКА ПРИЛАДУ ВМН-2 ДО РОБОТИ

4.1 Перед роботою необхідно встановити на персональний комп'ютер програмне забезпечення до приладу за допомогою програми-інсталлятора із диску.

4.2 Промити і просушити скляну трубку і шприц. Для чого відкрутити з патрона гвинт і вийняти трубку з пробками, витягнути пробки з трубки. Трубку і пробки спочатку промити бензином, а потім гарячою водою до зникнення запаху бензину і витримати в хромовій суміші протягом 20 хв. Після цього трубку і пробки промити дистильованою водою, потім спиртом і знову промити дистильованою водою. Потім продуту повітрям трубку з пробками за допомогою гумової груші і встановити в сушильну шафу на 1 год при температурі 70 °С.

4.3 Визначити різницю густин досліджуваних рідин за допомогою пікнометрів або вимірювача густин рідин. Різницю рідин розраховують згідно наступної формули:

$$\Delta\rho = \rho_v - \rho_l, \quad (1)$$

де ρ_v , ρ_l – густина важчої і легшої рідин.

4.4 Здійснити горизонтування механічного блоку. Для цього поставити на основу механічного блоку рівень і за допомогою ніжок блоку відрегулювати нахил механічного блоку так, щоб пухирець повітря в рівні розмістився по центру шкали рівня.

4.5 До електронного блоку підключити механічний блок і персональний комп'ютер.

4.6 Ввімкнути прилад кнопкою "Мережа". При ввімкненні приладу повинно загорітись цифрове табло, на якому спочатку протягом 1с повинно індикуватись число "888,8" після чого покази табло повинні змінитись на "0,0".

4.7 Ввімкнути двигун кнопкою "Двигун ВМК" і регулятором "Частота" встановити частоту обертання двигуна в діапазоні 40–80 об/с.

4.8 Перевіряють працездатність пристрою стробоскопічного освітлювача трубки. Для цього вмикають двигун. Через візир фотоапарата перевіряють наявність статичного зображення патрона зі скляною трубкою. При натисканні на

					ВМН-2.00.00.000 ПС	Адж
Зм.	Адж	№ док.	Підп.	Дата		8

кнопку "Синхронізація" зображення патрона у візирі фотоапарата повинно змінюватись відповідно до іншого положення патрона в момент освітлення.

4.9 Дати приладу прогрітись впродовж 20 хв.

4.10 Ввімкнути фотокамеру приладу.

4.11 Градування приладу здійснюють наступним чином. В трубку, яка заповнена досліджуваною рідиною більшої густини встановити конусоподібний калібр і герметично закрити пробками. Трубку з конусоподібним калібром встановити в патрон, зафіксувати в ньому затискаючим гвинтом і привести в обертання з частотою 30–80 об/с. Натискаючи кнопку "Синхронізація" отримати зображення конусоподібного калібру у фотокамері. Відрегулювати чіткість зображення калібру у візирі фотокамери за допомогою ручок фокусування і сфотографувати калібр. Завантажити програмне забезпечення до приладу в пам'ять персонального комп'ютера. В меню "Калібрування" програмного забезпечення вибрати команду "Оптичне збільшення". У вікні, яке відкриється натиснути кнопку "Завантажити...". В діалоговому вікні вибрати файл із зображенням конусоподібного калібру. Програма автоматично визначить коефіцієнт оптичного збільшення скляної трубки при різних розмірах обертової краплі.

5 ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ ПРИЛАДОМ

ВМН-2

5.1 Заповнюють вимірювальну трубку приладу (рис. 5) наступним чином. Заповнити камеру 6 легшою рідиною. За допомогою поршня 3 з камери через отвір в пробці 2 витискають повітря доти доки легша рідина заповнить канал отвору в пробці 2. Заповнюють важчою рідиною камеру 7. Встановлюють пробку 4 в трубку 1 таким чином, щоб витиснути повітря з камери 7 через отвори в пробці 4. При цьому наявність пухирців повітря в порожнині пробки 4 є допустимим. З іншої сторони скляну трубку 1 закривають пробкою 5. Встановлюють заповнену трубку з рідинами у патрон і фіксують затискаючим гвинтом.

						ВМН-2.00.00.000 ПС	АПК
Зм.	АПК	№ докум.	Підп.	Дата			9

мірювальної трубки;

- не розбирати блоки приладу при подачі на них напруги живлення;
- забороняється розбирати блоки приладу персоналом, який не здійснює технічне обслуговування приладу;
- не встановлювати блоки приладу на похилі поверхні;
- підключення і відключення електронного блоку до механічного блоку і до персонального комп'ютера здійснювати при вимкненому живленні;
- не допускати коротких замикань виходів блоків приладу на корпус.

7 ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

7.1 Прилад ВМН-2 вимагає своєчасного догляду, що забезпечує тривалу безвідмовну його роботу. Технічне обслуговування полягає в систематичному нагляді за правильною його експлуатацією.

7.2 Систематичний догляд здійснюється 1 раз на місяць і полягає у проведенні зовнішнього огляду блоків приладу на предмет пошкоджень та ввімкненні приладу на час 30 хв.

7.3 Технічне обслуговування приладу при його використанні виконують щоденно.

7.4 Технічне обслуговування приладу при його використанні полягає очищення, промивання вимірювальної трубки, перевірку роботи фотокамери.

8 МОЖЛИВІ НЕСПРАВНОСТІ ПРИЛАДУ І СПОСОБИ ЇХ УСУНЕННЯ

Перелік можливих несправностей приладу ВМН-2 наведений в табл. 3.

Таблиця 3 – Можливі несправності приладу ВМН-2 і методи їх усунення.

Тип неполадок, зовнішні ознаки.	Можлива причина	Способи усунення
1	2	3
1. Двигун не обертається, або не працює підсвітка вимірювальної трубки	Пропав контакт у з'єднувачі, яким підключають механічний блок до електронного	Перевірити підключення механічного блоку до електронного

						ВМН-2.00.00.000 ПС	Арж
Зм.	Арж	№ докум.	Підп.	Дата			11

11.3 Засоби повірки

11.3.1 При повірці використовують наступні засоби повірки:

- частотомір цифровий ЧЗ-44, діапазон вимірювання частоти 0,1–60МГц, похибка вимірювання частоти $\pm 0,00001$, напруга вхідного сигналу 10мВ–10В;
- генератор ГЗ-113, діапазон задавання частоти 10 Гц – 100 кГц, амплітудою вих. сигналу 10мВ–10В;
- калібр з сіткою, яка має крок $1\pm 0,01$ мм;
- конусоподібний калібр;
- набір стандартних зразків обертових крапель;
- IBM-сумісний персональний комп'ютер.

11.3.2 Промивні рідини:

- етиловий спирт 1-го сорту по ГОСТ 18300-87;
- хромова суміш (двохромовий калій) по ГОСТ 4220-75;
- дистильована вода по ГОСТ 6709-72;
- авіаційний бензин по ГОСТ 1012-72.

Допускається використання інших засобів повірки, які пройшли метрологічну атестацію в органах державної метрологічної служби і які задовольняють по точності вимогам даних методичних вказівок.

11.4 Умови повірки

11.4.1 При проведенні повірки повинні бути дотримані наступні умови:

Температура повітря в приміщенні 20 ± 5 С°, атмосферний тиск 86–106 кПа, відносна вологість повітря при вказаній температурі 30–80%, напруга живлення мережі 220 ± 5 В, частота змінного струму мережі 50 ± 1 Гц, відсутність вібрацій, тряски, ударів, які впливають на роботу приладу, зовнішні магнітні і електричні поля повинні знаходитись в межах, які не впливають на роботу приладу.

11.5 Перед здійсненням повірки виконують роботи згідно п.п. 4.1, 4.2, 4.4, 4.5.

11.6 Проведення повірки

11.6.1 Зовнішній огляд

11.6.1.1 Комплект поставки приладу повинен відповідати комплекту, який

					ВМН-2.00.00.000 ПС	Арж
Зм.	Арж	№ док.м.	Підп.	Дата		14

вказаний в табл. 2.

11.6.1.2 На задній стінці механічного і електронного блоків повинні бути таблички, які повинні містити інформацію про: назву підприємства-виготовлювача, умовне позначення приладу, основну похибку приладу, номер приладу, рік виготовлення приладу.

11.6.1.3 Маркування і надписи повинні бути нанесені способом, який забезпечує їхню чіткість і збереження під час всього строку служби приладу.

11.6.1.4 При ввімкненні приладу числа на табло приладу повинні висвічуватись чітко. Допускається короткочасне блимання цифр табло з періодом 1с.

11.6.1.5 Блоки приладу не повинні мати зовнішні пошкодження і дефекти. Прилад, який не задовольняє вказаним вимогам до подальшої повірки не допускається.

11.6.2 Опробування

11.6.2.1 При опробуванні проводять перевірку органів керування і роботи блоків приладу вцілому. При опробуванні виконують роботи згідно п.п. 4.6 – 4.10.

11.6.2.2 При позитивних результатах опробування прилад готовий до повірки.

11.6.3 Повірка пристрою вимірювання частоти

11.6.3.1 Визначення похибки вимірювання частоти обертання трубки проводять шляхом порівняння показів частотоміра і пристрою вимірювання частоти обертання трубки приладу.

11.6.3.2 Перевірку пристрою вимірювання частоти приладу проводять за допомогою генератора ГЗ-113 і частотоміра ЧЗ-44.

11.6.3.3 До електронного блоку приладу через підключають генератор ГЗ-113 і частотомір ЧЗ-44, згідно схеми додатку А.

11.6.3.4 Перевірку пристрою вимірювання частоти здійснюють на частотах 200, 500, 800 і 1000 Гц, яку відраховують по табло частотоміра ЧЗ-44.

11.6.3.5 За допомогою генератора ГЗ-113 подають на вхід електронного блоку сигнал напругою 0,15 В і частотою 200Гц.

						ВМН-2.00.00.000 ПС	Арж
Зм.	Арж	№ докум.	Підп.	Дата			15

11.6.3.6 За допомогою частотоміра ЧЗ-44 вимірюють частоту на вході електронного блоку.

11.6.3.7 Визначають частоту обертання трубки приладу 10 разів при незмінній частоті сигналу на виході генератора ГЗ-113.

11.6.3.8 Визначають відносну похибку вимірювання частоти обертання трубки приладом для кожного дослідів по формулі:

$$\delta f = \pm \frac{10f - f_{em}}{f_{em}} \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

де f – частота, виміряна за допомогою приладу, f_{em} – частота виміряна за допомогою частотоміра. Розраховану похибку заносять в табл. додатку Б.

11.6.3.9 Повторюють операції п.п. 11.6.3.6 – 11.6.3.8 для інших значень частот вхідного сигналу, вказаних в п. 11.6.3.4.

11.6.3.10 За похибку вимірювання частоти вибирають найбільше значення із усіх визначених похибок.

11.6.3.11 Похибка вимірювання частоти не повинна перевищувати $\pm 0,5\%$. В іншому випадку подальшу повірку приладу припиняють.

11.6.4 Визначення приведеної похибки вимірювання міжфазного натягу

11.6.4.1 Визначення основної приведеної похибки приладу здійснюють шляхом порівняння визначеного значення міжфазного натягу за допомогою стандартного зразка обертової краплі із значенням, яке нанесене на стандартному зразку обертової краплі.

11.6.4.2 В трубку, яка заповнена дистильованою водою встановлюють конусоподібний калібр.

11.6.4.3 Трубку з конусоподібним калібром встановлюють в патрон і приводять в обертання з частотою 30–80 об/с.

11.6.4.4 Натискаючи кнопку "Синхронізація", отримують зображення конусоподібного калібру у візирі фотоапарата.

11.6.4.5 Відрегулюють чіткість зображення калібру у візирі фотоапарата за допомогою вузла фокусування приладу і фотографують калібр.

11.6.4.6 Завантажують програмне забезпечення до приладу в пам'ять пер-

					ВМН-2.00.00.000 ПС	АПК
Зм	Арк	№ докум	Підп	Дата		16

сонального комп'ютера. В меню "Калібрування" програмного забезпечення ви-
бирають команду "Оптичне збільшення". У вікні, яке відкриється натиснувши
кнопку "Завантажити...". В діалоговому вікні вибирають файл із зображенням
конусоподібного калібру. Програма автоматично визначить коефіцієнт оптич-
ного збільшення скляної трубки при різних розмірах обертової краплі. У випад-
ку, коли програма не зможе автоматично визначити коефіцієнт оптичного збі-
льшення скляної трубки повторюють дії п.п. 4.11 – 4.11.

11.6.4.7 Знімають з вала двигуна патрон, попередньо викрутивши гвинти з
нього за допомогою викрутки.

11.6.4.8 На скло освітлювача поміщують стандартний зразок обертової
краплі.

11.6.4.9 Вмикають підсвітку приладу натиснувши кнопку "Синхронізація"
на одну секунду.

11.6.4.10 Відрегулюють чіткість зображення стандартного зразка обер-
тової краплі у візирі фотоапарата за допомогою вузла фокусування приладу і
фотографують його.

11.6.4.11 Визначають значення міжфазного натягу за допомогою програм-
ного забезпечення до приладу. Для цього виконують наступні дії. Завантажу-
ють програмне забезпечення до приладу в пам'ять персонального комп'ютера.
В меню "Зображення" вибирають команду "Завантажити з камери". В двох на-
ступних діалогових вікнах вказують файл із зображенням стандартного зразка
обертової краплі і робочу папку для файлів програми. В меню "Зображення"
вибирають команду "Відкрити". В наступному діалоговому вікні вказують файл
із зображенням стандартного зразка обертової краплі у робочій папці. У відпо-
відних вікнах редагування записують різницю густин і частоту, які вказані на
стандартному зразку обертової краплі. В меню "Натяг" вибирають команду
"Статичний". Визначене значення міжфазного натягу повинне відобразитись у
вікні програми. Визначене значення міжфазного натягу заносять в табл. додат-
ку Б.

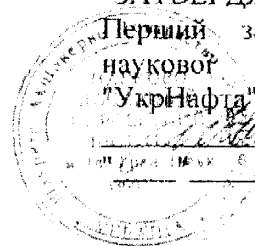
11.6.4.12 Розраховують відносну похибку визначення міжфазного натягу

						ВМН-2.00.00.000 ПС	АРК
Зм	Арк	№ док.им	Підп	Дата			17

Додаток Н

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Перший заступник директора з наукової роботи НДПІ ВАТ "УкрНафта"
 І. М. Купер
 2010р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи асистента каф. МПКЯ і СП ІФНТУНГ Біліщука Віктора Борисовича "Розроблення методу і пристрою для дослідження динамічних властивостей розчинів поверхнево-активних речовин"

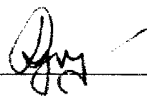
Ми, які нижче підписалися, представник НДПІ ВАТ "УкрНафта" нач. відділу нафтовідачі та інтенсифікації видобутку нафти Рудий Мирослав Іванович та асистент каф. Методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції (МПКЯ і СП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) Біліщук Віктор Борисович, склали даний акт про те, що були проведені дослідження динамічного міжфазного натягу між водними розчинами поверхнево-активних речовин (ПАР) і гасом приладом ВМН-2, розробленим асист. Біліщуком В. Б. з використанням методик вільної і фіксованої обертових крапель.

Використання запропонованих методик і приладу ВМН-2 дозволить оптимізувати компонентний склад розчинів ПАР для оброблення привибійних зон пластів експлуатаційних нафтових свердловин на родовищах ВАТ "УкрНафта".

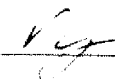
Дослідження проводились з 4 травня по 10 червня 2010р. з водними розчинами таких ПАР: стінол, сульфенол, савінол. В процесі досліджень також було розроблено ряд рекомендацій щодо подальшого удосконалення запропонованих методик і приладу ВМН-2, які в свою чергу дадуть можливість удосконалити прилад ВМН-2.

Даний акт не є основою для взаємних фінансових розрахунків.

Нач. відділу НДПІ


 М. І. Рудий

Асистент ІФНТУНГ


 В. Б. Біліщук