

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

На правах рукопису

Горелов Віталій Олевтинович

532.6+53.08(043)

~~УДК 681.2~~

Г68

**РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК І ПРИЛАДУ
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН
І РОЗЧИНІВ МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ**

**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.**



d218



Івано-Франківськ, 2003

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ	
ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ	10
1.1. Характеристика умов і рідин у процесі проведення	
вимірювання поверхневого натягу	10
1.2. Аналіз відомих методик вимірювання поверхневого	
натягу рідин методом лежачої краплі	19
1.3. Аналіз приладів для вимірювання поверхневого натягу	
методом лежачої краплі	30
1.4. Обґрунтування і вибір напрямку дослідження	35
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ	
ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ	
ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	
ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ	37
2.1. Утворення краплі у процесі вимірювання поверхневого	
натягу методом лежачої краплі	37
2.2. Розробка методики розрахунку параметрів лежачої	
краплі і аналіз отриманих результатів	45
2.3. Аналіз процесу проходження променів світла через	
лежачу краплю при вимірюванні поверхневого натягу	57
2.4. Розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого	
натягу на основі інтерпретації геометричних параметрів лежачої краплі ..	63
2.4.1. Визначення поверхневого натягу на основі значень	
радіусів кривизни поверхні лежачої краплі	64

2.4.2. Визначення поверхневого натягу на основі значень екваторіального діаметра профілю краплі та площі її верхньої частини ...	68
2.5. Вимоги до приладу з метою реалізації у ньому удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу	72
Висновки до розділу	74

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ	77
3.1. Розробка структурної схеми приладу.....	77
3.2. Вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі за допомогою телевізійної системи контролю	80
3.2.1. Лінійна фільтрація зображень лежачої краплі	80
3.2.2. Виділення перепадів яскравості і контурів лежачих крапель	81
3.3. Розробка і опис конструкції основних блоків і вузлів приладу ВПНО-1	85
3.4. Особливості програмного забезпечення для реалізації запропонованих методик вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі	90
3.5. Розробка методики проведення вимірювання поверхневого натягу приладом ВПНО-1	94
Висновки до розділу	98

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВІДОМОЇ І УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК ТА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ	100
4.1. Метрологічний аналіз відомої методики вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі	100
4.2. Аналіз методичних похибок розроблених методик	

вимірювання поверхневого натягу	104
4.2.1. Методична похибка вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни	108
4.2.2. Методична похибка вимірювання поверхневого натягу на основі значень площі профілю лежачої краплі та її екваторіального діаметра	109
4.3. Аналіз інструментальних та сумарних похибок приладу, який реалізує запропоновані методики вимірювання поверхневого натягу	114
4.4. Розробка методики звіряння приладу ВПНО-1	125
Висновки до розділу	127

РОЗДІЛ 5

ЛАБОРАТОРНІ І ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ВПНО-1 ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ	129
5.1. Проведення лабораторних випробувань приладу ВПНО-1 і аналіз отриманих результатів	129
5.2. Методика підбору поверхнево-активних речовин і їхніх концентрацій у розчинах для обробки привибійних зон нафтових свердловин з використанням приладу ВПНО-1	133
5.3. Аналіз результатів впровадження приладу ВПНО-1	135
Висновки до розділу	139
Основні висновки і рекомендації	140
Список використаних джерел	142
Додатки	151

ВСТУП

Актуальність теми. Рідини, розчини, тверді тіла і гази взаємодіють між собою завдяки наявності контактів між ними, а результати таких взаємодій залежать від фізико-хімічних властивостей на межах цих контактів, від об'ємних властивостей контактних фаз і умов, при яких відбувається взаємодія. Поверхневий натяг визначає питому вільну поверхневу енергію рідини на межі контакту рідина – оточуючий газ і є тим параметром, значення якого у багатьох випадках (газовидобування, хімічна промисловість, фармацевтична та інші галузі народного господарства) є визначальним. Вимірювання цього параметра дозволяє передбачити кінцевий результат і оперативно здійснювати керування технологічними процесами, у яких фізико-хімічні параметри на межі контакту рідина-повітря газ відіграють важливу роль. Особливо важливу роль відіграє поверхневий натяг у таких технологічних процесах, де використовуються розчини ПАР, наприклад, при інтенсифікації видобування газу, при виготовленні миючих засобів, при розробці і виробництві поверхнево-активних речовин різних функціональних призначень.

Слід зазначити, що поверхневий натяг залежить не тільки від конкретних властивостей контактуючих фаз (концентрації ПАР у розчинах, їхньої в'язкості тощо), а також і від умов, при яких контактують фази, особливо від температури, тиску.

Вказане є предметом теоретичних досліджень таких наук, як: фізична хімія, колоїдна хімія. Наявність досконалих приладів для вимірювання поверхневого натягу дозволяє підтвердити отримані теоретичні результати з одного боку, а також, з врахуванням конкретних властивостей рідкої і газової фаз і умов їхнього контакту, експериментально дослідити поведінку цих фаз шляхом одержання динамічних залежностей і рівноважних значень з іншого боку.

Залежно від властивостей фаз і умов їхнього контакту поверхневий натяг реально може змінюватися у діапазоні від 15 до 75 мН/м.

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

Дисертаційні дослідження безпосередньо пов'язані із виконанням у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) держбюджетної теми Д4–01–Ф по Міністерству освіти і науки України „Наукові основи контролю, управління і екологічного моніторингу об'єктами нафтогазового комплексу України” та госпдоговірної теми №243/01 „Організація проведення обробок привибійних зон пластів нафтових свердловин водяними розчинами поверхнево-активних речовин”.

Мета роботи полягає у розробці теоретичних, методологічних основ та технічних засобів вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР на межі контакту рідина – повітря методом лежачої краплі.

Відповідно до поставленої мети ***задачі*** дослідження є такими:

- аналіз існуючих методик і технічних засобів вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі;
- аналіз процесу утворення лежачої краплі і розробка методики розрахунку геометричних параметрів лежачої краплі;
- розробка моделі проходження променів світла через лежачу краплю та утворення її тіньового зображення у процесі вимірювання поверхневого натягу;
- розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі;
- розробка приладу для вимірювання поверхневого натягу, що реалізує розроблені методики і аналіз його метрологічних характеристик;
- розробка методики проведення лабораторних досліджень удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу і приладу, що їх реалізує.

Об'єкти дослідження: чисті рідини, розчини ПАР.

Предмет дослідження: методики і засоби вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина – повітря методом лежачої краплі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- вперше розроблено математичну модель процесу утворення лежачої краплі рідини при вимірювання поверхневого натягу, на основі якої можна

розрахувати геометричні розміри лежачої краплі рідини у залежності від її фізико-хімічних параметрів;

- вперше розроблено і теоретично обґрунтовано визначення поверхневого натягу рідини, яке базується на вимірюванні радіусів кривизни поверхні лежачої краплі у взаємно-перпендикулярних площинах для довільної точки, що належить профілю краплі, та у її вершині;

- вперше розроблено і теоретично обґрунтовано вимірювання поверхневого натягу рідини, яке базується на вимірюванні екваторіального діаметра та площі профілю верхньої частини лежачої краплі, обмеженої цим діаметром та вершиною краплі;

- розроблено і теоретично обґрунтовано принцип оцінки методичних похибок відомих і розроблених методик вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретичні, методологічні та експериментальні дослідження дозволили отримати такі практичні результати, які наведені у роботі:

- розроблений прилад ВПНО-1 для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом лежачої краплі згідно з удосконаленими методиками вимірювання;

- розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє керувати процесом вимірювання поверхневого натягу приладом ВПНО-1, здійснювати запам'ятовування контурів лежачої краплі, проводити подальшу обробку цих контурів із визначенням значень поверхневого натягу і представленням результатів у необхідній формі;

- здійснена оцінка інструментальної і сумарної похибок приладу ВПНО-1. Показано, що сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу не перевищує 1,5%;

- розроблена методика звіряння (півірки) приладу ВПНО-1 з використанням еталонних рідин і атестованих твердих тіл з відповідною формою їхніх поверхонь;

- розроблено методики підбору ПАР і їхньої концентрації у розчинах за допомогою приладу ВПНО-1 у залежності від функціонального призначення цих розчинів;

- результати проведення вимірювань поверхневого натягу приладом ВПНО-1 впроваджені з метою вибору концентрації ПАР типу Ріпокс-6 у розчинах для обробки привибійних зон нафтових свердловин у ГПУ “Полтавагазвидобування”.

Вірогідність результатів. Вірогідність отриманих наукових результатів зумовлена коректністю виконання теоретичних досліджень з використанням теорії капілярності Лапласа і Юнга, методики розв’язку диференціальних рівнянь капілярності методом Рунге-Кутта, методу апроксимації згладжуючими сплайнами, а також теоретичних основ метрології.

Вірогідність отриманих результатів експериментальних досліджень зумовлена коректністю виконання експериментів і підтверджується відповідною збіжністю з результатами теоретичного аналізу, а також результатами впровадження розроблених методик і приладу ВПНО-1.

Особистий внесок здобувача. Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, висновки і рекомендації виконані автором самостійно. Автором проаналізовані існуючі методики та прилади для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом лежачої краплі; сформульована мета і задачі досліджень; проаналізований процес утворення лежачої краплі; розроблено методику розрахунку геометричних параметрів лежачої краплі, виконано розрахунок і проаналізовано отримані результати; розроблено і теоретично обґрунтовано методики вимірювання поверхневого натягу рідин на основі значень радіусів кривизни капілярної поверхні у точках, що належать профілеві краплі та на основі її екваторіального діаметра і площі профілю краплі від екваторіального діаметра до її вершини; удосконалено модель утворення тіньового зображення лежачої краплі; розроблена структурна схема приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин; розроблена методика оцінки методичних похибок відомих і запропонованих методик вимірювання поверхневого натягу; розроблено прилад ВПНО - 1 для вимірювання

поверхневого натягу рідин згідно із удосконаленими методиками; здійснено метрологічних аналіз приладу ВПНО-1.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи обговорювалися на н/т конференціях професорсько-викладацького складу ІФНТУНГ (2000-2002 р.р.); на наукових семінарах кафедри МПКЯіСП ІФНТУНГ (1999-2002р.р.); на н/т конференції „Підвищення ефективності використання поверхнево-активних речовин в нафтогазовидобутку” (м. Івано-Франківськ, 2000 р.); на VIII н/т конференції „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (м. Хмельницький, 2001 р.); на IX н/т конференції „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (м. Хмельницький, 2002 р.); на н/т конференції „Приладобудування 2002: підсумки і перспективи” (м. Київ, 2002р.); на н/т конференції „Нафта і газ України 2002” (м. Київ, 2002).

Публікації. Результати роботи висвітлені у 7 статтях у фахових наукових журналах (2 статті одноособові), у 3 збірниках матеріалів і тез н/т конференцій, 1 збірнику наукових праць, 1 деклараційному патентові України.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел із 95 найменувань та 10 додатків і викладена на 150 сторінках. Робота проілюстрована 47 рисунками, включає 10 таблиць і додатки на 35 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО
НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

Існує численна група методів визначення поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина – оточуючий газ (статичних, напівстатичних та динамічних) [1, 2, 3]. Кожний із цих методів характеризується значною кількістю реалізацій, що розширює можливість їх вибору у залежності від конкретних умов, але ускладнює універсалізацію. Крім того, розробки володіють, рівною мірою, як перевагами, так і недоліками, що звужує можливість їхнього застосування дослідниками. Тому актуальною є задача розробки такої методики контролю поверхневого натягу рідин, для якої були б відсутні недоліки відомих методик.

З цією метою слід проаналізувати властивості досліджуваних рідин та умови проведення вимірювання їхнього поверхневого натягу на межі розділу рідина-газ, уточнити можливості відомих методів вимірювання поверхневого натягу, а також засобів, що їх реалізують. На основі такого аналізу необхідно визначити мету і задачі досліджень дисертаційної роботи, що є предметом даного розділу.

1.1. Характеристика умов і рідин у процесі проведення вимірювання поверхневого натягу

Теорія капілярності [1, 2, 3] дає можливість описувати форми поверхонь розділу легкорухомих фаз, які не змішуються між собою і хімічно не взаємодіють, та умови, якими визначається характер перетину двох або більше таких поверхонь (деякі з них можуть бути поверхнями твердих тіл) залежно від сил, під впливом яких перебувають контактуючі фази, при умові, що молекулярні сили і, отже, поверхнева енергія залишаються істотним фактором для розглядуваних явищ.

Поверхнева енергія (точніше, питома вільна поверхнева енергія) – це робота ізотермічно-ізохорного і термодинамічного оборотного процесу утворення

додаткової одиниці поверхні розділу фаз (1 м^2). У системі SI одиницею вимірювання поверхневої енергії є Дж/м². Результатом часткового скорочення у цій розмірності (М/Т²) є одиниця вимірювання Н/м – поверхневий натяг.

Поверхневий натяг є наслідком існування внутрішнього тиску – сили, що втягує молекули всередину рідини і направленої перпендикулярно до поверхні. Внутрішній тиск тим вищий, чим полярніша речовина, оскільки причиною його є дія молекулярних сил.

Внутрішній тиск втягує всередину молекули, розташовані на поверхні рідини, тим самим намагаючись мінімізувати площу поверхні за даних умов. Сила, що діє на одиницю довжини контуру межі розділу і зумовлює зменшення площі поверхні рідини, називається силою поверхневого натягу або поверхневим натягом.

Математично жодна з цих величин не має переваг. Термін „поверхневий натяг” виник з аналогії у поведінці пружної плівки і поверхні розділу рухомих фаз [3]. Але механізми скорочення такої поверхні і пружної плівки різні, оскільки при зменшенні або збільшенні площі поверхні розділу стиснення або розтягнення поверхневої плівки, пов'язаного із зміною відстаней між молекулами, не відбувається, а молекули з поверхні втягуються в глибину або навпаки, молекули з об'єму фази виходять на поверхню.

Під впливом поверхневого натягу маса рідини за відсутності зовнішніх сил завжди намагається набути форми кулі, оскільки поверхня кулі є найменшою поверхнею, що обмежує даний об'єм, і, відповідно, поверхнева енергія системи при цьому буде мінімальною.

Поверхневий натяг при утворенні поверхні для чистої рідини встановлюється практично миттєво, упродовж приблизно 0,001 с [4].

Поверхневий натяг рідини не є постійною величиною. Він залежить від зовнішніх умов: температури оточуючого середовища, тиску.

Залежність поверхневого натягу від температури у чистому вигляді можна спостерігати тільки для однокомпонентної рідини у контакті її із газом, що практично не розчиняється і не адсорбується. При цьому повинна забезпечуватися

постійність тиску. За відсутності стороннього газу, коли існує тільки рівновага рідини зі своєю парою, вплив температури завжди супроводжується зміною тиску. У цих умовах маємо [2], що

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\bar{s}_{(j)}, \quad (1.1)$$

де σ – поверхневий натяг; T – температура; $\bar{s}_{(j)}$ – надлишок ентропії на одиницю площі поверхні розділу, що відповідає умові нульової адсорбції речовини ($\Gamma_j = 0$). У однокомпонентній системі при переході від рідини до газу через поверхневий шар об'ємна густина речовини і ентропії зменшується, але молекулярна ентропія збільшується, тобто падіння густини речовини при переході від рідини до газу відбувається швидше, ніж падіння густини ентропії. Оскільки положення еквімолекулярної поверхні визначається поведінкою локальної густини речовини, вона буде розташовуватися у тій області, де ще є позитивний надлишок ентропії [2]. Тоді, у відповідності із (1.1), термодинаміка приводить до висновку про зменшення поверхневого натягу чистої рідини із ростом температури.

Температурний коефіцієнт $\frac{d\sigma}{dT}$ для кожної чистої рідини має практично постійне від'ємне значення аж до температур, близьких до критичної. При критичній температурі зникає різниця між контактуючими фазами і поверхневий натяг стає рівним нулю. Це стосується не тільки систем рідина – газ, а й систем рідина – рідина, коли поверхневий натяг зникає при критичній температурі розчинності.

У випадку багатоконпонентних систем у залежності від того, як розподіляються компоненти розчину між об'ємною фазою і поверхневим шаром і як вони впливають на ентропію об'ємної фази і поверхневого шару, похідна $\frac{d\sigma}{dT}$ може мати будь-який знак. Дослідним шляхом виявлено [2], що навіть в одній і

тій самій системі у різних температурних інтервалах знак похідної $\frac{d\sigma}{dT}$ може бути різним (тоді поверхневий натяг проходить через екстремум). Для розуміння цього явища необхідно врахувати той факт, що пряма дія температури зводиться до пониження не тільки поверхневого натягу, а й адсорбції, а останнє веде до збільшення поверхневого натягу.

Таким чином, термодинаміка свідчить про можливість як пониження, так і росту поверхневого натягу з температурою у багатокомпонентній системі.

Для дослідження поверхневого натягу від тиску у чистому вигляді необхідно фіксувати температуру і склад досліджуваної рідини. У n -компонентній системі це дає n умов (постійність температури і $n-1$ молярних долей), а згідно із правилом фаз у двофазній рівноважній системі існує тільки n ступенів свободи, так що усі вони виявляються використаними і система стає нонваріантною [2]. Це означає, що і тиск змінюватися не буде, тобто принципово вивчення залежності поверхневого натягу від тиску, як і температурної залежності, у чистому вигляді неможливе. Виходом із такого положення стає застосування стороннього малорозчинного газу, що слабо адсорбується, який тільки чинить тиск на рідину, але не змінює її складу.

Для випадку двофазної системи із плоскою поверхнею існує таке співвідношення [2]:

$$a \left(\frac{d\sigma}{dp} \right)_T = v^\sigma - v^\alpha - (v^\beta - v^\alpha) \frac{x^\sigma - x^\alpha}{x^\beta - x^\alpha}, \quad (1.2)$$

де a – поверхня, що припадає на 1 моль поверхневого шару; v^σ , v^α , v^β – молярні об'єми поверхневого шару, рідини і стороннього газу відповідно; x^σ , x^α , x^β – молярні долі основного компонента газу у поверхневому шарі, рідині і оточуючому газі відповідно.

Нехай α – рідина, β – сторонній газ. Тоді, якщо основний компонент газу не входить у фазу α і у поверхневий шар ($x^\alpha = 0$, $x^\sigma = 0$), другий член у правій частині рівності (1.2) зникає і ми переходимо до умови:

$$a\left(\frac{d\sigma}{dp}\right)_T = v^\sigma - v^\alpha > 0. \quad (1.3)$$

У цьому випадку поверхневий натяг повинен зростати із тиском. Ця умова на практиці виконується тільки для газу, що дуже мало розчиняється і адсорбується. Для газу ж з помітною адсорбцією із урахуванням очевидних умов $x^\sigma > x^\alpha$ та $x^\beta > x^\alpha$ у (1.2) стає переважаючим другий член, що веде до протилежного висновку про знак похідної $\frac{d\sigma}{dp}$. Єдиним газом, на межі розділу з яким поверхневий натяг рідин росте з тиском, є гелій. Таким чином, тільки у дослідах із гелієм можна вивчати дію власне тиску на поверхневий натяг.

Залежність поверхневого натягу від складу можна розглядати в ізотермічних та ізотермо-ізобаричних умовах. Оскільки вплив тиску на поверхневий натяг далеко від критичної точки невеликий, ізотерма та ізотерма-ізобара поверхневого натягу близькі. Рівняння адсорбції Гіббса [2, 4] дає можливість сформулювати наступне: якщо компонент знаходиться біля поверхні у надлишку, то додавання його знижує, а якщо спостерігається його нестача – збільшує поверхневий натяг.

Усі розчинні речовини за їхньою здатністю адсорбуватися на межі рідина – повітря можна розділити на поверхнево-активні, від’ємно поверхнево-активні та інактивні. Поверхнево-активні речовини здатні накопичуватися у поверхневому шарі, при цьому відбувається позитивна адсорбція. Додавання у розчин поверхнево-активних речовин зменшує поверхневий натяг на межі контакту із навколишнім середовищем. Поверхнево-активні речовини набули широкого поширення у народному господарстві. Зокрема, вони використовуються при виготовленні миючих засобів.

Мета прання – видалення з поверхні твердого тіла (волокна або тканини) забруднень, що прилипли до неї – шерстяного жиру, сажі, білкових речовин. У процесі прання відбувається заміна поверхні розділу волокно-забруднення на поверхні розділу волокно-миючий засіб та забруднення-миючий засіб. Першою

умовою успішного прання є достатньо висока поверхнева активність миючого засобу щодо поверхонь розділу забруднення-миючий засіб, тіло, що відмивається-водний розчин. Інша умова – виникнення на поверхнях розділу, що утворюються миючим розчином із забрудненням та поверхнею, що відмивається, шару із гідратованих молекул мила. Обидві ці умови можуть бути дотримані при правильному підборі миючого засобу і достатній його концентрації.

Важливим є застосування поверхнево-активних речовин у нафтогазовій промисловості.

Так, усі газоконденсатні родовища ВАТ “Укрнафта” і ДАТ “Чорноморнафтогаз”, а також переважна більшість газоконденсатних родовищ ДК “Укргазвидобування”, за винятком Ново-Троїцького, Тимофіївського і Котелівського, розробляються на режимі виснаження пластової енергії, що супроводжується випаданням з газу вуглеводневого конденсату у межах зміни тиску від початку конденсації до максимальної концентрації вуглеводневої суміші [5].

Випадання у пласті з газу конденсату приводить до зменшення фазової проникності газу. Найбільш істотно вона знижується у при вибійній зоні. У результаті зменшується дебіт газу.

Ефективним методом підвищення продуктивності газоконденсатних родовищ є проведення фізико-хімічних обробок з використанням розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР). При дії розчину ПАР на пористе середовище, яке насичене вуглеводневим конденсатом, руйнуються плівки конденсату на поверхні порових каналів. ПАР, адсорбуючись на поверхні породи, гідрофілізує її.

Використовують ПАР і у сільському господарстві при проведенні заходів з метою захисту рослин шляхом хімічної обробки. Правильно підібрана ПАР та її концентрація сприяють утриманню хімікалій на листі рослин, що збільшує ефективність проведення такої обробки, а також зменшує затрати на проведення таких заходів.

Від'ємно поверхнево-активні речовини намагаються “піти” з поверхні рідини в об'єм, у результаті чого спостерігається негативна адсорбція. Інактивні речовини розподіляються рівномірно між поверхневим шаром і об'ємом розчину. Для них адсорбція $\Gamma = 0$.

Аналізуючи вищенаведене можна стверджувати, що об'єктами контролю поверхневого натягу можуть бути як чисті речовини, так і розчини ПАР. За суттю методи, що використовуються для вимірювання поверхневого натягу рідин, можна класифікувати наступним чином:

- 1) методи, що базуються на вивченні профілів менісків фіксованої форми;
- 2) методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень параметрів;
- 3) методи, що використовують меніски на межі стійкості;
- 4) методи, що використовують поле обертання.

До першої групи належать методи: лежачої краплі, висячої краплі, розгорнутого меніска, капілярного підняття, двох менісків, менісків біля плоскої стінки, вертикального циліндра, пластинки Вільгельмі. Суть даних методів полягає у вимірюванні характеристик профілів менісків фіксованої форми. Такими характеристиками є координати точок профілю, а також інші, пов'язані з ними величини, наприклад, об'єм меніска. У ході проведення вимірювань даними методами меніск повинен знаходитися у стані механічної рівноваги. Проте, за наявності механічної рівноваги, у системі можуть бути відсутніми термічна і дифузійна рівновага, котрі характеризуються значно більшим часом релаксації, ніж механічна рівновага (яка встановлюється зі швидкістю звуку [2]). У цьому випадку, якщо час спостереження за меніском вибирається дуже малим (отримання зображення за допомогою телевізійних засобів контролю – ТЗК), форму меніска також можна вважати фіксованою. Згадані методи характеризуються певним набором (чи наборами, якщо метод має кілька варіантів) величин, між якими існує взаємозв'язок, який для більшості із них не виражається у явному вигляді, і дозволяють проводити вимірювання поверхневого натягу у діапазоні від 20 до 75 мН/м. Використання ТЗК дозволяє автоматизувати процес вимірювання методами лежачої краплі та висячої краплі.

Методи другої групи, на відміну від методів, що базуються на вивченні профілів менісків фіксованої форми, вимагають, щоб форма меніска у ході досліджуваного змінювалася. При цьому одна із величин, що характеризує досліджуваний меніск, повинна пройти через екстремум. Це методи: максимальної висоти лежачої краплі, витягування вертикального циліндра, витягування кулі, витягування конуса, методи витягування пластини і порожнього циліндра, методи витягування горизонтального циліндра і кільця. Як параметри, що аналізуються, можуть використовуватися не тільки величини, що безпосередньо належать меніскові, а і, наприклад, сила, що діє на тверде тіло, яке знаходиться у досліджуваній системі, або відстань від твердого тіла до флюїдних фаз, пов'язаних із параметрами власного меніска строгими співвідношеннями. За оцінками [6] похибка методу максимальної висоти лежачої краплі складає 0,1% при похибці вимірювання висоти краплі ± 0.003 мм. Методом витягування вертикального циліндра можна вимірювати значення поверхневого натягу із похибкою до 0.1 мН/м [7,8]. Аналогічну точність має метод витягування кулі [9,10]. Пошук екстремального значення параметра, що змінюється – складна задача, яка потребує часу, тому дані методи не можуть бути використані для кінетичних досліджень, а придатні тільки для отримання рівноважних значень поверхневого натягу.

До методів, що використовують меніски на межі стійкості [2], належать: метод максимального тиску у пухирці або краплі, метод падаючого меніска, метод ваги крапель, метод максимальної висоти висячої краплі, методи відриву тіл. Спільний недолік приладів, що реалізують ці методи, зазначено уже у самій назві їхньої групи – стан на межі стійкості завжди недосяжний внаслідок існування флуктуацій. Метод максимального тиску полягає у вимірюванні капілярного тиску у газовому пухирці чи краплі у момент відриву. Випадкові впливи (вібрація приміщення, поштовхи) збільшують імовірність передчасного відриву. Серед вказаних у літературі [2] похибок типове значення складає 0,1–0,2 мН/м. Інший недолік методу – необхідність достатньо великої кількості рідини. Проте метод має і свої переваги: не потрібна інформація про крайовий кут змочування і немає

потреби спостерігати за меніском, що дозволяє проводити вимірювання у непрозорих середовищах.

Четверта група – методи, що використовують поле обертання: [1, 2] метод обертової краплі, метод стержня, що обертається та ін. При обертанні запаяної трубки, у якій знаходиться однорідна рідина, внаслідок зчеплення з поверхнею буде обертатися і прилеглий до неї шар рідини. В'язкість рідини сприятиме передачі цього руху глибшим шарам. За відсутності інших впливів через деякий час уся система перейде у стан гідростатичної рівноваги, коли усі елементи рідини рухатимуться із малою швидкістю. Якщо усередині трубки знаходиться крапля іншої легшої рідини або пухирець газу, то при обертанні трубки навколо її вісі важча рідина намагатиметься перейти на периферію і витіснить легшу рідину до вісі трубки. У результаті крапля (пухирець) набуде видовженої уздовж вісі форми, причому цей ефект залежить від швидкості обертання. Даний процес спрямований проти сил поверхневого натягу, які мінімізують поверхню краплі. Отже, за розмірами краплі при певній частоті обертання можна робити висновок про поверхневий натяг рідини [1, 2]. Метод обертової краплі може застосовуватися для вимірювання поверхневого натягу рідин у широкому діапазоні: 10^2 – 10^4 мН/м. Головна вимога до проведення експерименту – близькість системи до гідростатичної рівноваги. Даний метод придатний не для усіх рідин [2]: гладкий профіль краплі утворюється у тому випадку, коли хоча б одна із рідких фаз має достатньо високу в'язкість. Для пухирців повітря дослід із легкорухомими фазами води дослід не відбувається [11]. Важливими особливостями цього методу є можливість проведення досліджень високов'язких рідин та рідин із наднизьким поверхневим натягом.

При розробці приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів необхідно брати до уваги, що метод, який приймається за основу, повинен бути добре обґрунтованим теоретично, бути точним і незалежним від крайового кута змочування, оскільки останній дуже мінливий і його важко точно виміряти і врахувати. Застосування величин крайового кута, знайденого в іншому досліді, для точного визначення поверхневого натягу не може бути виправданим.

Діапазон зміни поверхневого натягу речовин на межі розділу рідина – повітря становить від 15 до 75 мН/м. Значна кількість речовин характеризується високою адсорбцією чи є леткими, що вимагає оперативного проведення контролю. При цьому контроль з використанням статичних методів неможливий.

Можливість автоматизації процесу вимірювання, підвищення точності результатів шляхом проведення багатократних вимірювань, усунення впливу суб'єктивного фактору за рахунок використання телевізійних засобів контролю, проведення вимірювань у вказаному діапазоні можливих значень поверхневого натягу, дослідження рідини як у статиці, так і у динаміці зумовлюють вибір методу лежачої краплі для проведення його досліджень у даній дисертаційній роботі.

1.2. Аналіз відомих методик вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі

Методи, що використовуються для вимірювання величини поверхневого натягу, базуються на рівнянні капілярності, отриманому ще у 1805 році Юнгом, а потім у 1806 році Лапласом [1]:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1.4)$$

де ΔP — різниця зовнішнього і внутрішнього тисків, що діють на поверхню; R_1 , R_2 — радіуси кривизни поверхні краплі для довільної точки у взаємно-перпендикулярних січеннях; σ — поверхневий натяг.

Першим, хто застосував лежачу краплю для визначення поверхневого натягу, був Квінке [2, 3]. Для крапель, що погано змочують тверду поверхню ($\theta > \pi/2$; θ — крайовий кут змочування), він вимірював висоту краплі z_e від її вершини до екватора (рис. 1.1) і розраховував поверхневий натяг за формулою, що добре “працює” тільки для дуже широких (плоских) крапель ($x_e/a > 15$):

$$\sigma = (\rho^\alpha - \rho^\beta)gz_e^2/2. \quad (1.5)$$

Зрозуміло, що формулу (1.5) можна використовувати і у випадку, коли крапля утворює з поверхнею, на якій лежить, крайовий кут $\theta = \varphi_c = \pi/2$ — при цьому вимірюється її повна висота z_c .

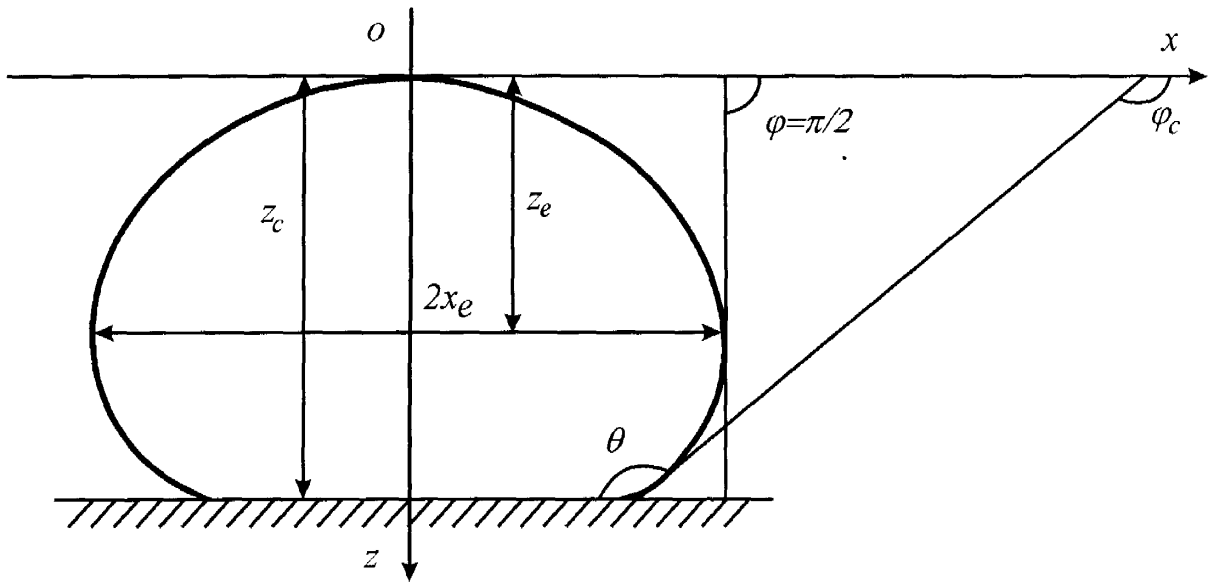


Рис. 1.1. Профіль лежачої краплі, що не змочує тверду основу

Однак робота з краплями великого діаметра є досить складною, оскільки дослідникові доводиться мати справу із впливом неоднорідності твердої поверхні на утворення краплі з постійним крайовим кутом уздовж лінії контакту фаз; сама контактна лінія може відрізнятись від кола, наслідком чого є втрата обертової симетрії кола.

Подальше удосконалення методу [12] дозволило знизити межу допустимих діаметрів крапель до $2\xi_e \approx 6$ ($\xi_e = x_e/a$ — безрозмірна величина), що для води відповідає діаметру $\approx 1,5$ см.

Розглянутий вище варіант методу лежачої краплі, що оперує трьома величинами — x_e , z_e , $\varphi = \pi/2$, з яких фактично вимірюються тільки дві

(декартові) координати, має один суттєвий недолік — велику похибку вимірювання x_e і z_e . Неважко помітити, що похибка фіксації положення екваторіальної точки значно сильніше впливає на похибку Δz_e , ніж на похибку Δx_e (рис. 1.2).

У 1928 р. Дорсі [13] запропонував інший варіант методу лежачої краплі, що дозволив уникнути вимірювання z_e . Замість цієї величини було запропоновано вимірювати відстань $H_{\pi/4}$ від точки перетину вісі z з дотичною до профілю краплі, що складає з віссю z кут $\varphi = \pi/4$, до вершин краплі (рис. 1.3). Ця відстань пов'язана з координатами $x_{\pi/4}$ та $z_{\pi/4}$ простим співвідношенням:

$$H_{\pi/4} = x_{\pi/4} - z_{\pi/4}. \quad (1.6)$$

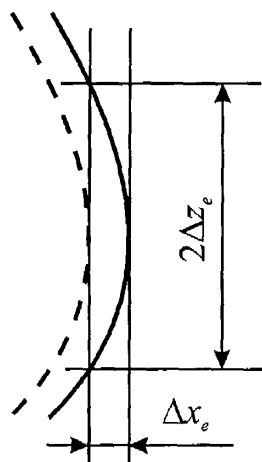


Рис. 1.2. Співвідношення похибок Δx_e та Δz_e у методі лежачої краплі

Частково використовуючи таблиці Башфорта і Адамса [14], Дорсі отримав наступний емпіричний вираз для розрахунку поверхневого натягу:

$$2/cx_e^2 = 0.0481q + 0.05200/q - 0.12268, \quad (1.7)$$

$$q = H_{\pi/4}/x_e - 0.41421, \quad (1.8)$$

де $c = 1/a^2$, $a^2 = 2\sigma / \Delta\rho g$ — капілярна постійна; $\Delta\rho$ — різниця густин контактуючих середовищ; g — прискорення вільного падіння.

Недоліком такої реалізації методу є потреба вимірювати координати точок, через які проведено дотичні до профілю краплі, що перетинаються із горизонтальною віссю під певним кутом. Крім неминучої похибки вимірювання координат точок, у цьому випадку виникатиме похибка встановлення цього кута. Проведення вимірювання поверхневого натягу вказаним способом вручну, безперечно, вноситиме суб'єктивний фактор у його результати, оскільки візуально важко контролювати точність проведення дотичних до контуру.

У роботі [15] можливості даного варіанту були розширені за рахунок використання різних дотичних, проведених до профілю, таких, що складають з віссю x кути (крім $\varphi = \pi/4$) $\varphi = \pi/3$, $\varphi = 2\pi/3$, $\varphi = 3\pi/4$ (рис. 1.3). У загальному випадку співвідношення між H_φ , x_φ , z_φ можна записати у вигляді:

$$H_\varphi = \pm \left(x_\varphi \operatorname{tg}\varphi - z_\varphi \right), \quad (1.9)$$

де знак “+” відповідає кутам $\varphi < \pi/2$, а знак “-” — $\varphi > \pi/2$.

Задача знаходження величини поверхневого натягу була розглянута у вказаній роботі строго. Єдність її розв'язку характеризується однією з пар додаткових умов:

$$\begin{aligned} x \Big|_{\varphi = \pi/2 = x_e}, [x \operatorname{tg}(\pi/3) - z] \Big|_{\varphi = \pi/3} &= H_{\pi/3}, \\ x \Big|_{\varphi = \pi/2 = x_e}, [x \operatorname{tg}(\pi/4) - z] \Big|_{\varphi = \pi/4} &= H_{\pi/4}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Безпосередньо розрахунки поверхневого натягу проводилися за допомогою отриманих (на основі таблиць Башфорта і Адамса) [14] табличних залежностей

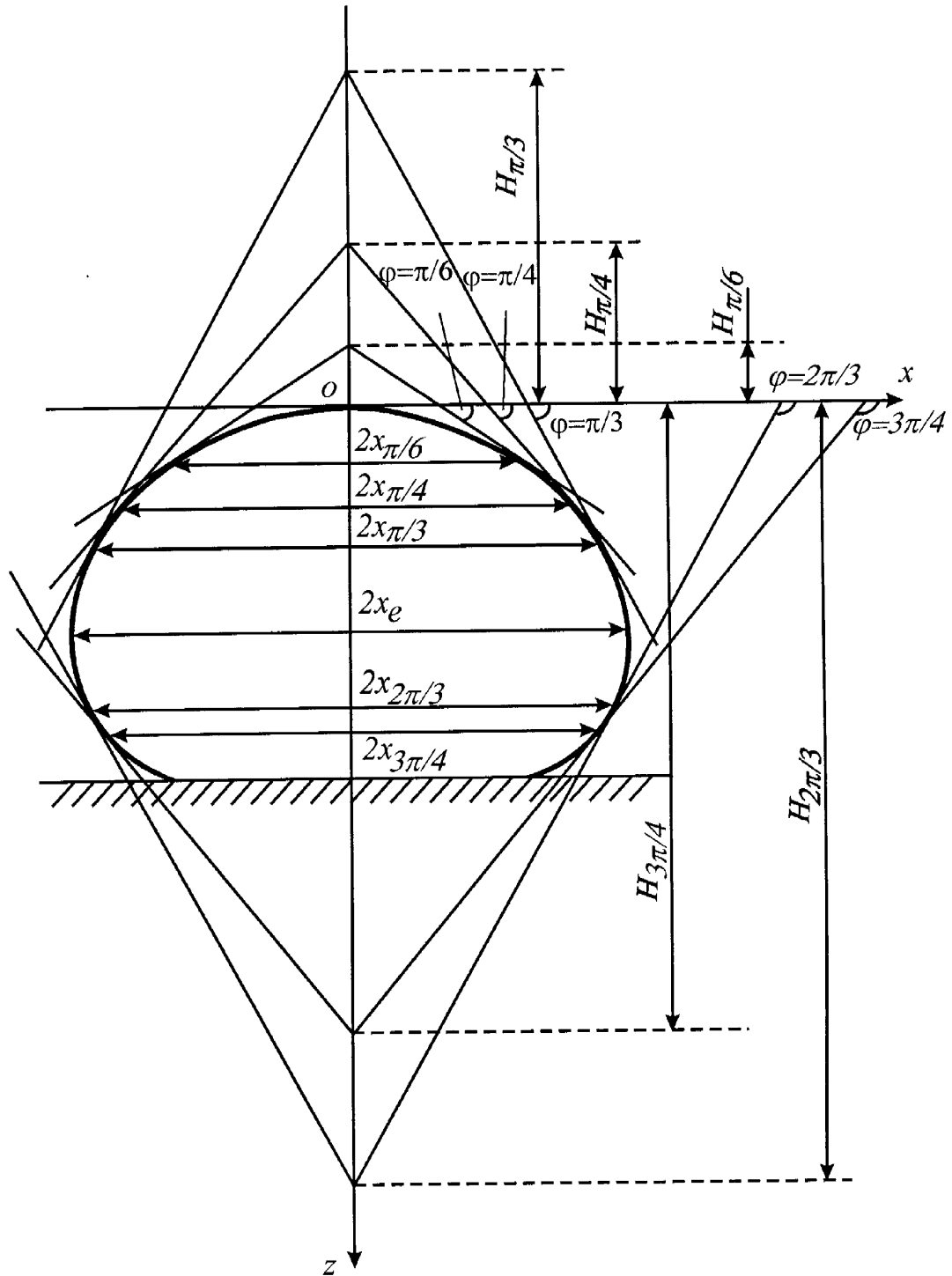


Рис.1.3. Профіль лежачої краплі і величини,
що вимірюються згідно [3, 12, 14, 15]

H_{φ}/x_e від β ($\beta = b^2/a^2$) для кожного із згаданих вище кутів. Спочатку із відповідної залежності інтерполяцією визначалося значення β , а потім за ним,

виходячи із таблиць [14], знаходилося значення x_e/b , яке давало величину радіуса кривизни b омболічної поверхні у її вершині. У підсумку поверхневий натяг розраховували за формулою:

$$\sigma = (\rho^\alpha - \rho^\beta)gb^2/2\beta. \quad (1.11)$$

Недоліки такої реалізації методу аналогічні недолікам способу Дорсі.

Зручнішу процедуру розрахунку σ у даному варіанті методу лежачої краплі розробили Ю. М. Іващенко, В. Н. Єрмоєнко [10, 16] (для $\varphi = \pi/4$). На основі таблиць Башфорта і Адамса вони табулювали залежності $1/cx_e^2$ від $H_{\pi/4}/x_e$ [2], з котрої за даними $x_{\pi/4}$ і x_e достатньо просто знайти поверхневий натяг.

У даному випадку знову таки доводиться стикатися із дотичними до профілю лежачої краплі. Візуальне визначення кута, під яким перетинається дотична із горизонтальною віссю, вносить долю суб'єктивності у отримані результати, а числова реалізація у випадку застосування автоматизованої системи вимірювання вимагає диференціювання функції профілю краплі у даній точці, що не завжди є виправданим з точки зору точності.

Свій варіант цього методу розробили В. І. Мелік-Гайказян та В. В. Ворончійна [17]. Їхня ідея полягає в тому, щоб поряд з екваторіальним діаметром $2x_e$ вимірювати діаметр $2x_{(m)}$ на відстані mx_e (де $m = 1, 2, 3, \dots$) від вершини краплі, використовуючи значення $m=0,6$ або $m=1$. Характеризуючі варіант умови мають вигляд:

$$\varphi \Big|_{x=x_e} = \pi/2; \quad z \Big|_{x=x_{(m)}} = mx_e. \quad (1.12)$$

Недоліком такої реалізації методу є необхідність фіксації точки вершини краплі, що у випадку плоских крапель важко здійснити.

У роботі [3] описаний варіант методу лежачої краплі, що дозволяє вимірювати значення поверхневого натягу для крапель, що не мають екватора. Для реалізації процедури розрахунку σ за знайденими значеннями величин $H_{\pi/6}$, $H_{\pi/4}$ у цій роботі була отримана таблична залежність величини $1/cH_{\pi/4}^2$, що дозволяє легко знаходити σ . Даний варіант реалізації методу лежачої краплі можна застосовувати для крапель із значеннями крайових кутів, що лежать у діапазоні $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$; йому властиві недоліки описаних вище реалізацій методу лежачої краплі, які передбачають проведення дотичних до контуру краплі, які при перетині із горизонтальною віссю утворюватимуть певний кут.

Найбільш загальним є варіант Ліонса, Елбінга, Вільсона (Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R.) [18]. Дана реалізація допускає довільну форму краплі, оскільки на профілі вимірюються декартові координати (усього чотири) двох довільно вибраних точок 1 і 2: x_1, z_1, x_2, z_2 (рис. 1.4). Як додаткові умови які утворені цими координатами, можна використати наступні:

$$z \Big|_{x=x_1} = z_1; \quad z \Big|_{x=x_2} = z_2. \quad (1.13)$$

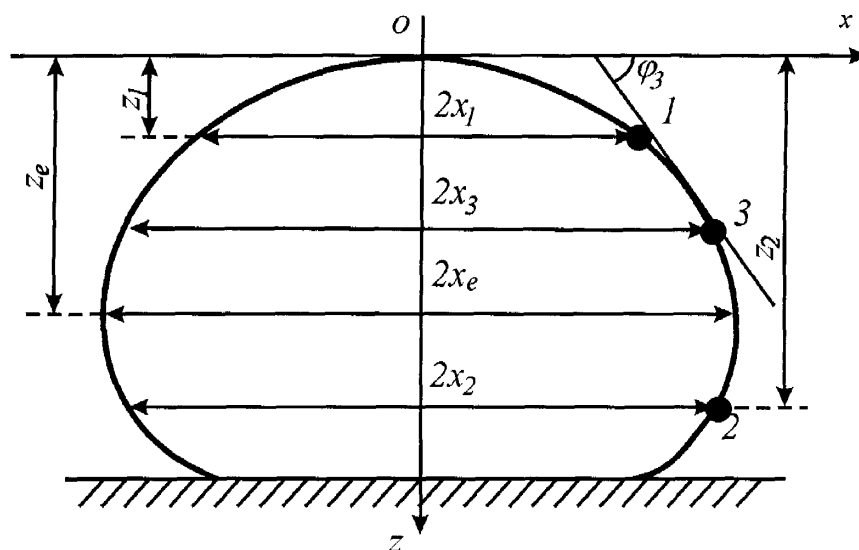


Рис. 1.4. Профіль лежачої краплі і вимірювані згідно [18] величини

Крім точок 1 і 2 необхідно вибрати ще одну довільну точку 3, для котрої реально оцінити її координати з тим, щоб у подальшому використати їх як початкові наближення ітераційної процедури пошуку σ . У випадку, коли робота ведеться з краплею, що має екватор, доцільно як точку 3 використати екваторіальну точку.

Загальна схема розрахункового алгоритму σ полягає у наступному. Спочатку знаходяться відношення отриманих із експерименту величин x_1, z_1, z_2, z_2, z_1 , а саме, $z_1/x_1, z_2/x_2, z_2/z_1$. Після цього змінюється параметр B у диференційному рівнянні (1.14), розв'язки котрого (разом із записаними у безрозмірній формі рівняннями (1.15, 1.16)) дають у числі інших серію залежностей $\zeta(\xi)$ (тобто, $z\sqrt{c}(x\sqrt{c})$):

$$d\varphi/d\eta + \sin \varphi/\xi = 2B + \zeta. \quad (1.14)$$

$$d\zeta/d\eta = \sin \varphi. \quad (1.15)$$

$$d\xi/d\eta = \cos \varphi, \quad (1.16)$$

де $\eta = s\sqrt{c}$; $\xi = x\sqrt{c}$; $\zeta = z\sqrt{c}$; $c = 1/a^2$.

У процесі виконання процедури кожна з цих залежностей перевіряється на предмет виконання рівностей:

$$z_1/x_1 = \zeta_1/\xi_1, \quad z_2/x_2 = \zeta_2/\xi_2, \quad z_2/z_1 = \zeta_2/\zeta_1. \quad (1.17)$$

Іншими словами, фактично виконуються умови (1.13).

Якщо для даного значення B (при виконанні двох перших рівностей (1.17)) відношення z_2/z_1 буде більшим за ζ_2/ζ_1 , то B зменшується і навпаки.

Автори запропонували методику визначення початкового значення $B^{(0)}$.

З урахуванням знайдених значень безрозмірних координат поверхневий натяг просто розрахувати за формулою:

$$\sigma = (\rho^\alpha - \rho^\beta) g(\xi_1/x_1)^2 / 2. \quad (1.18)$$

Розглянуті варіанти методу лежачої краплі представляють собою шляхи реалізації задачі, метою якої є: отримання із експерименту мінімального числа вимірюваних величин, за допомогою яких можна було б записати додаткові краєві умови і забезпечити цим однозначний розв'язок задачі — отримання капілярної постійної a^2 , а значить, і поверхневого натягу σ . Схема пошуку a^2 (і σ) наступна: на реальному профілі меніска виділяються дві точки (або одна з відомим кутом нахилу дотичної), через який проводять деякий теоретичний профіль, що характеризується двома параметрами — b і a^2 . Значення другого з них необхідно знайти. При цьому знання всього профілю $z(x)$ зайве.

З точки зору точності (а не простоти експерименту) очевидно, що даний підхід не використовує всі резерви, що має метод лежачої краплі. Якщо зняти з профілю, що спостерігається в досліді, не одну чи дві, а значно більше точок, то шляхом мінімізації відхилення теоретичного профілю від експериментальних точок можна було б знизити вплив випадкових похибок, що супроводжують експеримент.

При цьому підбір оптимального теоретичного профілю здійснюється шляхом розв'язку такої системи диференціальних рівнянь [2, 3]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dl} = 2/b - \frac{\sin \varphi}{x} + \frac{2}{a^2} z, \\ \frac{dx}{dl} = \cos \varphi, \\ \frac{dz}{dl} = \sin \varphi, \end{cases} \quad (1.19)$$

де φ — кут нахилу дотичної до профілю лежачої краплі у даній точці; l — довжина дуги профілю краплі від омболічної точки до розглядуваної; x, y — відповідно горизонтальна і вертикальна координати точки профілю. Початковими умовами для розв'язку системи рівнянь (1.19) при $\varphi = 0$ є такі: $x = y = 0$, $R_1 = R_2 = b$, де

R_1 і R_2 – радіуси кривизни поверхні в точці поверхні краплі, що розглядається, у взаємно-перпендикулярних перерізах, один із яких є меридіанним; b – радіус кривизни при вершині краплі.

За будь-якого із розглянутих вище підходів при проведенні обчислень зручно переходити до такої системи координат, у якій за нуль координат приймається вертикальна і горизонтальна координати вершини краплі \bar{z}_0 та \bar{x}_0 (рис. 1.5) [2]. Це викликано тим, що при використанні як джерела зображення відеокамери її нуль координат знаходиться у верхньому лівому кутку, у той час як для проведення обчислень зручно, щоб початок відліку був у вершині лежачої краплі. Тому ордината і абсциса точки профілю краплі у системі координат x, z пов'язується із системою координат \bar{x}, \bar{y} наступним чином:

$$z = \bar{z} - \bar{z}_0, \quad x = \bar{x} - \bar{x}_0. \quad (1.20)$$

Даний прийом дозволяє обійти проблему точної фіксації вершини краплі, від якої ведуть відлік координат точок профілю.

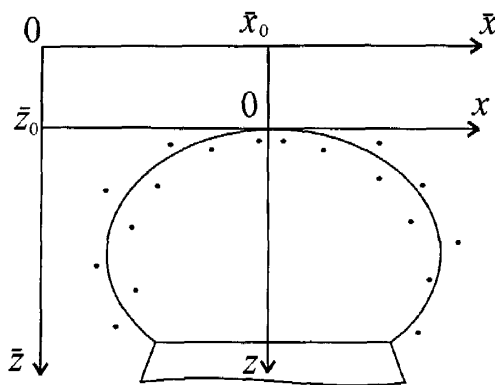


Рис. 1.5. Теоретичний профіль меніска і експериментальні точки у системі координат \bar{x}, \bar{y}

Важливе значення має функція, що використовується для побудови

оптимального теоретичного профілю лежачої краплі, яка наведена у [2], а саме:

$$E_{x,z} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[x \pm (\bar{x}_0 - \bar{x}_i)^2 \right] + \left[z + (\bar{z}_0 - \bar{z}_i)^2 \right] \right\}, \quad (1.21)$$

де \bar{x}_i і \bar{z}_i – координати i -ї експериментальної точки у цій системі координат.

Знак “плюс” перед доданками $(\bar{x}_0 - \bar{x}_i)$ у виразі (1.21) відповідає точкам з $\bar{x}_i > \bar{x}_0$, а “мінус” – точкам з $\bar{x}_i < \bar{x}_0$. Вибір нової системи координат, не прив’язаної до вершини краплі, знімає проблему точного встановлення положення вершини краплі. Згідно [2] цей прийом здійснювався тільки по відношенню до ординати. Значення функції $E_{x,z}$ формується шляхом сумування нормальних відстаней між експериментальними точками і теоретичним профілем лежачої краплі.

Традиційні регресійні методи базуються на мінімізації суми квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичного профілю. Як альтернатива їм був запропонований [19] робастний метод, що є порівняно новим. Він менш чутливий до наявності шумових точок, що зумовлюються похибками вимірювань. Недоліком цього методу є вибір деякої фіксованої точки відліку: або вершини краплі, або її центра — точки перетину вісі симетрії краплі з екваторіальним перерізом (для крапель з екватором). Це робить даний алгоритм менш зручним, ніж описані в [20, 21].

Аналіз вказаних реалізацій методу лежачої краплі показує, що на даний час не сформовано чіткого підходу до вирішення проблеми вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі.

Більшість їх базуються на емпіричних та наближених залежностях, що зменшує точність вимірювання σ , отже, задача розробки методики вимірювання поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина-газ залишається актуальною.

1.3. Аналіз приладів для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі

Прилади для вимірювання поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів методом лежачої краплі мають схожу будову. Вони можуть відрізнятися способами формування лежачої краплі, але у головному – забезпеченні умов для отримання чіткого зображення краплі, відмінностей між ними практично немає.

Загальний вигляд установки, що реалізує даний метод, схематично показано на рис. 1.6. Головними її вузлами є: джерело світла; колімаційна лінза; кювета із краплею, оточеною газом чи іншою рідиною; лінза, що збільшує зображення краплі.

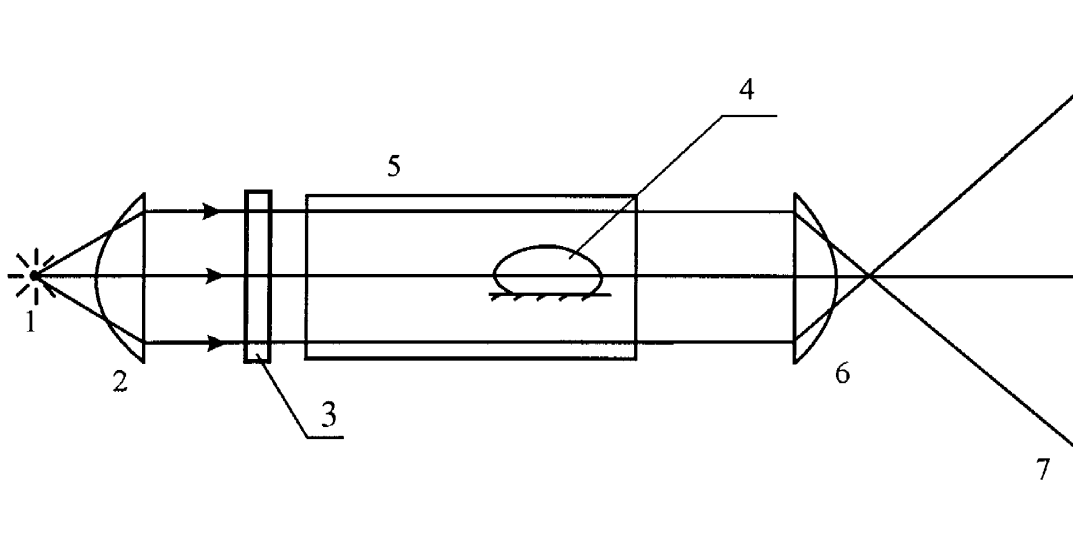


Рис. 1.6. Принципова схема, що реалізує метод лежачої краплі:

1 — джерело світла; 2 — колімаційна лінза; 3 — світлофільтр; 4 — лежача крапля; 5 — кювета для краплі з оточуючим її газом або іншою рідиною; 6 — конденсорна лінза; 7 — площина зображення

Обов'язковою умовою отримання зображення краплі, що відповідає меридіональному перерізу, є паралельність променів. Таку умову диктує процес утворення тіньового зображення лежачої краплі (саме за тіньовим зображенням вимірюються параметри лежачої краплі), що базується на заломленні променів

при проходженні їх через об'єм і вимагає, щоб промені, які падають на поверхню краплі, були паралельними.

Цікаве рішення, яке запропоноване в роботі [22], є таким: освітлювати краплю не збоку, а зсередини, тобто світловий потік направляти згори (використовувалася висяча крапля) через трубку. У цьому випадку зображення краплі виглядає як світла область на чорному фоні.

Сформувати лежачу краплю можна скапуванням рідини з кінчика трубки, що знаходиться над твердою поверхнею. Частіше лежачу краплю утворюють на торці трубки, повернувши її вихідним кінцем угору.

Діаметр кінчика трубки підбирається попередньо у відповідності з необхідною формою краплі (лінія контакту краплі з твердою поверхнею може проходити як по зовнішньому краю торця трубки, так і по внутрішньому).

Одна із головних задач, розв'язок якої повинна забезпечити установка для визначення поверхневого натягу методами лежачої чи висячої краплі — отримання чіткого зображення (профілю) краплі з подальшим оцифруванням його.

Найпростіший спосіб отримання зображення — проєкційний, коли збільшене зображення краплі отримується на екрані (наприклад, на міліметровому папері). Даний спосіб придатний тільки для грубої оцінки поверхневого натягу і у серйозних дослідженнях він не застосовується.

Достатньо чіткий профіль можна отримати, якщо використати в установці вимірювальний мікроскоп. Залежно від варіанта методу, що використовується, застосовують або двокоординатний вимірювальний мікроскоп, або достатньо однокоординатного. Ці прилади можуть забезпечити похибку вимірювання координат до $\pm(0,005 — 0,001)$ мм. Використання їх виправдане, коли проводиться невелике число вимірювань. Коли ж число точок профілю, що аналізуються, складає кілька десятків, процедура вимірювання стає надто втомливою, що вносить вплив суб'єктивного фактора на результати досліджень.

Більш поширений спосіб отримання зображення краплі — фотографування. Зображення можна отримати на фотопластинці або фотоплівці. У першому

випадку ми маємо справу з проєкційним способом отримання зображення. У другому випадку фотоапарат працює у комплексі з мікроскопом. Вимірювання значень параметрів профілю краплі може бути здійснений відповідною вимірювальною апаратурою [23, 24, 25]. Однак деякі автори надають перевагу роботі із отриманими з плівок фотографіями великого розміру [26, 27], на яких зображення краплі збільшене у порівнянні з реальним у 100-300 разів.

Вимірювання координат точок профілю краплі на будь-якому із фотоматеріалів неможливе без проведення попереднього калібрування, яке дозволяє усунути не тільки невизначеності, пов'язані з процесом фотографування (збільшення та ін.), але і спотворення усієї оптичної системи приладу. Для цього на одному з краплею відбитку отримують зображення еталонного предмета з точно відомими розмірами. Більш складний метод калібрування описано у [24]: еталонні предмети фотографуються без досліджуваної краплі у тому ж місці, де потім фотографується крапля.

Крім калібрування для правильної орієнтації світлин зображення краплі у процесі обміру профілю необхідно, щоб на фотографії разом з краплею було видно предмет, що вказує напрям гравітаційного поля. У [23] таким предметом є тонка платинова дротина з вантажем, що звішується униз і для демпфування поміщена у посудину із в'язкою рідиною.

У способах отримання зображення краплі, описаних вище, її профіль видно як чітку межу між двома контрастними за освітленістю областями. Існує інший спосіб отримання контуру краплі — стріаскопічний [28]. Ідея його полягає в тому, що із всієї інтерференційної картини, що спостерігається у площині зображення при проходженні світла від лазера через досліджуваний об'єкт, може бути виділена тільки одна світла інтерференційна смуга. Цього досягають, використовуючи маску — об'єкт, що розміщують у фокусі конденсорної лінзи, і концентричну з нею діафрагму, розташовану приблизно посередині між лінзою і маскою. На початку 80-х років серед способів отримання і аналізу зображення краплі з'явився ще один, що базується на використанні відеотехніки [3]. Використання такої апаратури привабливе, оскільки дає можливість повністю

автоматизувати процес вимірювання і обробки даних аж до отримання кінцевого результату. На рис. 1.7 показано блок-схему такої відеоустановки.

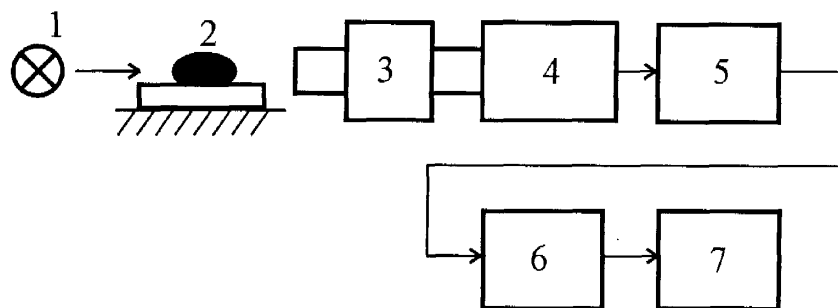


Рис. 1.7. Блок схема відеоустановки приладу,
що реалізує метод лежачої краплі:

1 – джерело світла; 2 – крапля; 3 – мікроскоп; 4 – відеокамера; 5 – пристрій відеозахоплення; 6 – комп’ютер; 7 – монітор

Функціонує подібна установка наступним чином. Збільшене мікроскопом зображення краплі приймається відеокамерою. Далі сигнал поступає у відеопроцесор, де відбувається його оцифрування. При цьому кожний піксел характеризується певним числом рівнів яскравості.

Оцифроване зображення поступає в комп’ютер, де здійснюється сегментація зображення, тобто виділення краю краплі. Далі проводяться вимірювання параметрів краплі, необхідні для вимірювання поверхневого натягу згідно із обраною реалізацією методу лежачої краплі.

У [29] описано телевізійну оптико-цифрову систему для визначення капілярних характеристик за методом лежачої краплі. Оптична частина даної системи має такі складові: освітлювач із галогенною лампою, конденсор, камера для формування лежачої краплі, світлофільтри, проектувальний об’єктив, відеокамера. Вимірювання поверхневого натягу включає вимірювання геометричних параметрів краплі за її зображенням, а саме: діаметра екватора $d_{екв}$, висоти від екватора до полюса h , контактного кута θ , розмірів підкладки l , котрі використовуються як калібрування системи. Для введення телевізійного

зображення у персональний комп'ютер авторами було розроблено спеціалізований програмно-керований пристрій вводу відеозображення (ПВВ). Система формує зображення лежачої краплі розмірами 512×512 елементів; час захоплення кадру становить 40мс; час введення одного кадру у ПК – 0,2с. Для виділення контуру краплі запропоновано проводити згладжування вхідного зображення із подальшим застосуванням оператора Собела для підсилення перепаду яскравостей. При цьому похибка вимірювання координат екваторіальної точки 0,2% у горизонтальному і 0,4% у вертикальному напрямках. Похибка визначення капілярної сталої розробленою системою становить 1,8%.

Торкаючись загальних питань будови установок для визначення поверхневого натягу за методами лежачої і висячої краплі, можна визначити ряд моментів.

Зручність регулювання і отримання оптимального зображення краплі забезпечується розташуванням чашечки і оптичних вузлів установки довільного типу на оптичній лаві. У свою чергу, лава повинна знаходитися на масивній антивібраційній підставці.

Тривалість одного дослідження по визначенню поверхневого натягу вказаними методами може бути довільно великою (це важливо для тих випадків, коли необхідно гарантувати досягнення рівноваги).

Таким чином, на відміну від реалізацій методу лежачої краплі, які характеризуються різноманітністю, будова приладів для вимірювання поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів методом лежачої краплі більш-менш однакова. Удосконалення таких приладів може розвиватися шляхом внесення змін у конструкцію окремих блоків: освітлювача, блока формування краплі, телевізійної системи тощо.

Крім того, відомі прилади дають можливість здійснювати вимірювання поверхневого натягу з використанням однієї фіксованої краплі рідини, хоча завжди існує можливість формування кількох десятків чи сотень профілів шляхом отримання зображень краплі у процесі її росту. При цьому мала тривалість експозиції дозволяє розглядати меніск даної рідини як фіксований.

Підсумовуючи, слід відзначити, що випуск приладів для вимірювання поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина – повітря має характер виготовлення одиничних взірців і разових партій.

Усі вони реалізують вказані вище методики контролю, тому їм властиві методичні похибки цих методик контролю поверхневого натягу.

1.4. Обґрунтування і вибір напрямку дослідження

З урахуванням вищенаведеного можна стверджувати, що на даний час відомі різні методики вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина – оточуючий газ (Дорсі; Іващенко, Богатиренка, Єрмоєнко; Мелік-Гайказяна та Ворончіної та ін.), які реалізуються при виготовленні приладів для вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі. Даний метод полягає у формуванні краплі рідини на горизонтальній підкладці із однорідною змочуваністю або на верхньому торці вертикально встановленого товстостінного капіляра чи капіляра із загостреною кромкою (так званого ножового капіляра) та інтерпретації форми меридіанного перерізу утвореної краплі.

З урахуванням вимог сьогодення до точності вимірювання прилади, функціонування яких базується на фотографуванням краплі та її подальшим проектуванням чи друком у збільшеному масштабі потрібно визнати застарілими, оскільки вони не забезпечують високої точності вимірювання. Те ж стосується використання мікроскопа, оскільки використання його не дозволяє автоматизувати процес вимірювання поверхневого натягу рідин та робить його втомливим для дослідника.

Класичні варіанти методів у порівнянні з регресійними, хоча виграють у простоті, але програють останнім у точності. Проведені оцінки похибок класичних методик дають результат 0,1 – 0,2 % [25]. Очевидно, що цю величину слід визнати найкращою із тих, які можна отримати згаданими методиками.

Ефект від збільшення числа отримуваних в одному досліді точок профілю продемонстрований при роботі відеоустановки [30]. При порівняно невеликій

роздільній здатності відеокамери, один піксел якої відповідав прямокутнику із розмірами 0,001 см × 0,0016 см, коли знімалось 750 точок профілю, вдалося досягнути похибки 0,15%. Отримання для однієї і тієї ж краплі в автоматичному режимі декількох сотень профілів і їх статистична обробка дозволила зменшити похибку у 3 рази.

Отже, кожна із описаних методик має певні недоліки, які ускладнюють їх використання або ведуть до виникнення додаткових похибок в отриманих результатах.

Тому з метою розробки методики вимірювання поверхневого натягу, яка б виключала суб'єктивний фактор у результатах визначення σ , дозволяла автоматизацію процесу визначення шуканої величини, реалізувала багатократні визначення σ із проведенням статистичної обробки отриманих результатів задачами дослідження дисертаційної роботи є:

- 1) розробка математичного опису процесу утворення лежачої краплі на горизонтальній пластині та верхньому торці вертикально встановленого товстостінного капіляра чи капіляра із загостреною кромкою (ножового капіляра);
- 2) розробка методики розрахунку геометричних параметрів лежачої краплі;
- 3) розробка математичного опису проходження променів світла через краплю;
- 4) розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина – повітря методом лежачої краплі;
- 5) розробка автоматизованого приладу для вимірювання поверхневого натягу, який би реалізував удосконалену методику вимірювання з проведенням метрологічного аналізу його інструментальних похибок;
- 6) порівняльний метрологічний аналіз відомих і удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі;
- 7) метрологічний аналіз приладу, що реалізує розроблені методики вимірювання поверхневого натягу;
- 8) проведення експериментальних досліджень приладу, що реалізує удосконалені методики вимірювання поверхневого натягу.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

З метою розробки удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина – оточуючий газ шляхом вимірювання відповідних геометричних параметрів лежачої краплі, які б дозволили автоматизувати процес вимірювання цих параметрів і розрахунок значення поверхневого натягу, дослідити залежність поверхневого натягу від часу існування межі розділу, необхідно одержати математичний опис процесу утворення лежачої краплі. Отримані у результаті залежності дадуть можливість розрахувати конкретні значення відповідних параметрів лежачої краплі для усього діапазону реальних рідких фаз, що, у свою чергу, сприятиме розробці методики контролю.

Крім цього, вказане дасть можливість сформулювати вимоги до приладу в цілому з метою реалізації у ньому удосконалених методик визначення поверхневого натягу.

2.1. Утворення краплі у процесі вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі

Метод лежачої краплі полягає у формуванні краплі рідини на горизонтальній підкладці із однорідною змочуваністю або на верхньому торці вертикально встановленого товстостінного капіляра чи капіляра із загостреною кромкою (так званого ножового капіляра) та інтерпретації форми меридіанного перерізу утвореної краплі.

Формування краплі рідини на горизонтально встановленій підкладці у даній роботі не розглядається, оскільки на форму краплі впливає крайовий кут змочування, що порушує осесиметричність краплі. На практиці дослідник може стикнутися з різними випадками неповного змочування (крайовий кут змочування

θ може бути як більшим, так і меншим за 90°). Для проведення вимірювань значно прийнятніший перший випадок, оскільки він характеризується наявністю екваторіального радіуса у краплі. Форма верхньої частини краплі має більшу осеву симетрію (звичайно, за умови вертикального напрямку дії сили гравітації), ніж нижня. Форма нижньої частини краплі більше залежить від величини крайового кута змочування, визначити істинне значення якого часто буває не легко. Причини цього полягають у наступному (для проведення досліджень важливе значення має не сам факт існування крайового кута змочування, а його однорідність уздовж лінії основи краплі, що забезпечити практично неможливо) [4].

По-перше, на крайовий кут можуть впливати залишки речовин, що забруднюють поверхню. Це зрозуміло, оскільки різка зміна змочування відбувається вже при утворенні на поверхні мономолекулярного шару, для чого потрібна мізерна кількість забруднюючої речовини.

По-друге, багато речовин, наприклад, метали добре окислюються, що веде до утворення на їхній поверхні дуже тонкої плівки окислів. Ця плівка також може впливати на величину крайового кута, отже і на форму краплі у випадку $\theta < 90^\circ$. Тому при проведенні вимірювань на поверхнях твердих тіл потрібно використовувати незабруднені і неокислені поверхні.

По-третє, поверхні, як правило, добре адсорбують повітря. Зрозуміло, що адсорбоване повітря сповільнює процес розтікання рідини по поверхні твердого тіла, оскільки для витіснення повітря з поверхні і встановлення рівноважного крайового кута потрібен певний час.

По-четверте, на змочування твердого тіла може впливати шорсткість його поверхні, причому чим більша шорсткість, тим різкіше проявляються властивості поверхні щодо притягання або відштовхування рідин. Подібне явище можна пояснити тим, що при $\theta < 90^\circ$ рідина потрапляє у заглиблення поверхні подібно до того, як вона всмоктується у змочувані нею капіляри. Зрозуміло, що це покращує змочування. При $\theta > 90^\circ$ рідина не потрапляє у заглиблення, що погіршує змочування. Іншими словами, у випадку гідрофільної поверхні шорсткість надає

поверхні ніби ще більшої гідрофільності, а у випадку гідрофобної поверхні шорсткість сприятиме збільшенню її гідрофобності. Для виключення впливу мікрорельєфу на результати вимірювання поверхня, на якій буде сформована крапля, повинна бути як можна гладкішою.

Згідно із другим законом Лапласа, поверхні рідини і твердого тіла контактують під сталим кутом. Його визначають як границю кута між нормаллями до поверхонь твердого тіла і рідини при зближенні їх основ до лінії перетину рідкої і твердої поверхонь. Дається також визначення цього кута як границі двогранного кута між площинами, дотичними до поверхонь, що не змінює суті цієї величини [3].

Розглянемо випадок отримання краплі на торці товстостінного вертикально встановленого змочуваного рідиною капіляра (рис. 1а).

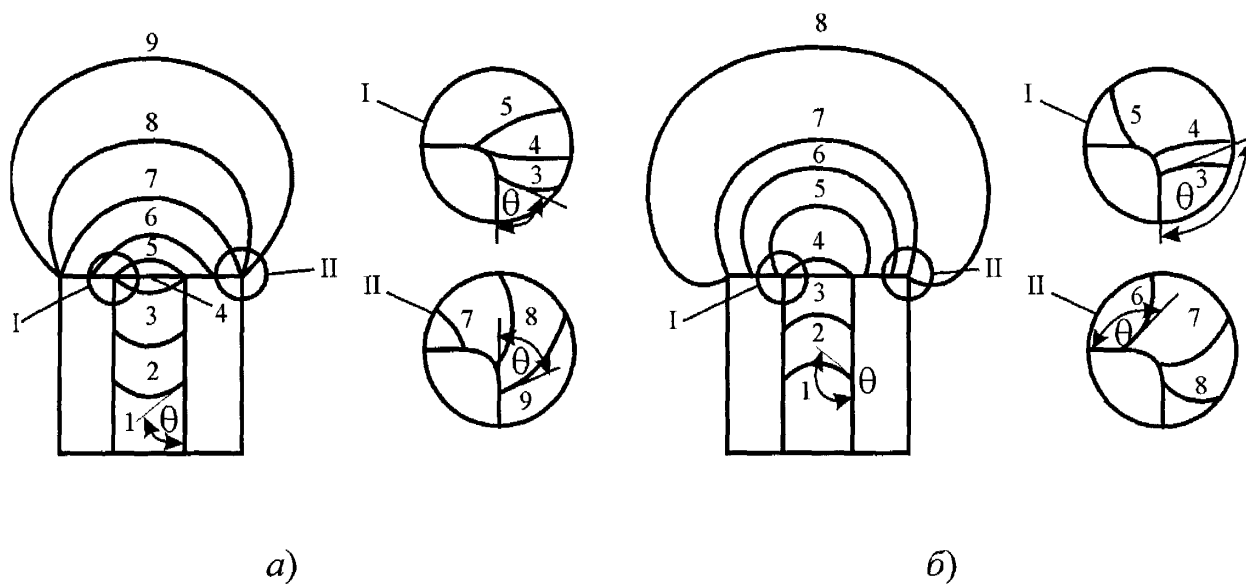


Рис. 2.1. Утворення краплі на торці товстостінного капіляра:

а) рідина змочує капіляр; б) рідина не змочує капіляр

Нехай в початковий момент меніск рідини знаходиться всередині циліндричного отвору капіляра (пол. 1). У результаті подачі рідини у капіляр, наприклад, за допомогою джерела із постійною витратою, що задається, меніск почне переміщуватися вгору по каналу. При цьому крайовий кут між стінкою отвору капіляра і меніском у точці їх дотику через рідину θ буде кутом натікання

$\theta_{нат}$ і буде меншим за 90° . Досягнувши верхньої кромки на торці капіляра, кривизна поверхні почне зменшуватися, зберігаючи при цьому $\theta_{нат}$ незмінним (пол.3). У відповідний момент часу меніск, здійснюючи рух по внутрішній кромці вихідного отвору, може прийняти горизонтальну форму, при цьому $\theta_{нат}$ залишатиметься незмінним (пол. 4).

На рис. 1а, 1б внутрішня і зовнішня кромки верхнього торця капіляра показані заокругленими тому, що гранично таку форму мають усі навіть найретельніше оброблені капіляри, що використовуються для визначення поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі. Перемістившись на горизонтальну поверхню верхнього торця капіляра меніск досягне деякого положення 7, при якому кут контакту рідини із торцем капіляра буде рівним $\theta_{нат}$.

Подальше збільшення об'єму краплі веде до переміщення її на зовнішню кромку верхнього торця капіляра. При цьому сама кромка починає відігравати роль шарніра, на якому росте крапля рідини. У випадку продовження збільшення об'єму краплі вона на мікроскопічну величину переходить на зовнішню бічну стінку капіляра. При цьому кут змочування відносно бічної стінки залишається постійним. Величина переходу на бічну стінку залежить від поверхневої енергії молекул рідини, що використовується для формування краплі. Подальше збільшення об'єму краплі веде до порушення балансу і, як наслідок, руйнування меніска і стікання його униз.

Аналогічним чином розглянемо формування лежачої краплі на верхньому торці такого ж капіляра у випадку рідини, що не змочує матеріал, з якого виготовлено капіляр (рис. 2.1б).

При положенні меніска у капілярі кут контакту рідини з поверхнею капіляра буде рівним $\theta_{нат}$ (у цьому випадку $\theta_{нат} > 90^\circ$). Досягнувши зовнішньої верхньої кромки капіляра, кут $\theta_{нат}$ збережеться і меніск з таким самими кутом $\theta_{нат}$ переміститься на горизонтальну площину верхнього торця капіляра.

Подальше збільшення об'єму краплі викликає переміщення її на бічну стінку капіляра, що було розглянуто у попередньому випадку. Принципової

відмінності між процесами утворення краплі рідиною, що змочує поверхню капіляра і рідиною, що не змочує її, немає. Як у першому, так і у другому випадках у процесі росту крапель спостерігається перехід їх із верхнього торця капіляра на його бічну стінку. В обох випадках існує граничний рівноважний стан, за якого дія ваги рідини на поверхню меніска уздовж лінії його контакту із капіляром компенсується поверхневою енергією взаємодії молекул рідини (іншими словами, силами поверхневого натягу, що виникають внаслідок існування цієї енергії). Відмінними є тільки граничні кути рівноважних станів (кути натікання, які визначаються змочуваністю чи незмочуваністю поверхні капіляра рідиною). При спробі подальшого незначного збільшення об'єму краплі остання руйнується.

Формування лежачої краплі можна здійснювати не тільки на торці товстостінного капіляра, а й ножового. Ножовим називається капіляр із загостреною кромкою. На рис. 2.2а показано процес утворення краплі на торці вертикально встановленого ножового капіляра рідиною, що змочує його поверхню.

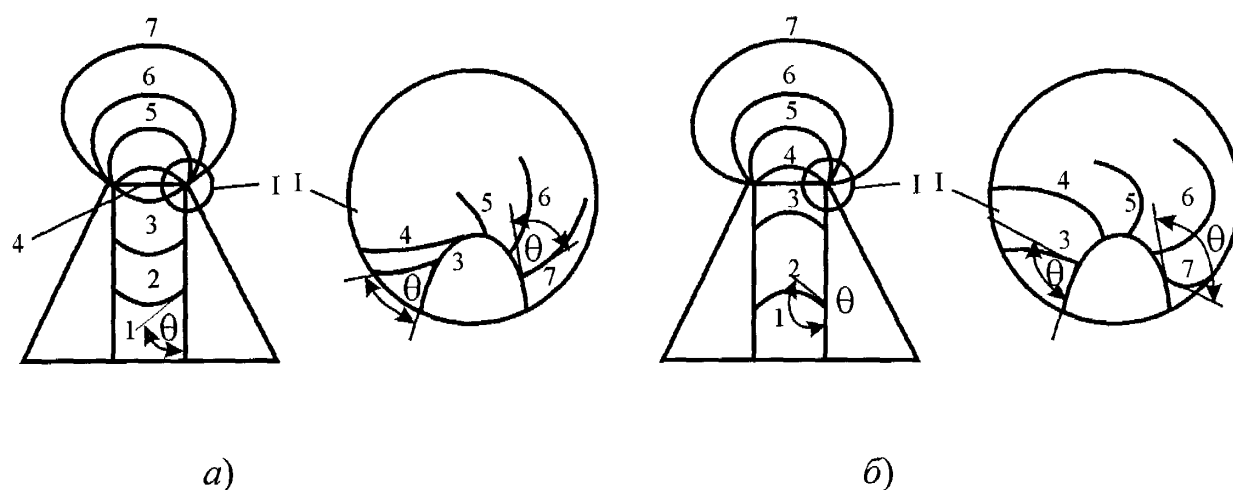


Рис. 2.2. Утворення краплі на торці ножового капіляра:

а) рідина змочує капіляр; б) рідина не змочує капіляр

Нехай в початковий момент меніск рідини знаходиться всередині циліндричного отвору капіляра (пол. 1). У результаті подачі рідини він переміщується

вгору по каналу. При цьому крайовий кут між стінкою отвору капіляра і меніском у точці їх дотику через рідину – кут натікання $\theta_{нат}$ буде меншим за 90° . Досягнувши верхньої кромки на торці капіляра, кривизна поверхні почне зменшуватися, зберігаючи при цьому $\theta_{нат}$ незмінним (пол.3). У відповідний момент часу меніск, здійснюючи рух по внутрішній кромці вихідного отвору, може прийняти горизонтальну форму, при цьому $\theta_{нат}$ залишатиметься незмінним (пол. 4). Характерною відмінністю формування краплі у цьому випадку (ця відмінність, однак, не міняє суті процесу, яка є загальною) є значно менші розміри горизонтальної частини торця капіляра. Тому перехід меніска на бічну поверхню капіляра буде значно швидшим (не слід забувати, що мова ведеться про мікроскопічно малі переміщення по бічній поверхні капіляра).

У випадку формування краплі рідини, що не змочує поверхні капіляра, процес відбувається аналогічно з тією різницею, що кут натікання $\theta_{нат}$ більший за 90° (рис. 2б).

Як відомо, молекули рідини розташовуються одна біля одної у межах радіуса молекулярної взаємодії $r \approx 10^{-9}$ м, що дорівнює декільком ефективним діаметрам молекули. Сфера із радіусом r називається сферою молекулярної дії.

Таким чином, кожна молекула притягається усіма молекулами, що знаходяться усередині сфери молекулярної дії, центр якої співпадає із центром даної молекули. Для молекули, що знаходиться від поверхні рідини на відстані, що перевищує r , результуюча сила притягання в середньому рівна нулю (рис. 2.3).

Ситуація складається інакше, якщо молекула знаходиться від поверхні на відстані меншій за r . Оскільки густина газоподібного середовища над поверхнею рідини набагато менша за густину рідини, то у частині сфери, що виступає за межі рідини молекулярної дії, молекули практично відсутні. Тому на молекулу, що знаходиться у поверхневому шарі товщиною r діє сила F , направлена усередину рідини. Модуль цієї сили зростає при переході від внутрішньої до зовнішньої межі шару.

Сумарна енергія частинок рідини складається із кінетичної енергії їхнього теплового руху та потенціальної енергії, зумовленої силами міжмолекулярної взаємодії. Для переміщення молекули із глибини рідини у поверхневий шар необхідно здійснити роботу проти діючих у цьому шарі сил. Ця робота здійснюється молекулою за рахунок запасу кінетичної енергії і використовується на збільшення її потенціальної енергії. Тому молекули поверхневого шару рідини володіють більшою потенціальною енергією, ніж частинки усередині рідини. Ця додаткова енергія називається поверхневою енергією, пропорційною площі шару S :

$$\Delta E = \sigma \Delta S. \quad (2.1)$$

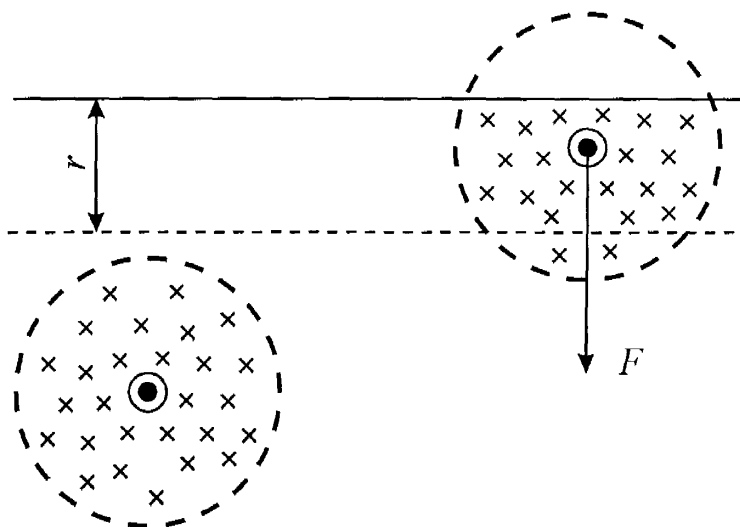


Рис. 2.3. Вплив сил взаємного притягання молекул рідини на молекулу углибині рідини (зліва) і у поверхневому шарі (справа)

Якщо поверхня рідини не плоска, а викривлена, то вона чинить на рідину додатковий тиск. Цей тиск, зумовлений силами поверхневого натягу, для випуклої поверхні має додатній знак, для увігнутої – від’ємний і направлений у протилежний бік.

Для розрахунку надлишкового тиску припустимо, що вільна поверхня рідини має форму сфери із радіусом R , від якої уявно відсічено кульовий сегмент, що спирається на коло із радіусом $r = R \sin \alpha$ (рис. 2.4).

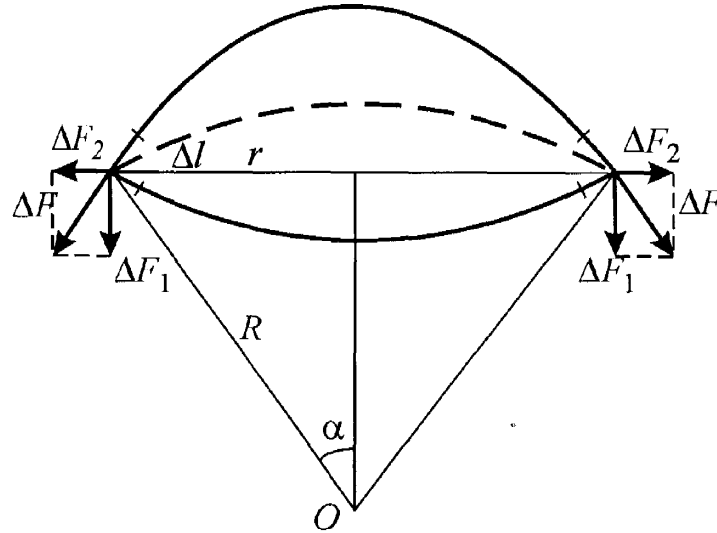


Рис. 2.4. Сегмент вільної поверхні рідини

На кожний нескінченно малий елемент довжини Δl цього контуру діє сила поверхневого натягу $\Delta F = \sigma \Delta l$, дотична до поверхні сфери. Розклавши ΔF на дві складові (ΔF_1 та ΔF_2), бачимо, що геометрична сума сил ΔF_2 рівна нулю, оскільки ці сили взаємно зрівноважуються. Тому рівнодійна сил поверхневого натягу направлена перпендикулярно до площини перерізу усередину рідини і дорівнює:

$$F = \sum \Delta F_1 = \sum \Delta F \sin \alpha = \sum \sigma \Delta l \frac{r}{R} = \frac{\sigma r}{R} \sum \Delta l = \frac{\sigma r}{R} 2\pi r. \quad (2.2)$$

Розділивши цю силу на площу основи πr^2 , отримаємо надлишковий тиск на рідину, що створюється силами поверхневого натягу і зумовлюється кривизною поверхні:

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{2\sigma \pi r^2}{R \pi r^2} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (2.3)$$

Рівність (2.3) є частковим випадком формули Лапласа [1], що визначає надлишковий тиск для довільної поверхні рідини двоякої кривизни.

Резюмуючи вищеописане, відзначимо, що формування лежачої краплі можна здійснювати як на горизонтальній пластині, так і на вертикально встановленому капілярі (ножовому чи товстостінному). Для проведення

практичних досліджень доцільно використовувати капіляри, оскільки пластина не забезпечує осесиметричності крапель. Крім того, використання капіляра дозволяє контролювати розміри краплі і змінювати їх у процесі визначення σ .

2.2. Розробка методики розрахунку параметрів лежачої краплі і аналіз отриманих результатів

Для проведення оцінки розмірів лежачої краплі, розробки в подальшому удосконалених методик визначення поверхневого натягу σ методом лежачої краплі, оцінки похибок відомих і запропонованих методик вимірювання σ методом лежачої краплі тощо необхідні методика, алгоритм, відповідний програмний пакет, початкові і граничні умови, які дозволяють отримати усі необхідні геометричні параметри краплі.

Слід підкреслити, що зв'язок між поверхневою енергією і розмірами краплі складний і недостатньо наочний. Поверхневі сили надають краплі кулястої форми з мінімальною площею поверхні, у той час як гравітаційні розплющують краплю в шар мінімальної товщини. Такі міркування тільки дають підстави для формулювання диференціальних рівнянь, розв'язок яких неможливо одержати в елементарних функціях [4]. Сформувати картину утворення крапель, знайти їхні подібності і відмінності можуть допомогти уявлення про подібні осесиметричні поверхні розділу легкокорухомих фаз.

Положення про подібність менісків почали розвиватися ще у минулому сторіччі. Башфорт та Адамс у [14] в диференціальному рівнянні для осесиметричних менісків здійснюють перетворення координат шляхом ділення їх на радіус кривизни при вершині меніска R_0 . Безпосередньо про подібність менісків тут не згадується, але таке перетворення можливе лише завдяки певним особливостям подібних явищ [3].

Уявлення про подібність дають можливість вказати на найбільш прийнятні форми залежностей між будь-якими однозначно заданими геометричними

параметрами краплі та сукупністю фізичних величин, об'єднаних у поняття капілярної сталої a^2 , якою визначається форма меніска.

Важливою задачею є встановлення цих залежностей.

За відправну точку при вирішенні поставленої задачі – математичному описові процесу утворення лежачої краплі – зручно вибрати основне рівняння капілярності [1,2,3], яке з врахуванням зображення лежачої краплі (рис. 2.5) буде таким:

$$\Delta P_A = P_{1A} - P_{2A} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.4)$$

де ΔP_A – перепад тиску через поверхню краплі у т. A ; P_{1A} – тиск усередині краплі біля т. A , P_{2A} – тиск зовні краплі біля т. A . R_1, R_2 – радіуси кривизни поверхні меніска у двох взаємно-перпендикулярних перерізах, яким належить точка A .

З іншого боку, тиск P_{1A} з урахуванням тиску P_{1O} усередині краплі біля її вершини, віддалі по вертикалі від т. O до т. A з і густини рідини у краплі ρ_1 буде таким:

$$P_{1A} = P_{1O} + \rho_1 gz. \quad (2.5)$$

Аналогічно тиск P_{2A} з урахуванням тиску зовні краплі біля її вершини P_{2O} , віддалі z і густини повітря ρ_2 буде таким:

$$P_{2A} = P_{2O} + \rho_2 gz. \quad (2.6)$$

Підставляючи (2.5) і (2.6) у (2.4) отримаємо, що

$$P_{1O} + \rho_1 gz - P_{2O} - \rho_2 gz = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.7)$$

Різниця тисків ($P_{1O} - P_{2O}$) визначається також кривизною поверхні у її вершині (у т. O) таким чином:

$$P_{1O} - P_{2O} = 2\sigma / b. \quad (2.8)$$

Тоді (2.7) з урахуванням (2.8) буде таким:

$$\frac{2\sigma}{b} + \Delta\rho g z = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.9)$$

Якщо поділити (2.9) на σ , тоді з урахуванням виразу для a^2 отримаємо наступне:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{2}{b} + \frac{2}{a^2} z. \quad (2.10)$$

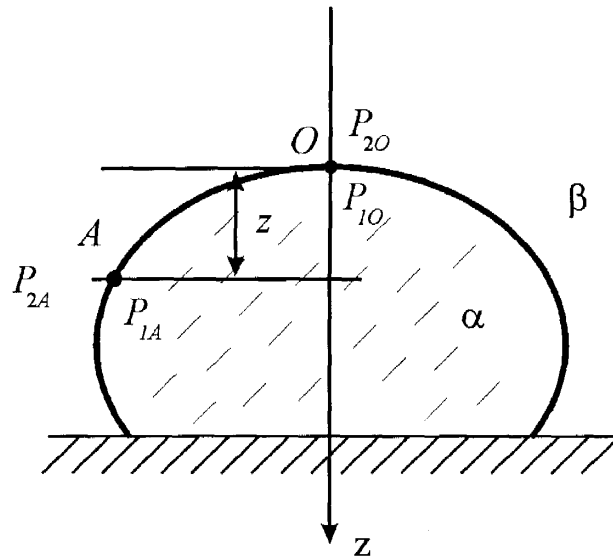


Рис. 2.5. Осесиметрична лежача крапля

Меридіональний радіус кривизни осесиметричного меніска визначається як:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\varphi}{dl}, \quad (2.11)$$

де φ – кут нахилу дотичної у довільній точці меридіана, s – довжина дуги у цій точці (рис. 2.6).

Для будь-якої поверхні обертання один із головних радіусів кривизни дорівнює довжині відрізка нормалі до перетину її з віссю обертання. З рис. 2.6 видно, що

$$KM = R_2 = \frac{x}{\sin \varphi}. \quad (2.12)$$

Таким чином, можемо записати [31]:

$$\frac{d\varphi}{dl} + \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{2}{b} + \frac{2}{a^2} z, \quad (2.13)$$

де φ – кут нахилу дотичної до профілю лежачої краплі у даній точці; l – довжина дуги профілю краплі від омболічної точки до розглядуваної; x, y – відповідно горизонтальна і вертикальна координати точки профілю. Початковими умовами для розв'язку рівнянь системи (2.13) при $\varphi = 0$ є такі: $x = y = 0$, $R_1 = R_2 = b$, де R_1 і R_2 – радіуси кривизни поверхні в точці поверхні краплі, що розглядається, у взаємно-перпендикулярних перерізах, один із яких є меридіанним.

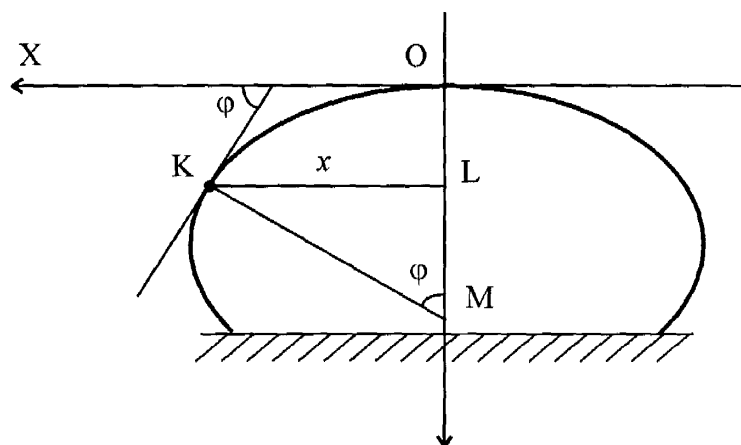


Рис. 2.6. Меридіан лежачої краплі

Дане рівняння можна записати у розмірній формі у вигляді системи рівнянь (1.19).

За потреби існує можливість знаходити площу та об'єм капілярної поверхні. У цьому випадку до системи (2.14) потрібно ввести дві додаткові рівності:

$$\frac{dA}{ds} = 2\pi x; \quad (2.14)$$

$$\frac{dV}{ds} = \pi x^2 \cos \varphi, \quad (2.15)$$

де V – об'єм меніска, A – площа поверхні.

У випадку, коли зручніше оперувати безрозмірними параметрами, можна здійснити наступні перетворення. Позначимо

$$l_1 = \frac{l}{a}, \quad \beta = \frac{b^2}{a^2}, \quad z_1 = \frac{z}{a}, \quad x_1 = \frac{x}{a} \quad (2.16)$$

і помножимо кожен із доданків рівності (2.13) на a . При цьому (2.13) набуде наступного вигляду:

$$a \frac{d\varphi}{dl} + a \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{2}{b} a + \frac{2}{a} z. \quad (2.17)$$

З урахуванням (2.16) можна записати:

$$\frac{d\varphi}{dl_1} + \frac{\sin \varphi}{x_1} = \frac{2}{\sqrt{\beta}} + 2z_1. \quad (2.18)$$

Таким чином, рівняння (2.18) дає можливість встановити теоретичний профіль лежачої краплі у безрозмірних координатах. Форма його визначається

коефіцієнтом β . Діапазон зміни коефіцієнта β можна оцінити, виходячи із реально можливих значень a^2 та R_0 ($\beta = 0,1 \div 10$).

Розв'язком рівняння (2.18) буде набір значень $\varphi_i, \frac{s_i}{a}, \frac{x_i}{a}, \frac{z_i}{a}$ для певного значення β , $i = 1 \dots n$, де n – кількість точок, отриманих у процесі розв'язування.

Для дослідження процесу утворення лежачої краплі на верхньому торці вертикально встановленого ножового капіляра розроблено програму, спрощений графічний алгоритм функціонування якої у середовищі Windows наведено на рис. 2.7. На рис. 2.8. показано схему обробки повідомлень даної програми. До циклу обробки повідомлень входить розрахунок параметрів краплі методом Рунге-Кутта (блок-схема якого подана на рис. 2.9) за заданими параметрами (початкові умови для розв'язку диференціального рівняння, коефіцієнт форми краплі, крок).

Маючи у своєму розпорядженні набір точок, що описує профіль лежачої краплі та знаючи діаметр капіляра, на якому повинна бути сформована краплі, можна знайти координати точок перетину меридіана краплі та верхнього торця вертикально встановленого капіляра. Для цього необхідно вибрати точки, що лежать по обидва боки від відомого радіуса капіляра, апроксимувати їх поліноміальною залежністю, а потім знайти точні координати точки перетину меніска із прямою, що описує край капіляра (проведеною паралельно до вертикальної вісі; визначається x/a - координатою – радіусом капіляра у безрозмірних координатах). Для розв'язку системи рівнянь, що утворюється при апроксимації капілярної поверхні поліноміальною залежністю, використовується метод Гауса (блок-схема його наведена на рис. 2.10). Таким чином, змінюючи параметр β – коефіцієнт форми краплі і відшукуючи координати точок перетину капілярної поверхні із радіусом капіляра, маємо можливість моделювати процес росту краплі, який відбувається за рахунок примусового збільшення її об'єму шляхом подавання рідини через нижній торець капіляра. На рис. 2.11 наведено вигляд вікна програми для розрахунку параметрів лежачої краплі із діалоговим вікном вхідних даних.

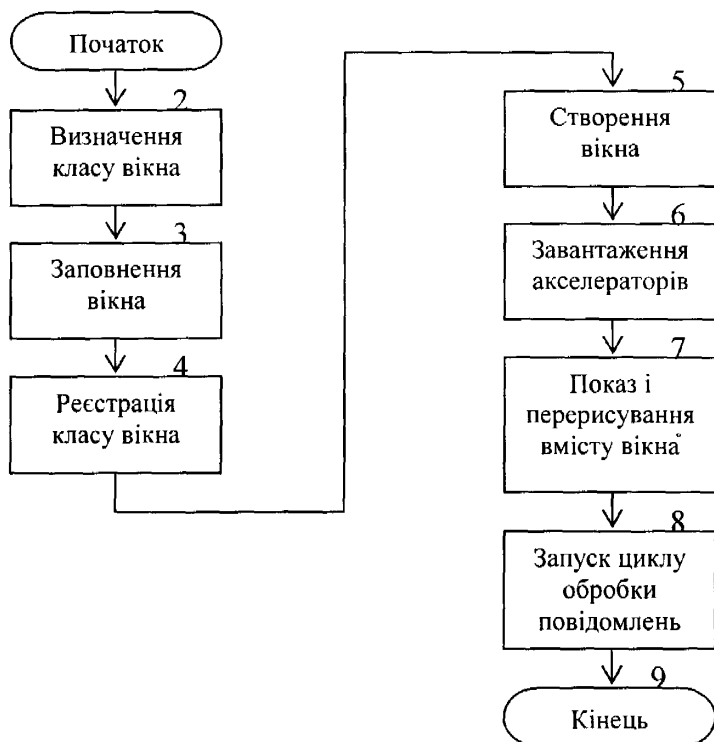


Рис. 2.7. Спрощений алгоритм функціонування програми розрахунку параметрів лежачої краплі у середовищі Windows

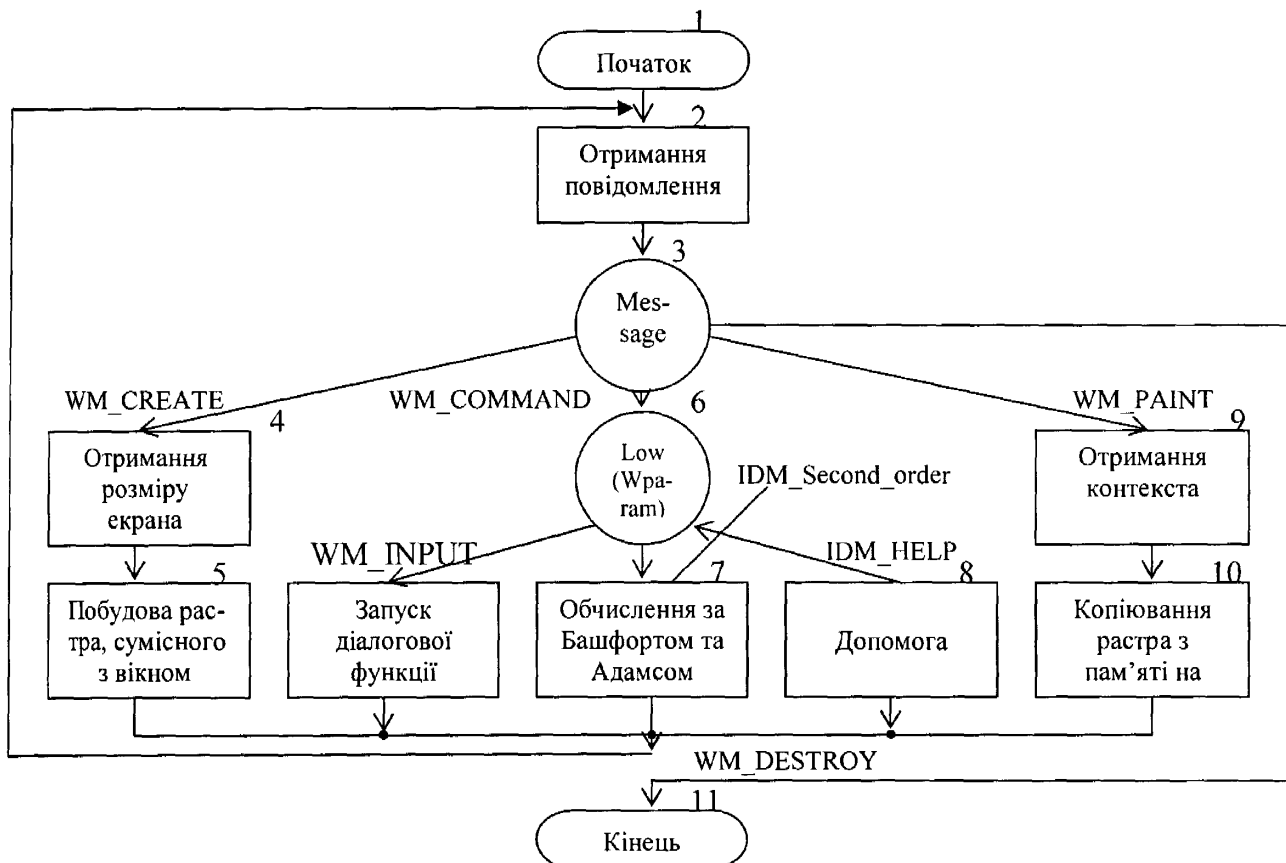


Рис. 2.8. Схема обробки повідомлень

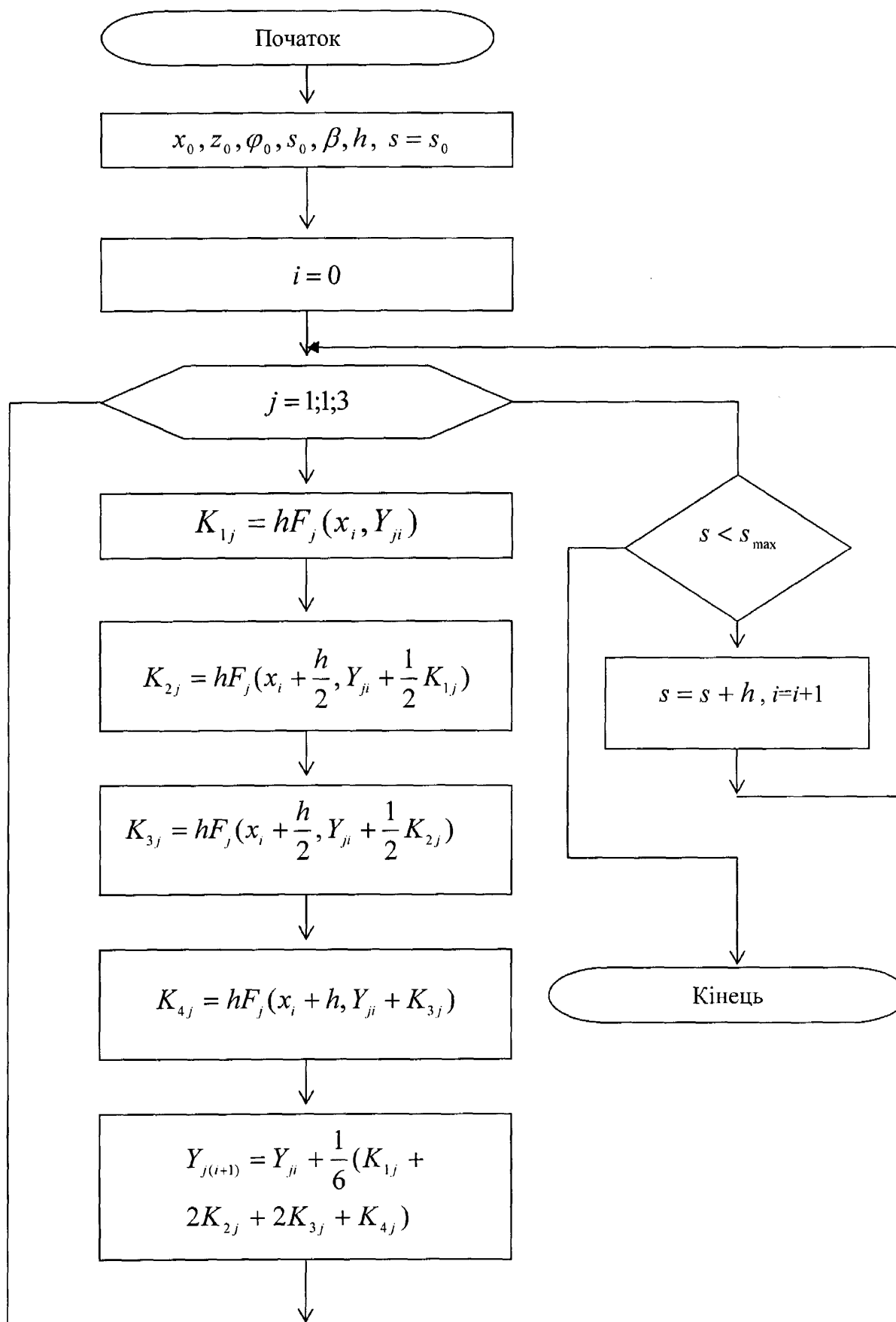


Рис. 2.9. Блок-схема підпрограми розв'язку системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта

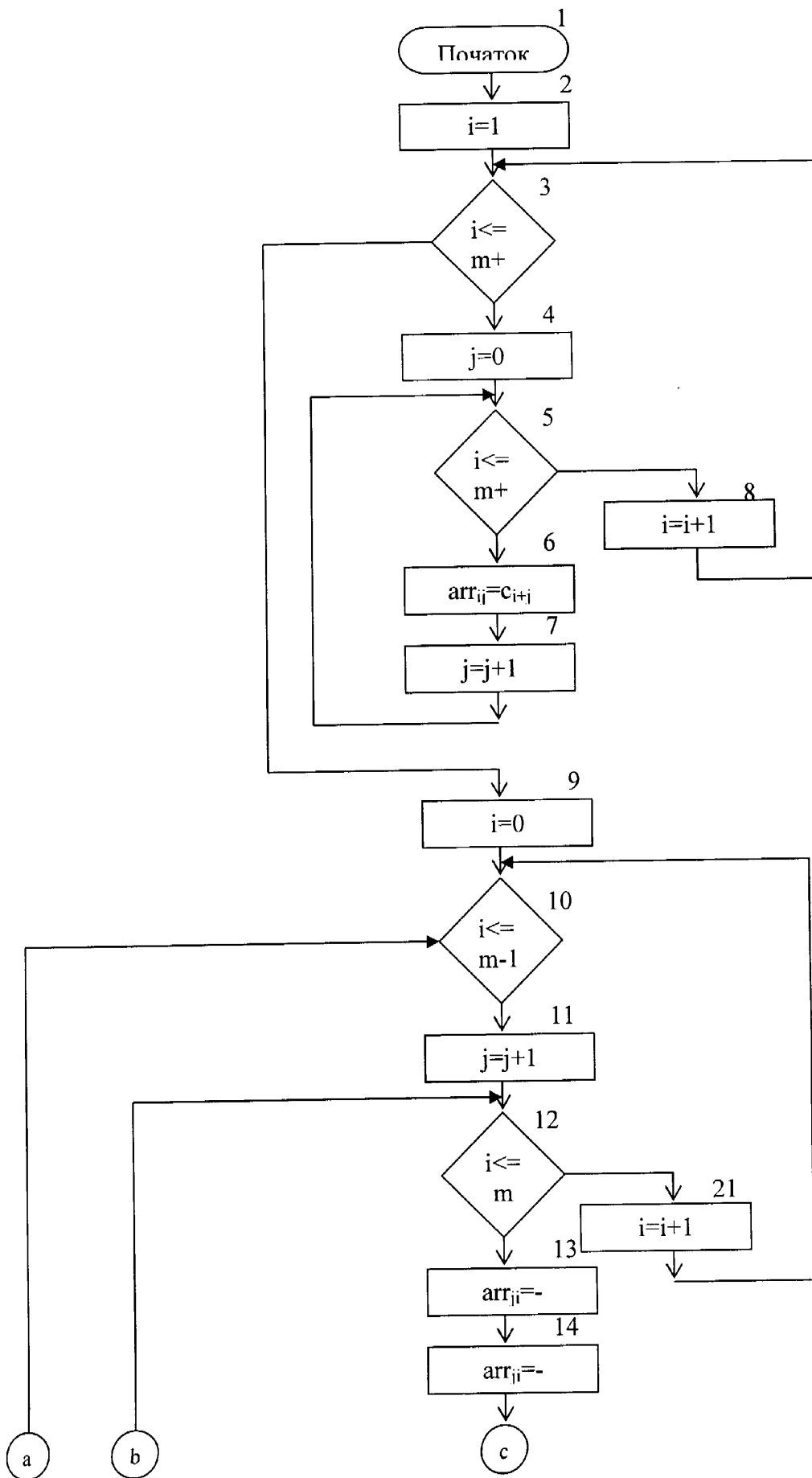


Рис. 2.10. Розв'язок системи лінійних рівнянь методом Гауса

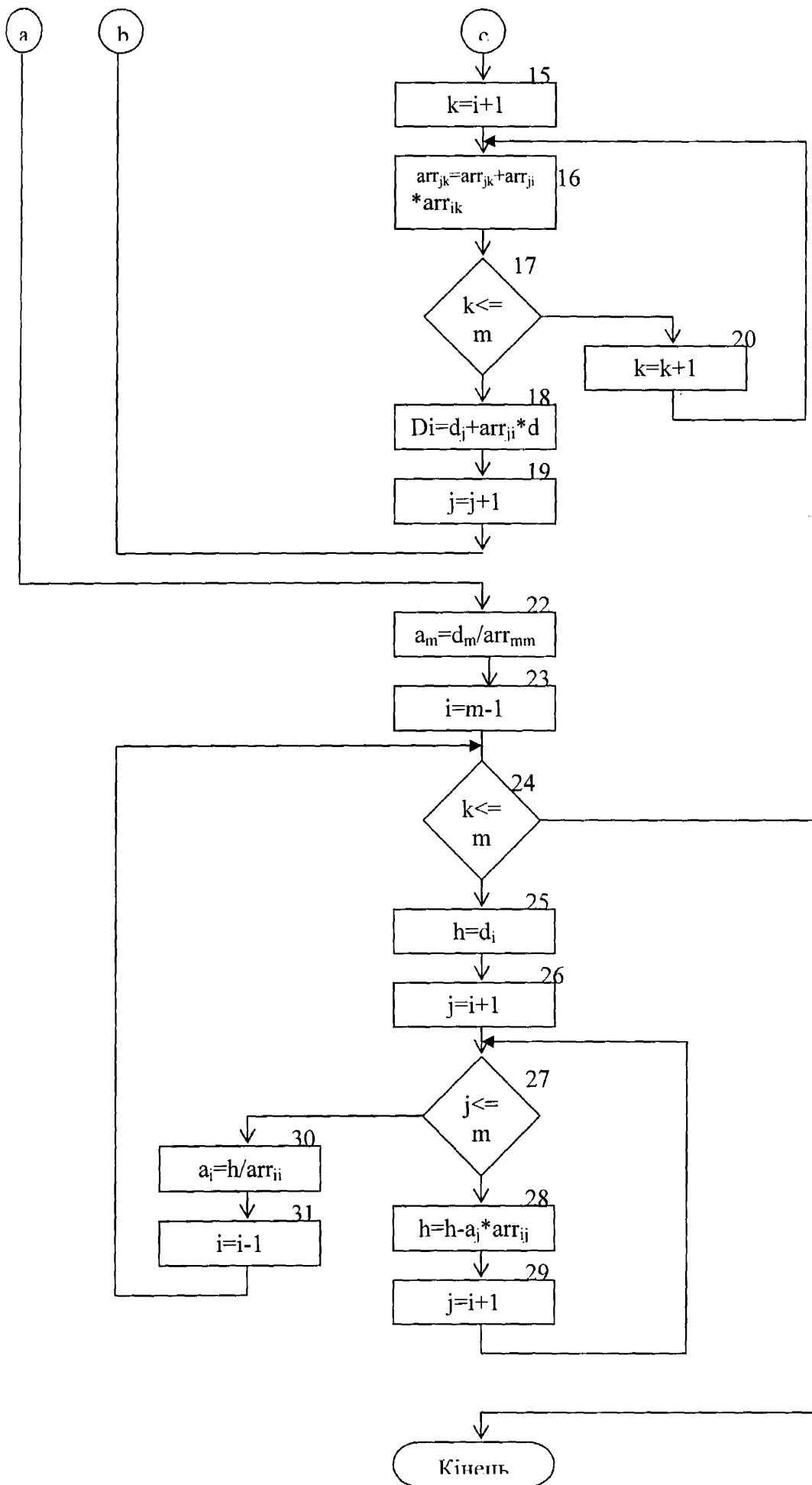


Рис. 2.10. Розв'язок системи лінійних рівнянь методом Гауса (продовження)

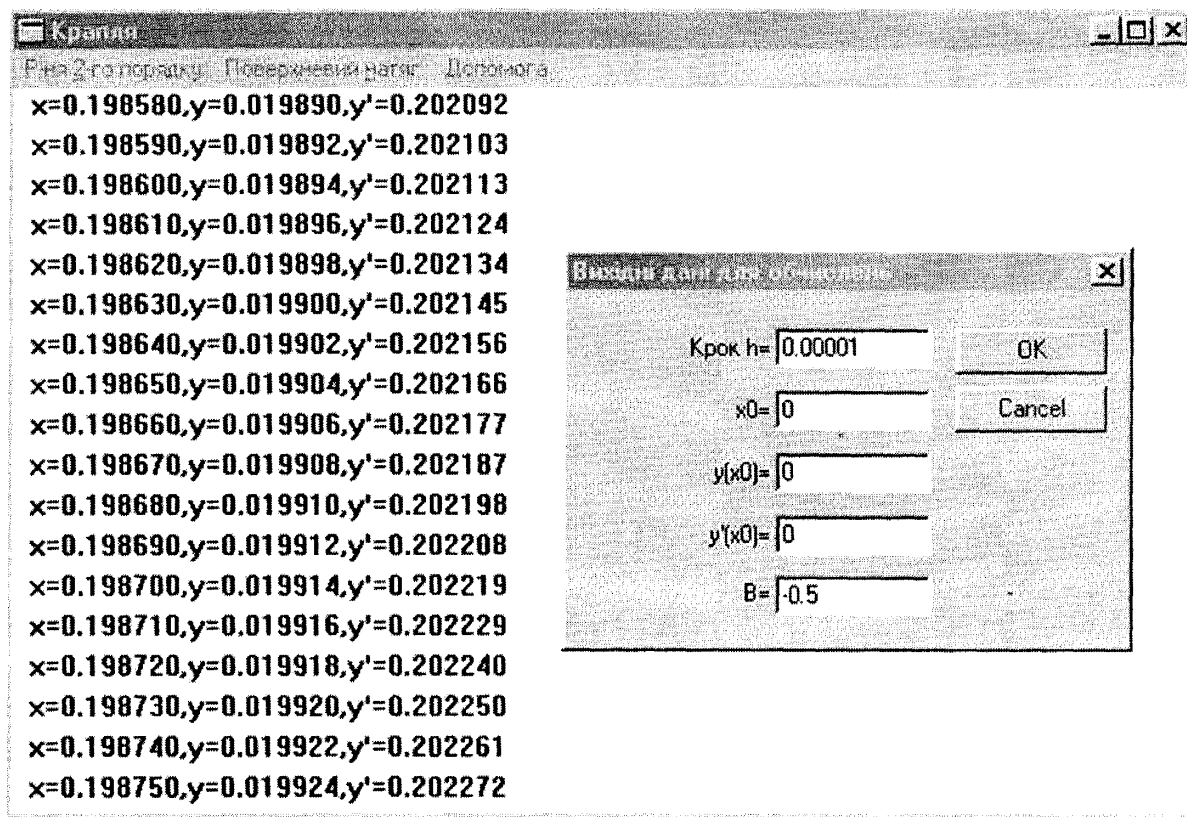


Рис. 2.11. Вікно програми для розрахунку параметрів лежачої краплі

Текст програми для розрахунку параметрів лежачої краплі наведено у додатку А. Результати розрахунків у вигляді таблиці – у додатку Б.

На рис. 2.12 наведено результати розрахунку декількох профілів лежачої краплі при зміні коефіцієнта форми краплі β : у межах від 0,1 до 0,5 β змінюється із кроком 0,1, від 0,5 до 5 – із кроком 0,5 і від 5 до 10 – із кроком 1,0.

Процес росту краплі для наочності проілюстровано таким чином, що омболічні точки (вершини) профілів співпадають. Іншими словами, на рис. 2.12 процес росту краплі зображено відносно вершини краплі. Для того, щоб показати процес росту краплі на капілярі заданого діаметра необхідно знайти координати точок перетину кожного із профілів із прямою, що характеризує радіус верхнього торця капіляра. Після цього необхідно сумістити такі точки кожного профілю. Таким чином можна розглянути процес утворення краплі відносно торця капіляра.

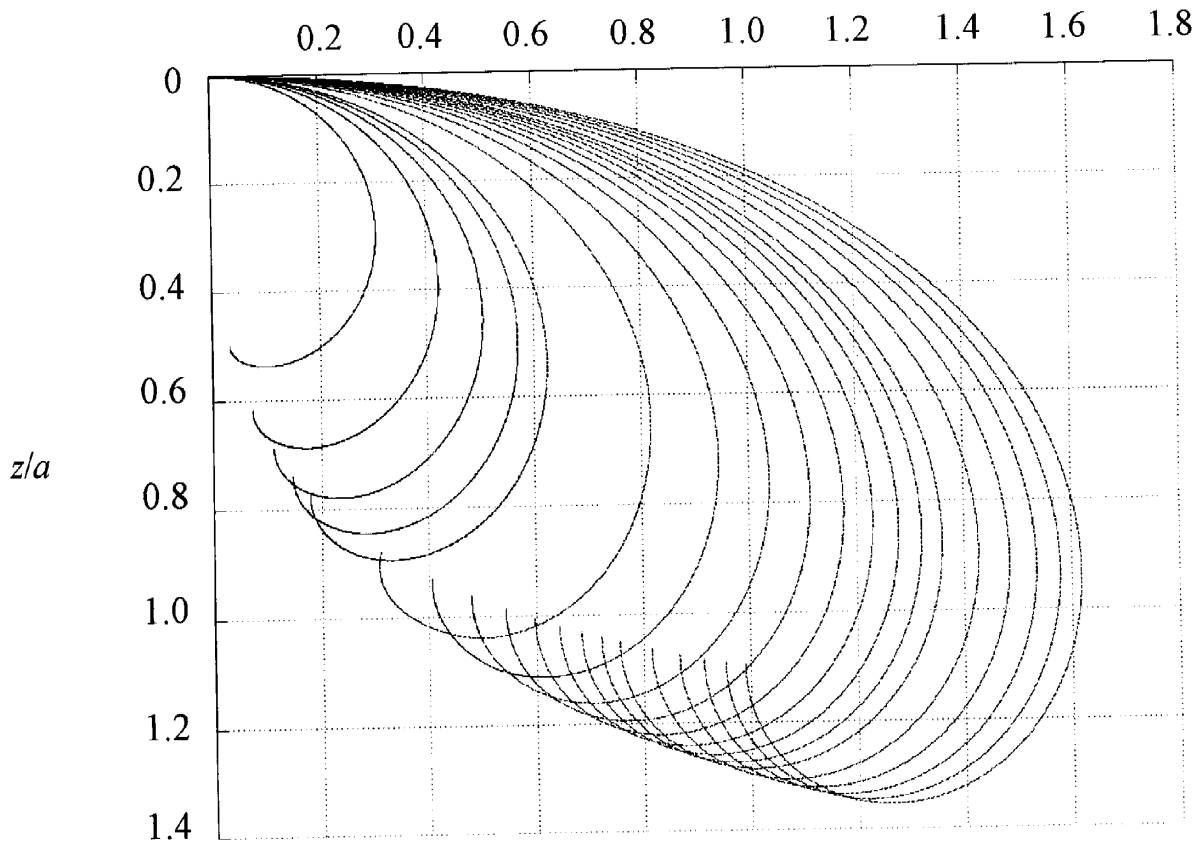


Рис. 2.12. Результати розрахунку профілів лежачої краплі при зміні коефіцієнта форми

Результат проведення таких операцій наведено на рис. 2.13. Профілі розраховано для значення радіуса капіляра $0.8/a$. Коефіцієнт форми краплі β змінюється від 1 до 5 з кроком 0,5.

Аналіз проведених розрахунків показує, що у процесі росту при зміні β від 0,1 до 10 розміри краплі змінюються у межах: висота екватора – від $0,3/a$ до $0,95/a$, екваторіальний діаметр краплі – від $0,6a$ до $3,3/a$. Тут вказано значення висоти екватора відносно вершини краплі, оскільки екваторіальний діаметр часто використовують як один із параметрів, що визначають профіль краплі.

З рис. 2.13 видно, наприклад, що проведення вимірювань можливе для крапель, дотичні до меридіанів яких у точці контакту із капіляром утворюють з горизонталлю кут, менший за 180° . Такий висновок очевидний, оскільки вимірювання параметрів лежачої краплі здійснюється на основі її тінювого

зображення. Тому у випадку, коли значення вказаного кута перевищить 180° , площа капіляра стане закритою поверхнею рідини. Це призведе до того, що з поля зору дослідника зникне точка відліку.

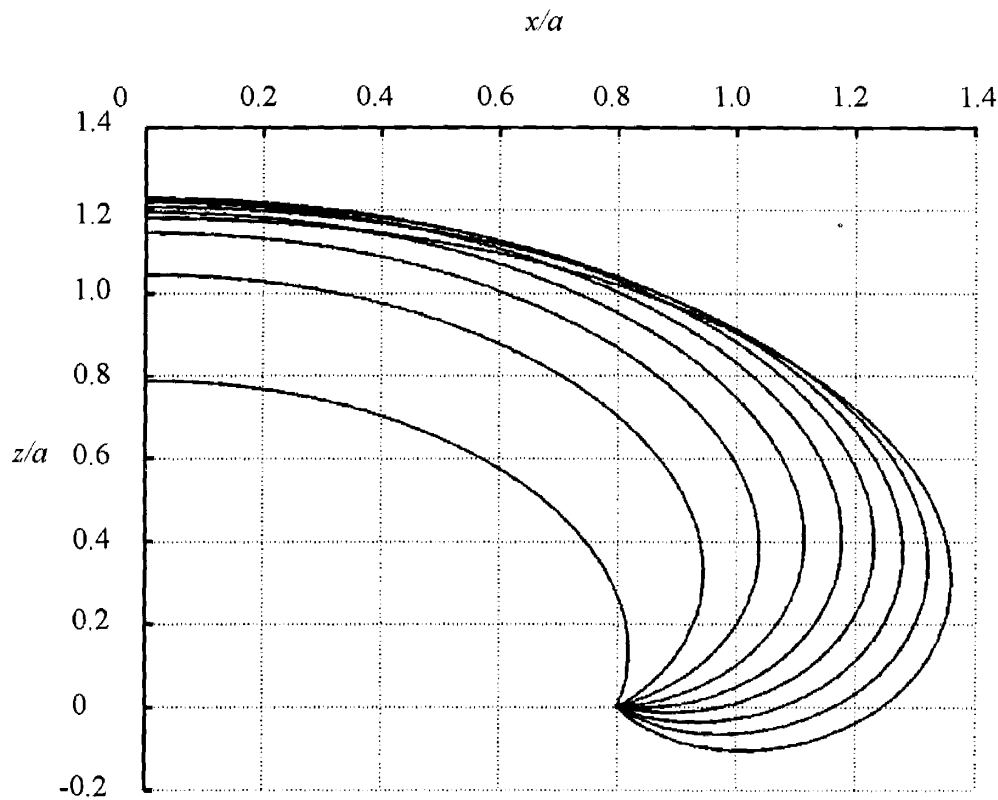


Рис. 2.13. Процес утворення краплі на торці вертикально встановленого ножового капіляра (радіус капіляра становить $0,8/a$)

Математичне моделювання профілю лежачої краплі дає можливість оцінювати зміну її розмірів у процесі росту, що дозволяє оптимально проектувати оптичні системи приладів для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі, а також полегшує розробку нових методик вимірювання поверхневого натягу вказаним методом.

2.3. Аналіз процесу проходження променів світла через лежачу краплі при вимірюванні поверхневого натягу

Вирішуючи задачу формування лежачої краплі та отримання її тіньового зображення, необхідно знати процес утворення такого зображення та вплив на нього положення і характеристик оптичної системи освітлювача.

Геометрична оптика, залишаючись наближеним методом побудови зображень в оптичних системах, дозволяє розібрати основні явища, пов'язані із проходженням через них світла і є основою теорії оптичних приладів. Скористаємося її законами для побудови ходу променів при проходженні через утворену лежачу краплю у процесі вимірювання поверхневого натягу.

Оскільки лежача крапля – ніщо інше як рідина, її можна розглядати як двовипуклу лінзу. Викладене нижче використовуватиме терміни “сферична поверхня” та “лінза”, маючи на увазі поверхню краплі та, власне, саму краплю.

Для побудови ходу променів через рідину краплі скористаємося геометричною моделлю заломлення променів при проходженні через сферичну поверхню.

На рис. 2.14 розглядається заломлення світла на сферичній поверхні (поверхні лежачої краплі), що розділяє два середовища з показниками заломлення n_1 та n_2 (повітря та рідину). Точка S – джерело світла. Пряма MN , що проходить через точкове джерело світла S і центр кривизни C сферичної поверхні – це оптична вісь сферичної поверхні. Точка O перетину поверхні з оптичною віссю називається вершиною поверхні. Промінь SO , який перпендикулярний до поверхні, проходить через краплю далі, не заломлюючись. Для побудови зображення S' проведемо довільний промінь SA , який заломлюється у точці A і йде у напрямі AS' .

Спочатку розглянемо тільки параксіальні промені, що утворюють з оптичною віссю малі кути (відстань h мала у порівнянні із радіусом R). Тільки для параксіальних променів отримується стигматичне зображення, тобто усі промені параксіального пучка, що виходять із точки S , перетинають оптичну вісь в одній і тій самій точці S' . Приймемо напрямки відрізків від вершини поверхні: за променем SA – позитивні, проти променя – негативні. Відлік кутів починається від оптичної вісі і нормалей до сферичної поверхні: за годинниковою стрілкою – позитивні, проти – негативні. Для параксіальних променів усі кути, показані на рис. 2.14, будуть малими, тому синуси і тангенси цих кутів можна прийняти рівними самим кутам.

Згідно із законом заломлення $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$, де i_1 – кут падіння, i_2 – кут заломлення променя $n_1 \sin(-i_1) = n_2 \sin(-i_2)$. Замінивши синуси кутів значеннями самих кутів, отримаємо

$$n_1(-i_1) = n_2(-i_2). \quad (2.19)$$

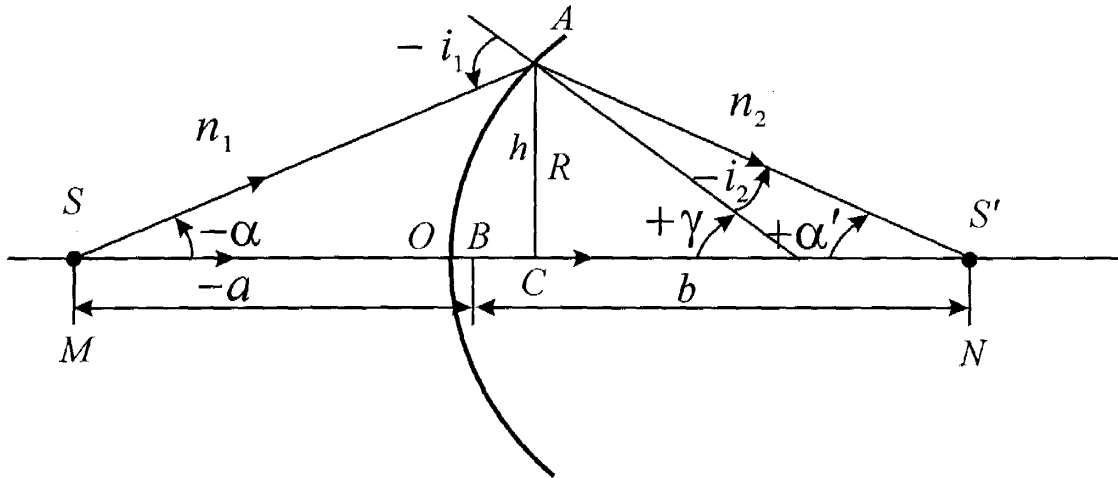


Рис. 2.14. Хід променів при проходженні через сферичну поверхню
(поверхню лежачої краплі)

Кути $(-i_1)$ і γ , будучи зовнішніми стосовно трикутників SAB і $S'AC$, будуть рівними сумі двох внутрішніх: $-i_1 = \gamma - \alpha$, $\gamma = -i_2 + \alpha'$, тобто:

$$\begin{cases} -i_1 = \gamma - \alpha, \\ -i_2 = \gamma - \alpha'. \end{cases} \quad (2.20)$$

Підставивши у (2.19) значення кутів із (2.20), отримаємо

$$n_1(\gamma - \alpha) = n_2(\gamma - \alpha'). \quad (2.21)$$

Твердження про постійність коефіцієнта заломлення для оптичної системи (у даному випадку мають на увазі лежачу краплю) справедливе тільки для освітлення її монохроматичним світлом ($\lambda = const$, де λ – довжина хвилі світла);

у випадку немонохроматичності світла необхідно враховувати залежність коефіцієнта заломлення речовини лінзи (краплі) і середовища (якщо це середовище не повітря) від довжини хвилі. При попаданні на поверхню лежачої краплі білого світла різні його монохроматичні складові фокусуються у різних точках (найбільшу фокусну віддаль мають червоні промені, найменшу – фіолетові), тому зображення розмите і на краях забарвлене. Це явище називається хроматичною аберацією.

Базуючись на вищеописаному, побудуємо модель проходження світла через краплю рідини, утворену на торці вертикально встановленого капіляра у напрямку, перпендикулярному до вісі обертання краплі у площині, якій належить вісь обертання.

Розглянемо ідеальний варіант. Нехай промені світла поширюються паралельним монохроматичним пучком, що дозволить при розрахунку прийняти коефіцієнт заломлення рідини краплі $n_2 = const$. Схему моделі наведено на рис. 2.15.

Дана модель призначена для отримання теоретичного тіньового зображення лежачої краплі на світлочутливій ПЗЗ матриці відеокамери.

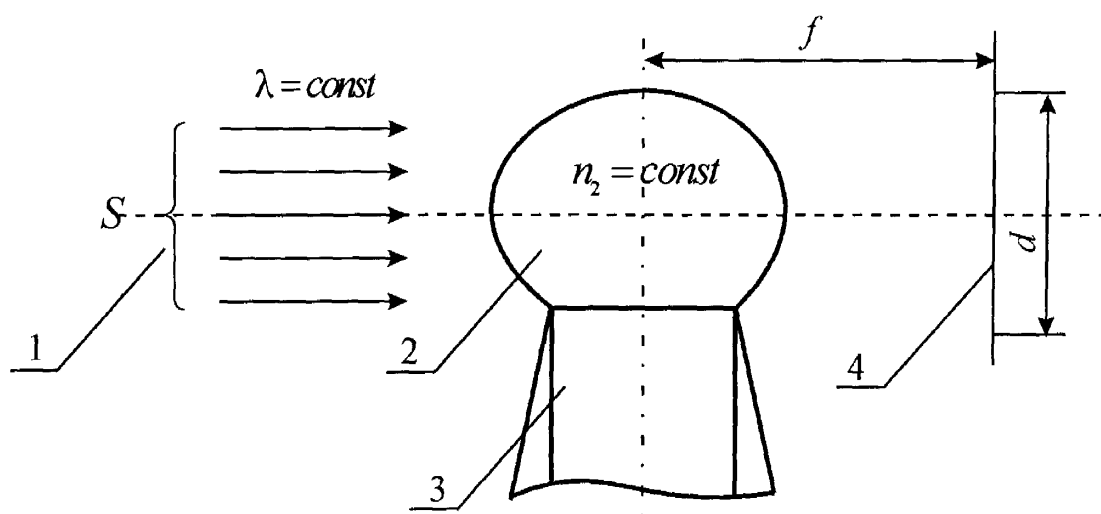


Рис. 2.15. Схема моделі проходження променів світла через лежачу краплю:

- 1 – джерело параксіальних монохроматичних променів;
- 2 – лежача крапля; 3 – ножовий капіляр; 4 – екран (об'єктив)

Промінь світла, поширюючись у просторі від джерела S , досягає краплі 2 під кутом i_1 , заломлюється на межі розділу повітря – рідина під кутом i_2 до нормалі до поверхні у даній точці і продовжує рух в об'ємі краплі. Досягнувши межі розділу рідина – повітря промінь, потрапляючи на межу під кутом i_1' до нормалі, заломлюється і виходить з об'єму краплі під кутом i_2' до нормалі до поверхні у точці виходу. Після цього він продовжує свій рух у повітрі, поки не потрапить у площину об'єктива 4, що знаходиться на відстані, рівній фокусній віддалі об'єктива f від меридіанного перерізу краплі, яка обмежена величиною діаметра d . Таким чином утворюється тіньове зображення лежачої краплі. Розглянемо цей процес детальніше.

На рис. 2.16 зображено проходження променів освітлювача через лежачу краплю у двох проекціях (вигляди збоку та зверху). Для наочності у просторі вибрано три характерні промені: AA' , BB' та CC' .

Точки A , B , C на даному рисунку належать меридіанному перерізові краплі. Промені перетинають межу розділу повітря – рідина під кутами i_1^A , i_1^B та 0° (точка C). Заломлюючись відповідно під кутами i_2^A , i_2^B до нормалей до поверхонь у даних точках, вони рухаються в об'ємі рідини, поки не перетнуть її поверхню у точках A' , B' , C' під кутами, що складають із нормаллями до поверхні у даних точках кути $i_1^{A'}$, $i_1^{B'}$, 0° (точка C).

Варто звернути увагу на промінь, якому належать точки C , C' . Він особливий, оскільки проходить через об'єм краплі без заломлення.

Після цього дані промені виходять з краплі, заломлюючись на межі розділу рідина – повітря під кутами $i_2^{A'}$, $i_2^{B'}$ до нормалей до поверхні. Далі вони рухаються у повітрі, поки не потрапляють у площину об'єктива, що визначається розміром d . З рис. 2.16 видно, що промінь, якому належать точки A та A' не потрапляє у ці межі, тому точка з відповідними координатами на світлочутливій матриці відеокамери буде неосвітленою. А точка матриці, що знаходиться навпроти точки C , буде освітленою максимально.

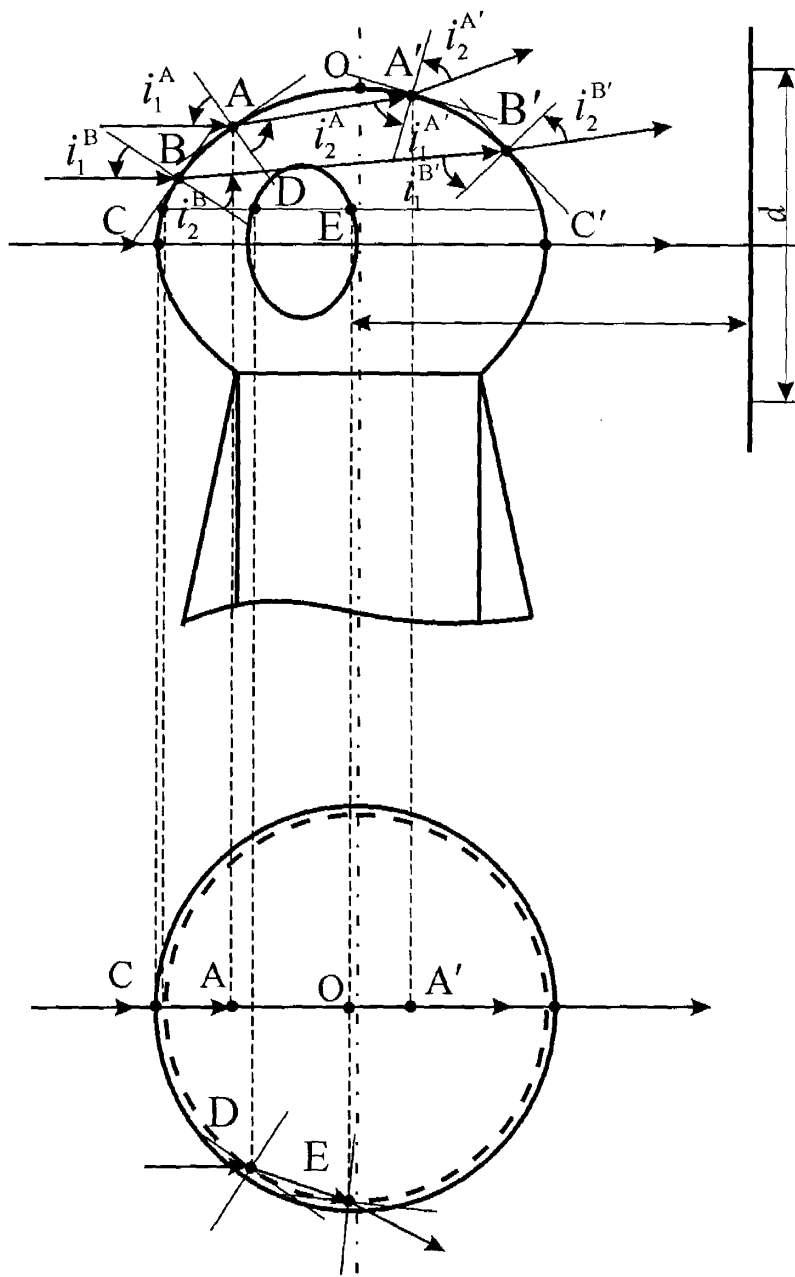


Рис. 2.16. Хід променів освітлювача в об'ємі лежачої краплі

Дещо складніше отримати розподіл освітленості для променів, що перетинають межу розділу повітря – рідина у точках, що не належать меридіанній (їй належать згадані точки A , B , C , A' , B' , C') чи екваторіальній площинам перерізу. Дані площини характерні тим, що заломлення променя при проходженні межі розділу відбувається лише в одному напрямі, інший – відомий і не змінюється. У точках, що не належать цим площинам, відбувається 3-вимірне заломлення променів.

Для побудови променя, що перетинає межу розділу повітря – рідина у довільній точці поверхні D , необхідно побудувати проекцію точки D на горизонтальну площину. Після цього знаходимо заломлення променя i , продовжуючи його хід, отримуємо точку E перетину променя з поверхнею краплі на межі розділу рідина – повітря. Відрізок DE – це проекція шуканого променя на горизонтальну площину. Далі необхідно, скориставшись засобами нарисної геометрії, знайти лінію перетину краплі вертикальною площиною, якій належить відрізок DE . Після цього необхідно знайти кут падіння променя на поверхню у точці D (на рис. 2.16 не показано), далі оцінити його заломлення i наступне заломлення при виході з об'єму краплі.

Таким чином, відзначимо, що тіньове зображення лежачої краплі утворюється внаслідок неоднакового заломлення променів освітлювача при проходженні через межі розділу контактуючих середовищ (рідини та повітря).

Подібно до вимоги осесиметричності меніска для різних реалізацій методу лежачої краплі, паралельність та монохроматичність променів освітлювача є наріжним каменем утворення адекватного тіньового зображення досліджуваної краплі.

Вимірювання поверхневого натягу рідин та розчинів методом лежачої краплі базується на вимірюванні геометричних параметрів профілю лежачої краплі. Тіньове зображення утвореної лежачої краплі за умов дотримання вищевказаних вимог відповідає саме меридіанному перерізові, тобто профілеві краплі. Крім того, тіньове зображення дає змогу працювати із практично прозорими об'єктами, що важливо за умов поставленої задачі. Тому такий спосіб отримання інформації є найбільш достовірним, а технічна реалізація – найбільш простою.

2.4. Розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на основі інтерпретації геометричних параметрів лежачої краплі

Кожна із відомих на сьогодні методик вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі, які були розглянуті у п. 1.2, має свої переваги і недоліки.

Тому актуальною є розробка таких методик, які б усували недоліки згаданих раніше методик і базувалися б на вимірних в процесі експерименту за допомогою сучасних оптико-вимірювальних систем відповідних розмірів лежачої краплі.

На початку 80-х років серед способів отримання і аналізу зображення краплі було запропоновано спосіб, що передбачає використання відеотехніки [1]. Остання дає змогу на основі отриманого зображення краплі здійснити розрахунок поверхневого натягу.

2.4.1. Визначення поверхневого натягу на основі значень радіусів кривизни поверхні лежачої краплі

Вимірювання параметрів R_1 , R_2 , b і z (де b – радіус кривизни при вершині краплі, z – вертикальна координата довільної точки поверхні лежачої краплі) поверхні лежачої краплі, які необхідні для безпосереднього застосування вказаного раніше рівняння (2.9) для розрахунку поверхневого натягу, раніше внаслідок відсутності відповідних оптико-вимірювальних систем було пов'язане із значними труднощами. Тому більшість дослідників запропонували наближені залежності для розрахунку поверхневого натягу з використанням інших параметрів краплі, вимірювання яких здійснити легше. Але при цьому, як буде показано пізніше, виникають значні похибки.

Вираз для розрахунку σ на основі геометричних розмірів лежачої краплі може бути отриманий на основі залежності (2.9) після її відповідного перетворення і є таким:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g z}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}. \quad (2.22)$$

Таким чином, для визначення σ згідно (2.22) необхідно попередньо визначити такі геометричні параметри лежачої краплі: R_1 , R_2 , b і z , а також різницю густин між рідиною у краплі і оточуючим газом (повітрям).

При наявності отриманого за допомогою відеотехніки на екрані монітора зображення профілю лежачої краплі (рис. 2.17) суть розробленої методики визначення поверхневого натягу на межі контакту рідина у краплі – навколишнє повітря полягає в наступному:

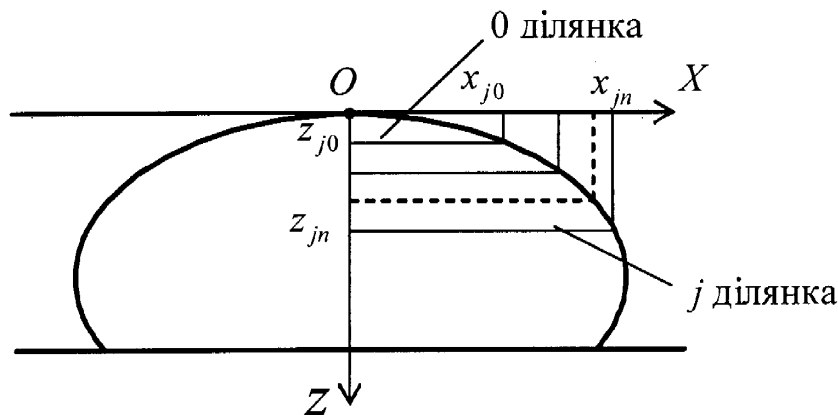


Рис. 2. 17. Профіль лежачої краплі

1) увесь профіль краплі розбивають на дві симетричні відносно вісі зчастини, після чого кожен з них розбивають на j горизонтальних ділянок. Розбивку на окремі ділянки здійснюють пропорційно висоті краплі z . Профіль кожної із ділянок оцифрують, тобто за допомогою відеотехніки вимірюють координати z_{jk} і x_{jk} для всіх $j = 1, \dots, m$ і $k = 1, \dots, n$ (m – кількість ділянок на профілі лежачої краплі, n – кількість точок на кожній із ділянок). На основі отриманих таким чином координат $(z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jk})$ і $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$ профіль кожної із j -ділянок (крім профілю, що включає т. O) з достатньою точністю описуємо у вигляді певної поліноміальної залежності виду $z_j = f(x)$;

2) розраховують значення параметрів $(1/R_1)_j$ і $(1/R_2)_j$ профілю краплі для серединної площини січення кожної j -ї ділянки за виключенням ділянки, що включає т. O . Для цього використовують такі відомі залежності

$$\frac{1}{R_1} = z_j'' / (1 + z_j'^2)^{3/2}, \quad (2.23)$$

$$\frac{1}{R_2} = z'_j / x(1 + z_j'^2)^{1/2}. \quad (2.24)$$

де z'_j , z''_j – відповідно перша та друга похідні від функції z_j по x . Аналогічно знаходять радіус кривизни поверхні b при вершині краплі;

3) на основі отриманих значень $(1/R_1)_j$, $(1/R_2)_j$, $1/b$, а також попередньо визначеного значення $\Delta\rho$ і g розраховують значення поверхневого натягу σ для кожної із j ділянок за допомогою залежності (2.22), після чого знаходять усереднене значення σ .

Застосування рівнянь (2.23) і (2.24) справедливе у тому разі, коли поверхня краплі є тілом обертання, оскільки рівняння капілярності (2.9) передбачає осесиметричність лежачої краплі.

З аналізу даної методики видно, що точність визначення R_1 та R_2 значною мірою залежить від правильності задання залежності $z = z(x)$. Існує кілька способів задання $z(x)$: апроксимація вхідного набору точок спеціальними функціями, звичайними поліномами, сплайн-функціями (у цьому випадку важливе значення має правильне задання крайових умов), згладжуючими сплайн-функціями.

На рис. 2.18 наведено узагальнену блок-схему програми визначення σ за вказаною методикою, а у додатку В – текст процедури визначення поверхневого натягу на основі радіусів кривизни капілярної поверхні.

Таким чином, шляхом визначення радіусів кривизни у взаємно-перпендикулярних перерізах для довільної точки можна знаходити значення поверхневого натягу рідини на межі розділу фаз з високою точністю. Необхідною умовою використання такої методики є високоточне вимірювання координат точок профілю.

Дана методика може бути використана при проведенні досліджень динамічного поверхневого натягу за потреби отримання значень контрольованого параметру у процесі його зміни.

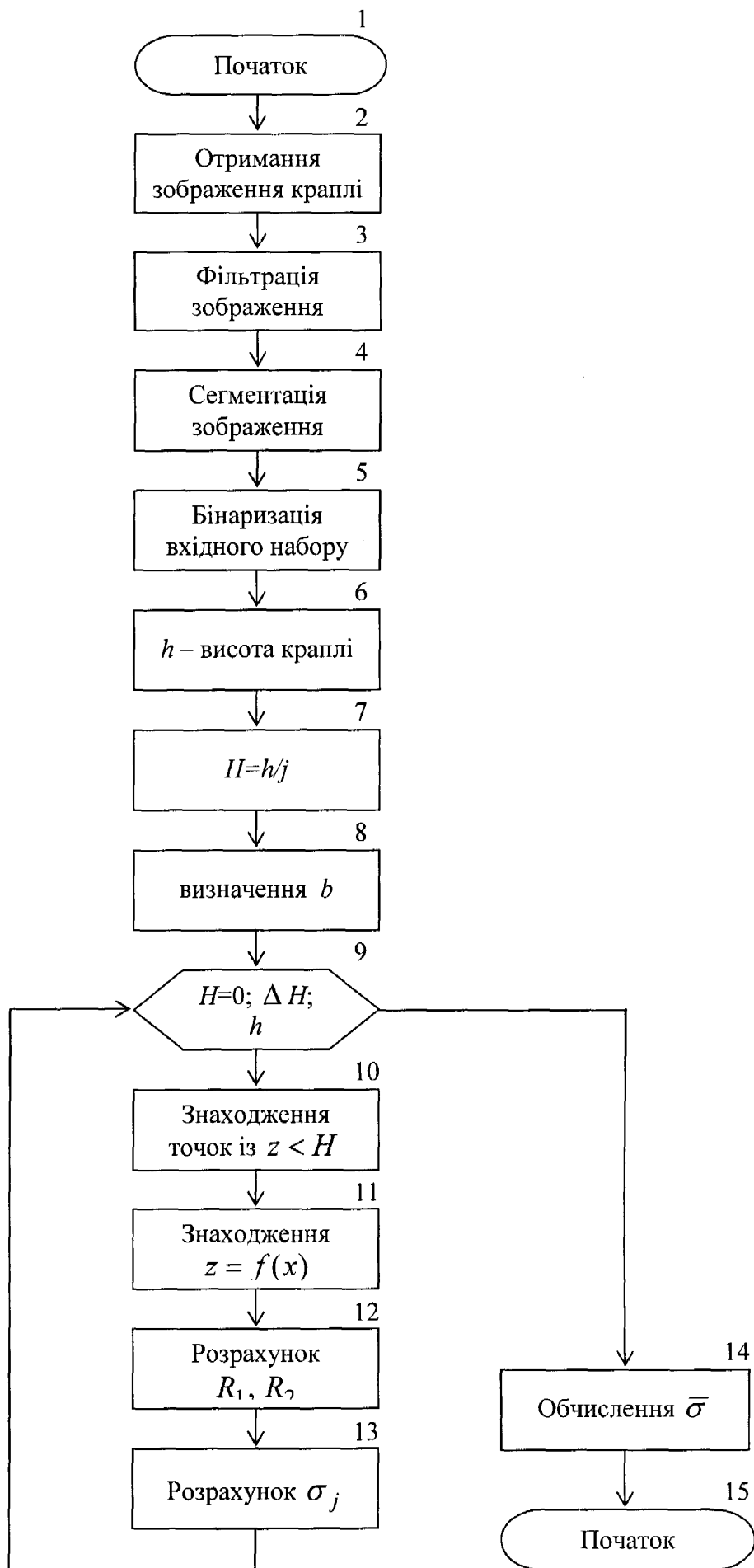


Рис. 2.18. Визначення σ за значеннями радіусів кривизни

2.4.2. Визначення поверхневого натягу на основі значень екваторіального діаметра профілю лежачої краплі та площі її верхньої частини

Визначення поверхневого натягу рідин можна здійснювати також на основі значень площі меридіанного перерізу профілю лежачої краплі та її екваторіального діаметра.

Як вже було зазначено, теоретичний профіль краплі розраховують шляхом розв'язування рівняння (2.18).

Далі, скориставшись методом Сімпсона (парабол) [32], знаходять безрозмірну площу S/a^2 верхньої частини профілю краплі, обмеженої екваторіальним діаметром і вершиною краплі та її безрозмірний екваторіальний діаметр $d_{екв}/a$ (рис. 2.19).

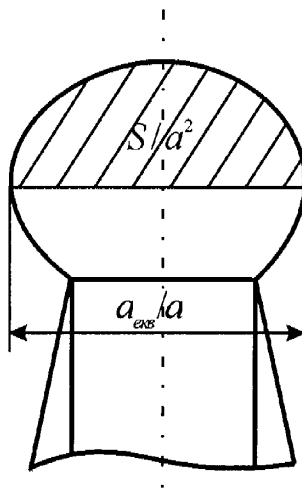


Рис. 2.18. Параметри профілю лежачої краплі

При розбиванні відрізка $[A, B]$ екваторіального діаметра профілю капілярної поверхні на m рівних відрізків узагальнена формула Сімпсона має вигляд:

$$S = \int_A^B z(x) = \sum_{i=1}^N \frac{h}{6} (z_{i-1} + 4z_{i-1/2} + z_i). \quad (2.25)$$

У результаті проведених розрахунків ми отримуємо значення S/a^2 для різних $d_{екв}/a$ (рис. 2.20). При цьому кожна точка на даному графікові відповідає певному значенню β . При проведенні розрахунків діапазон параметр β

змінювався від 0,1 до 10, що відповідає значенням β для усіх реальних рідин і розчинів, поверхневий натяг яких необхідно вимірювати методом лежачої краплі.

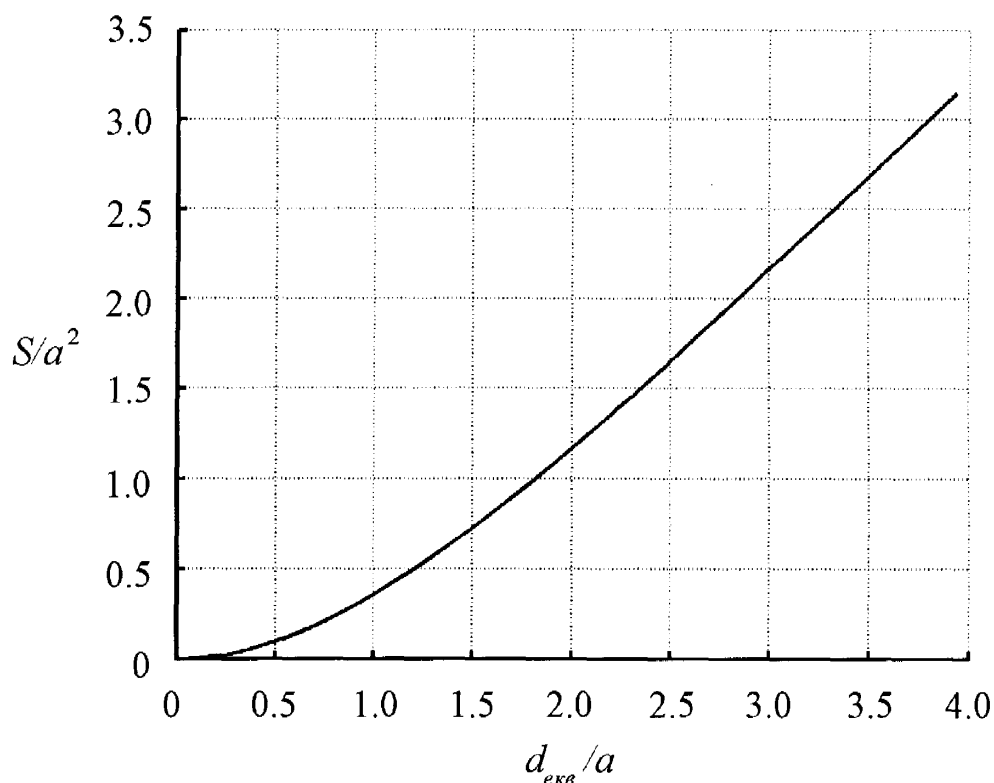


Рис. 2.19. Залежність S/a^2 від $d_{екв}/a$

На рис. 2.20 зображено блок-схему програми розрахунку. У додатку Г наведено текст програми розрахунку вказаної залежності S/a^2 від $d_{екв}/a$, а у додатку Д – відповідні табличні дані.

Для знаходження значення a^2 досліджуваної рідини необхідно виміряти реальні значення S та $d_{екв}$ профілю лежачої краплі. Після чого, змінюючи у циклі значення a від $a_{\min} = 1,41$ мм до $a_{\max} = 3,85$ мм з кроком Δa , знаходять відповідні значення S/a^2 та $d_{екв}/a$. Точка перетину такої залежності із графіком на рис. 2.19 дасть шукане значення a^2 . Аналіз залежності на рис. 2.19 показує, що її можна привести до залежності виду S/a^2 від $d_{екв}^2/S$, спростивши таким чином знаходження a^2 . Однак, оскільки значення $d_{екв}$ знайдені із деякою похибкою, то піднесення їх до квадрату збільшує розкид $d_{екв}^2$ (рис. 2.21).

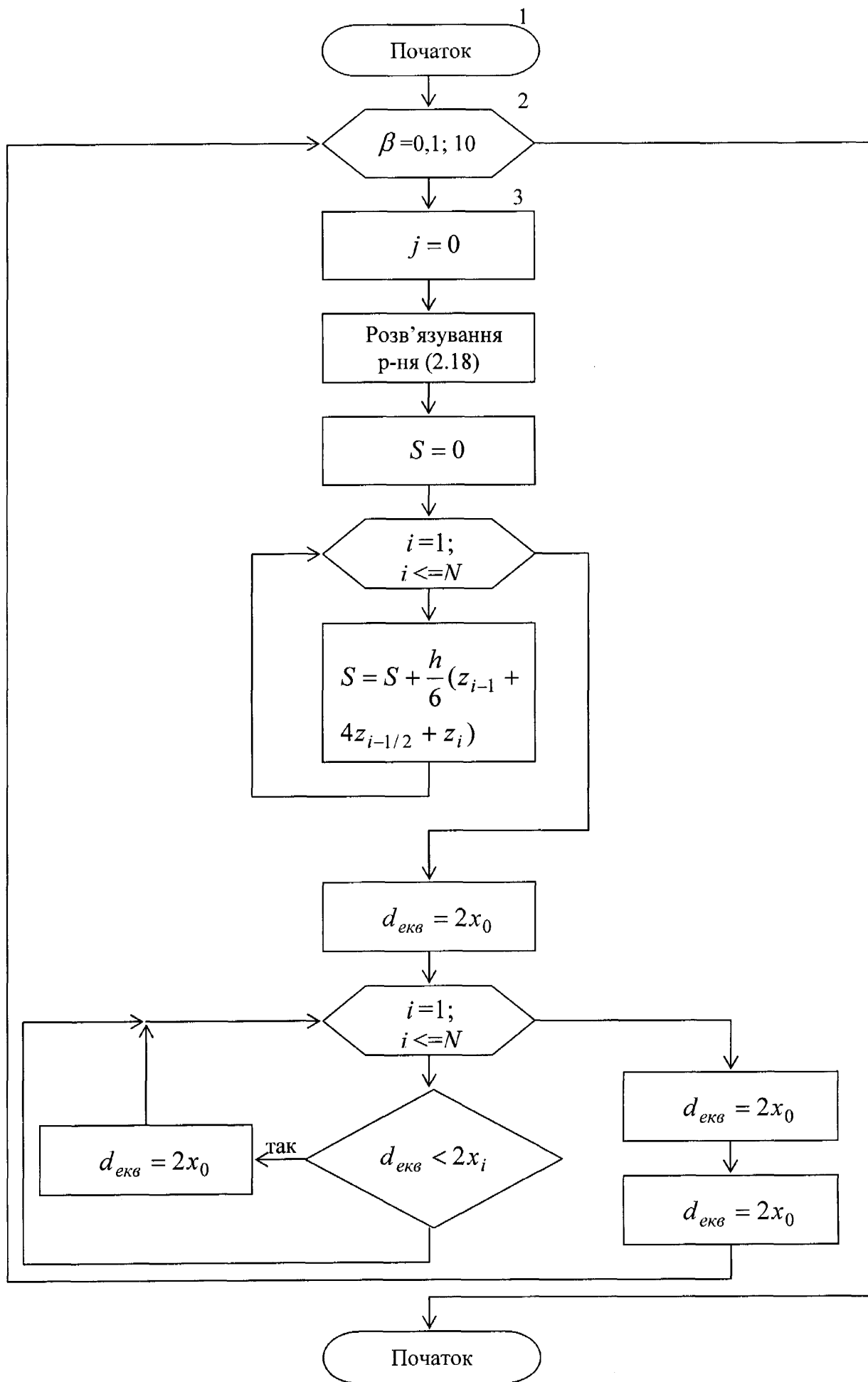


Рис. 2.20. Блок-схема програми розрахунку залежності S/a^2 від $d_{екв}/a$

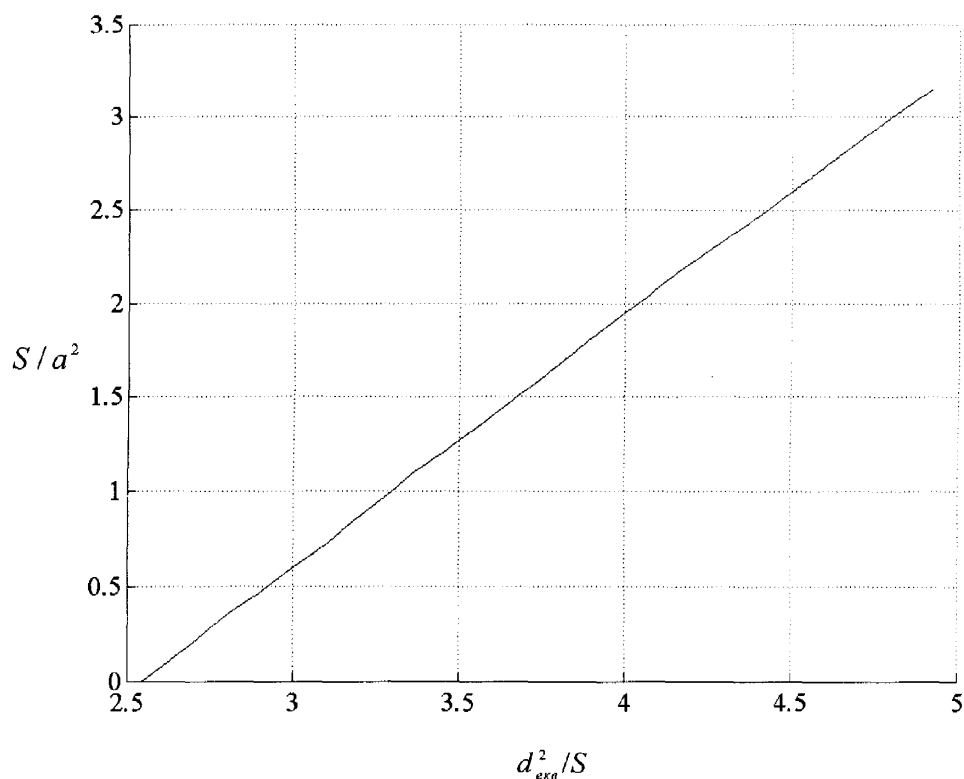


Рис. 2.21. Залежність S/a^2 від $d^2_{екв}/S$.

Дещо усунути вплив цього явища можна, попередньо згладивши вихідну залежність між екваторіальним діаметром профілю краплі і площею цього профілю від екваторіального діаметра до вершини краплі.

Отже, використання вказаної методики дозволяє автоматизувати процес вимірювання, підвищити його точність за рахунок інтегрування площі поверхні та знімання і подальшої обробки багатьох профілів краплі. Крім того, ця методика визначення поверхневого натягу на межі розділу рідина – оточуючий газ не залежить від крайового кута змочування, оскільки до уваги береться тільки верхня частина краплі.

При проведенні вимірювань поверхневого натягу за методикою, що використовує радіуси кривизни капілярної поверхні, здійснюється апроксимація частин профілю капілярної поверхні; апроксимація координат точок профілю лежачої краплі дозволяє також підвищити точність визначення площі

меридіанного перерізу при використанні другої розробленої методики. Тому важливим є вигляд апроксимаційної функції.

Кусочно-поліноміальна інтерполяція і апроксимація не забезпечують неперервності похідних функції $z(x)$. Наслідком цього можуть бути значні похибки на проміжках між вузлами. Крім того, часто із збільшенням числа вузлів похибка такої інтерполяції не тільки не зменшується, а й починає зростати [33].

Позбавлена цих недоліків апроксимація та інтерполяція за допомогою сплайн-функцій. Сплайн приймає у вузлах значення $z(x) = z_i = z(x_i)$ і забезпечує у них неперервність похідних. Як правило, достатньо забезпечити неперервність першої і другої похідних. Даній вимозі відповідають сплайн-многочлени третього порядку (кубічні сплайни). Необхідно зауважити, що використання звичайних сплайнів доцільне тільки у тому випадку високоточного вимірювання координат точок. У випадку, коли точність вимірювання (z_i, x_i) занижена, сплайн дає значні похибки між вузлами, що унеможлиблює проведення подальших обчислень. Тоді такому випадку доцільно скористатися кусочно-поліноміальною апроксимацією із згладжуванням [34].

2.5. Вимоги до приладу з метою реалізації ним удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу

З метою розробки приладу, який повинен реалізувати запропоновані у п. 2.4 методики вимірювання поверхневого натягу, необхідно визначити основні вимоги, яким повинен відповідати такий прилад. До таких вимог слід віднести [35 – 41]:

можливість проведення вимірювання σ при стабілізованій температурі у діапазоні можливих значень $20^\circ - 60^\circ$;

проведення досліджень з метою одержання залежності σ від часу існування межі розділу фаз впродовж від 5с до 1 год.;

можливість вимірювання відповідних розмірів лежачої краплі з абсолютною похибкою не більше 2 мкм;

зменшення впливу вібрації на процес утворення лежачої краплі і на проведення вимірювань відповідних її геометричних розмірів;

автоматична обробка результатів вимірювання геометричних параметрів краплі з метою розрахунку значення σ і представлення цих результатів у необхідній формі (графічна, таблична тощо) як на екрані монітора комп'ютера, так і у друкованій формі;

можливість запам'ятовування профілів лежачої краплі з метою їх обробки у подальшому і систематизації;

одержання результатів вимірювання з абсолютною похибкою не більше 1,5%;

забезпечення високої вірогідності результатів вимірювання σ (не менше 95%);

забезпечення безперервної роботи приладу впродовж 8 год.;

зручність при проведенні вимірювання σ , а також при обслуговуванні приладу.

Розглянемо більш детально вказані вище вимоги.

Необхідність стабілізації температурного режиму проведення контролю у діапазоні 20° - 60° викликана потребою дослідження зміни поверхневих властивостей на межі розділу розчин-повітря від температури. Зрозуміло, що при цьому для виключення впливу температури на σ , оскільки існує температурний градієнт, потрібно зафіксувати температуру на певному рівні. Для цього використовується система охолодження/нагрівання з повільною циркуляцією стабілізуючої рідини (це викликано умовою виключення впливу вібрації, яка виникає внаслідок циркуляції рідини, на результати контролю) [42-47].

Діапазон зміни часу існування поверхні контакту фаз (від 5с до 1 год.) викликаний тим, при контакті фаз адсорбційна рівновага може бути досягнута за певний проміжок часу. Наявність такої інформації дозволить оптимально керувати такими процесами, як: швидкість руху фаз, час контакту тощо. Отримана при цьому залежність поверхневого натягу у часі носить назву динамічного поверхневого натягу.

Зрозуміло, що чим меншою буде похибка вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі, тим точніше буде розраховане значення σ . З метою досягнення абсолютної похибки вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі ≤ 2 мкм необхідно передбачити їх багатократні вимірювання, чому сприятиме швидке запам'ятовування профілю краплі [48 –51].

Наявність вібрацій капіляра із рідиною приводить до появи несиметричності форми утвореної краплі, що впливає на точність результатів визначення поверхневого натягу. Для усунення вібрації прилад слід розташовувати на масивній антивібраційній основі.

Чим меншими буде час вимірювання відповідних геометричних розмірів лежачої краплі, тим меншими будуть різні можливі зміни цих розмірів внаслідок впливу різних швидкоплинних процесів. Бажаним є запам'ятовування профілю обертової краплі з подальшою обробкою його, що вимагає розробки відповідного програмного забезпечення.

Необхідність забезпечення тривалості роботи приладу впродовж 8 год. викликана тим, що дослідження можуть проводитися із рідинами, досягнення адсорбційної рівноваги яких може тривати більше 2 год. Під час проведення таких досліджень усі блоки і механічні вузли приладу повинні мати стабільні характеристики, які повинні бути незалежними від зміни навколишніх умов роботи (температури, напруги і частоти мережі живлення тощо).

Сучасний рівень засобів вимірювання і обчислювальної техніки дозволяє забезпечити автоматичну обробку занесених у пам'ять профілів лежачої краплі.

Сумарна похибка приладу, який буде реалізувати удосконалені методики вимірювання поверхневого натягу, не повинна перевищувати 1,5%. Зменшення похибки можливе при проведенні багатократних спостереженнях профілю лежачої краплі.

Висновки до розділу

Отримані шляхом теоретичного аналізу результати щодо процесу

формування краплі при вимірюванні поверхневого натягу методом лежачої краплі, проходження світлових променів через лежачу краплі та методик вимірювання поверхневого натягу можна звести до наступних висновків:

а) проведено аналіз процесу формування лежачої краплі на торці вертикально встановленого ножового і товстостінного капілярів; показано, що ножовий капіляр є найбільш зручним для проведення вимірювань внаслідок відсутності впливу крайового кута змочування на форму утвореної лежачої краплі, сформульовано вимоги до капіляра, вказано причини, що викликають порушення осесиметричності меніска;

б) розроблено методику розрахунку безрозмірних параметрів лежачої краплі, яка дозволяє для відповідного значення радіуса кривизни при вершині краплі розраховувати безрозмірні координати точок, що лежать на межі розділу, кут нахилу дотичної до горизонталі для кожної точки, довжину дуги профілю краплі (за нульову точку приймається вершина краплі) у даній точці, екваторіальний діаметр краплі та площу її верхньої частини, обмеженої вершиною краплі та екваторіальним діаметром; проведено розрахунок цих параметрів для коефіцієнта β , який визначає форму краплі у діапазоні від 0,1 до 10;

в) проведено аналіз проходження світлових променів через лежачу краплю у процесі вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі. Показано процес формування її тіньового зображення, яке підлягає подальшій обробці. Даний аналіз робить можливим вимірювання геометричних параметрів лежачої краплі і використання їх при визначенні поверхневого натягу. Вимірювання координат точок профілю краплі за її тіньовим зображенням покладено в основу більшості приладів, які реалізують метод лежачої краплі;

г) розроблено дві методики визначення поверхневого натягу рідин і розчинів на межі розділу рідина – оточуюче повітря. Суть першої полягає у визначенні радіусів кривизни у двох взаємно-перпендикулярних площинах, які проходять через довільну точку поверхні краплі, що належить межі розділу, радіуса кривизни краплі у її вершині, а також віддалі від вказаної точки до

вершини.. Суть другої методики полягає у вимірюванні екваторіального діаметра краплі та площі, обмеженої вершиною краплі і її екваторіальним діаметром. Визначення поверхневого натягу відбувається у цьому випадку на основі отриманої залежності між вказаними параметрами краплі і капілярною сталою. Показано можливість використання запропонованих методик при дослідженні залежності поверхневого натягу від часу існування межі розділу фаз;

д) з урахуванням результатів теоретичних досліджень, які наведені у цьому розділі, розроблені вимоги до приладу, який повинен реалізувати запропоновані методики вимірювання поверхневого натягу. Зокрема, звертається увага на тип освітлення (монохроматичністю, параксіальністю променів, живлення лампи стабілізованою постійною напругою), вимоги до чистоти матеріалу капіляра та його параметрів, шляхи зменшення вібрації, автоматичну обробку результатів вимірювання відповідних геометричних параметрів, необхідність забезпечення стабільних характеристик вузлів приладу, можливість використання приладу для проведення різних наукових досліджень, на зручність при проведенні вимірювання поверхневого натягу і представленні результатів вимірювання, при обслуговуванні приладу тощо.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

Вимірювання поверхневого натягу в основному здійснюється в лабораторних умовах наукових і виробничих організацій [51 – 54], які досліджують, розробляють ПАР і розчини на їх основі, а також використовують їх у технологічних процесах. Метод лежачої краплі дозволяє проводити визначення поверхневого натягу як упродовж короткого (до 5 хв.), так і тривалого часу (до 2 год.). Визначні у п. 2.5 вимоги повинні бути взяті за основу при розробці приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі.

У процесі розробки згаданого приладу основну увагу необхідно звернути на розробку структурної схеми приладу з використанням відповідної оптичної системи і засобів обчислювальної техніки для автоматичного вимірювання необхідних розмірів лежачої краплі, на розробку програмного забезпечення приладу, конструкцію та схеми приладу і методику проведення ним контролю поверхневого натягу. Вказане вище лежить в основі тих задач, які необхідно вирішити у даному розділі роботи.

3.1. Розробка структурної схеми приладу

З урахуванням вищенаведеного розроблена структурна схема приладу (рис. 3.1) для вимірювання поверхневого натягу ВПНО-1.

Структурна схема приладу ВПНО-1 реалізує запропоновані методики контролю поверхневого натягу рідин і складається з таких блоків і вузлів: 1 – джерело світла із живленням постійним струмом; 2 – коліматор, призначений для створення пучка параксіальних променів; 3 – змінний світлофільтр, призначений для створення монохроматичного пучка променів; 4 – діафрагма, що служить для обмеження зони освітленості; 5 – лежача крапля; 6 – ножовий капіляр (капіляр із загостреною верхньою кромкою); 7 – мікрооб'єктив; 8 – телевізійна камера;

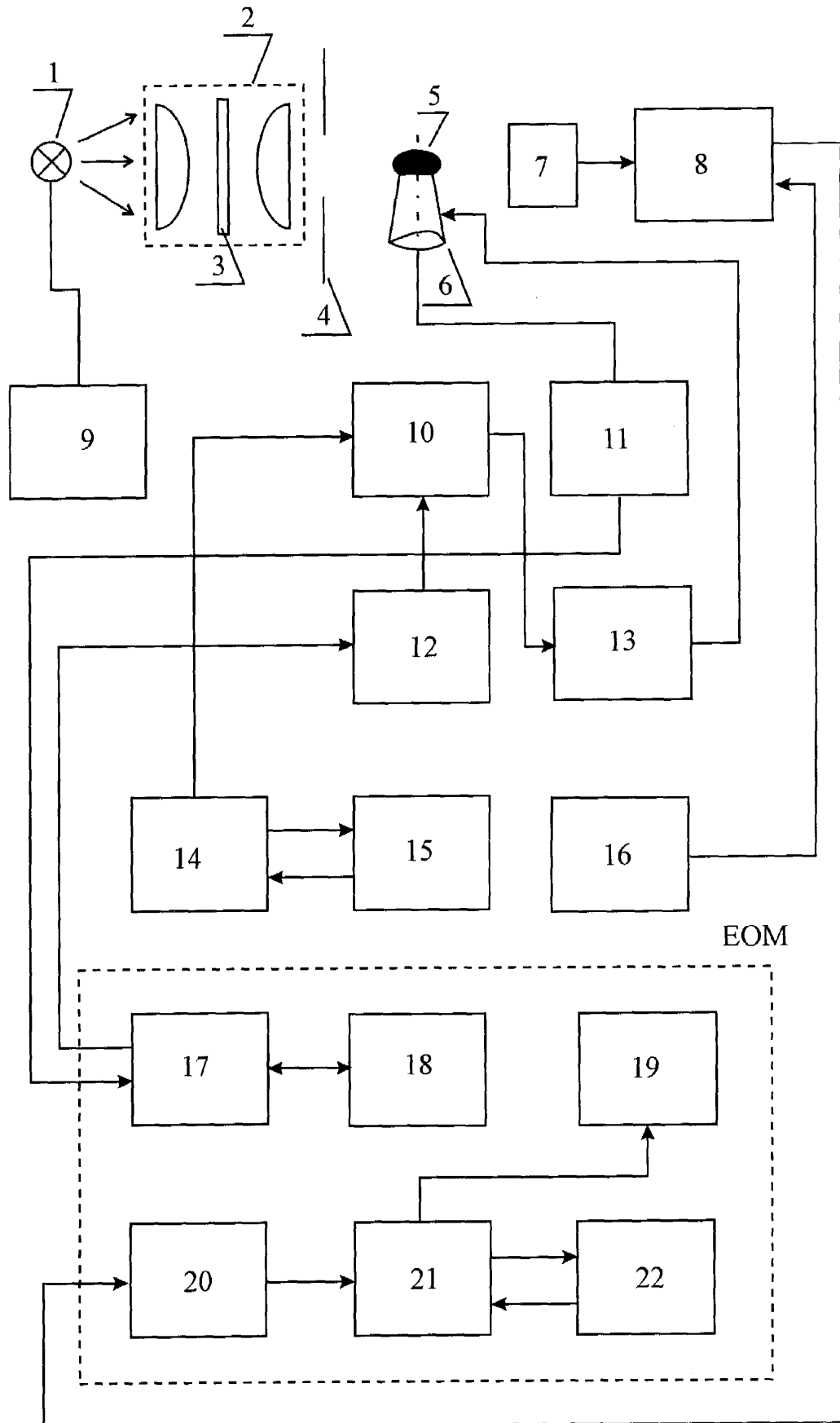


Рис. 3.1. Структурна схема приладу ВПНО-1

9 – джерело живлення освітлювача; 10 – блок формування краплі; 11 – блок давачів екстремальних положень поршня блока формування краплі; 12 – блок керування процесом формування краплі; 13 – реверсивний двигун; 14 – компресор нагнітання термостабілізуючої рідини; 15 – блок підтримання температури термостабілізуючої рідини; 16 – механізм позиціонування телевізійної камери; 17 – паралельний порт комп'ютера; 18 – (ЕОМ) програма керування процесом формування краплі; 19 – монітор; 20 – пристрій відеозахоплення (служить для введення стандартного телевізійного сигналу у комп'ютер); 21 – відеопам'ять; 22 – центральний процесор.

Принцип роботи приладу ВПНО-1 є таким (рис. 3.1). Потік світлового випромінювання від джерела 1 проходить послідовно через коліматор 2, світлофільтр 3 та діафрагму 4. У результаті на виході промені світла характеризуються монохроматичністю та параксіальністю. Лежача крапля 5 формується на верхньому торці вертикально встановленого ножового капіляра 6. Мікрооб'єктив 7 формує зображення краплі 5 на чутливій матриці світло електричного перетворювача телевізійної камери 8. Сформований у камері 8 сигнал подається через пристрій відеозахоплення 20 на ЕОМ.

Формування краплі здійснюється блоком формування 10, керованим блоком 12. Контроль за досягненням верхньої та нижньої точок положення поршня блоку формування краплі реалізується давачами 11.

Компресор 14 та блок підтримання температури забезпечують температурний режим проведення досліджень.

Блок 16 служить для задання положення приймальної матриці СЕП [55 – 59] у просторі.

Керування процесом формування краплі здійснюється через паралельний порт комп'ютера 17 програмою керування. При цьому відстежується стан давачів екстремальних положень поршня.

3.2. Вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі за допомогою телевізійної системи контролю

У приладі ВПНО-1 для вимірювання поверхневого натягу вимірювання відповідних геометричних розмірів реалізується за допомогою телевізійної системи контролю (ТСК). Дана система дозволяє формувати цифрове зображення краплі і за допомогою відповідного програмного забезпечення визначати необхідні геометричні розміри [60 – 63]. Наявність ТСК у прилад дає наступні переваги:

- можливість спостереження на екрані монітора за процесом формування краплі;

- автоматизація процесу вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина – оточуюче повітря;

- висока точність вимірювання геометричних параметрів лежачої краплі;

- створення бази даних цифрових зображень обертової краплі з метою їхньої подальшої обробки та систематизації.

Для проведення вимірювань геометричних розмірів лежачої краплі необхідно, щоб уся крапля одночасно перебувала у полі зору ТСК, а її повне зображення було на СЕП і в результаті на екрані монітора ЕОМ [64 – 67].

У приладі ВПНО-1 як СЕП використовується пристрій із поверхневим зарядовим зв'язком (ПЗЗ) OS25П у комплекті із телевізійною камерою. Формат ПЗЗ матриці 640×480.

У якості блока введення відеосигналу (пристрою відеозахоплення 20) у даному приладі застосовано адаптер AVerPCImage.

3.2.1. Лінійна фільтрація зображень лежачої краплі

Зображення лежачої краплі, яке отримується за допомогою відеокамери, потребує попередньої обробки перед проведенням вимірювання координат точок її профілю [68]. Метою попередньої обробки відеоданих є зменшення зашумленості інформації, підвищення її контрастності, різкості, підкреслювання

контурів. На етапі попередньої обробки здійснюється також фільтрація сигналів зображень [69 – 76].

Якість зображення в основному визначається його контрастністю – різницею між максимальним і мінімальним рівнями півтонів у деякій області зображення, наприклад, у вікні (локальна контрастність) або всього зображення (глобальна контрастність). Шляхом збільшення контрастності можна покращити розрізнюваність окремих структур зображення або зменшити спотворення, викликані впливом умов отримання зображень в оптико-електронних перетворювачах. Слабий контраст – найбільш поширений дефект фотографічних і телевізійних зображень, зумовлений обмеженістю діапазону відтворюваних яскравостей, який часто суміщається із нелінійністю характеристики передачі рівнів (градаційною характеристикою). Одним із основних шляхів покращення якості зображення є використання методу контрастного розтягування, при якому заданий діапазон зміни яскравості вхідного зображення (x, y) розтягується на всю шкалу рівнів півтонів $[0 - (G - 1)]$ (де G – яскравість піксела). У результаті цього розширюється діапазон зміни яскравості вхідного зображення $f'(x, y)$ і тим самим зображення стає більш контрастним.

3.2.2. Виділення перепадів яскравості і контурів лежачих крапель

На рис. 3.2а показано відеозображення лежачої краплі, а на 3.9б-є – результати обробки цього зображення за допомогою різних операторів, що використовуються для виділення краю зображення.

Аналіз рис. 3.2 показує, що усі згадані вище оператори мають одну спільну властивість: виділений контур не є суцільним, що ставить нову задачу – об'єднання точок у суцільну лінію. При цьому потрібно буде встановлювати, чи належить точка контурові, чи ні [77 – 82].

Позбавлений такого недоліку так званий метод трасування контурів. Один із підходів до розв'язку задачі виділення фрагментів зображення полягає у трасуванні контурів. Цей підхід дозволяє не тільки сегментувати зображення, але і подавати фрагменти у векторній формі. При цьому фрагмент виглядає не просто

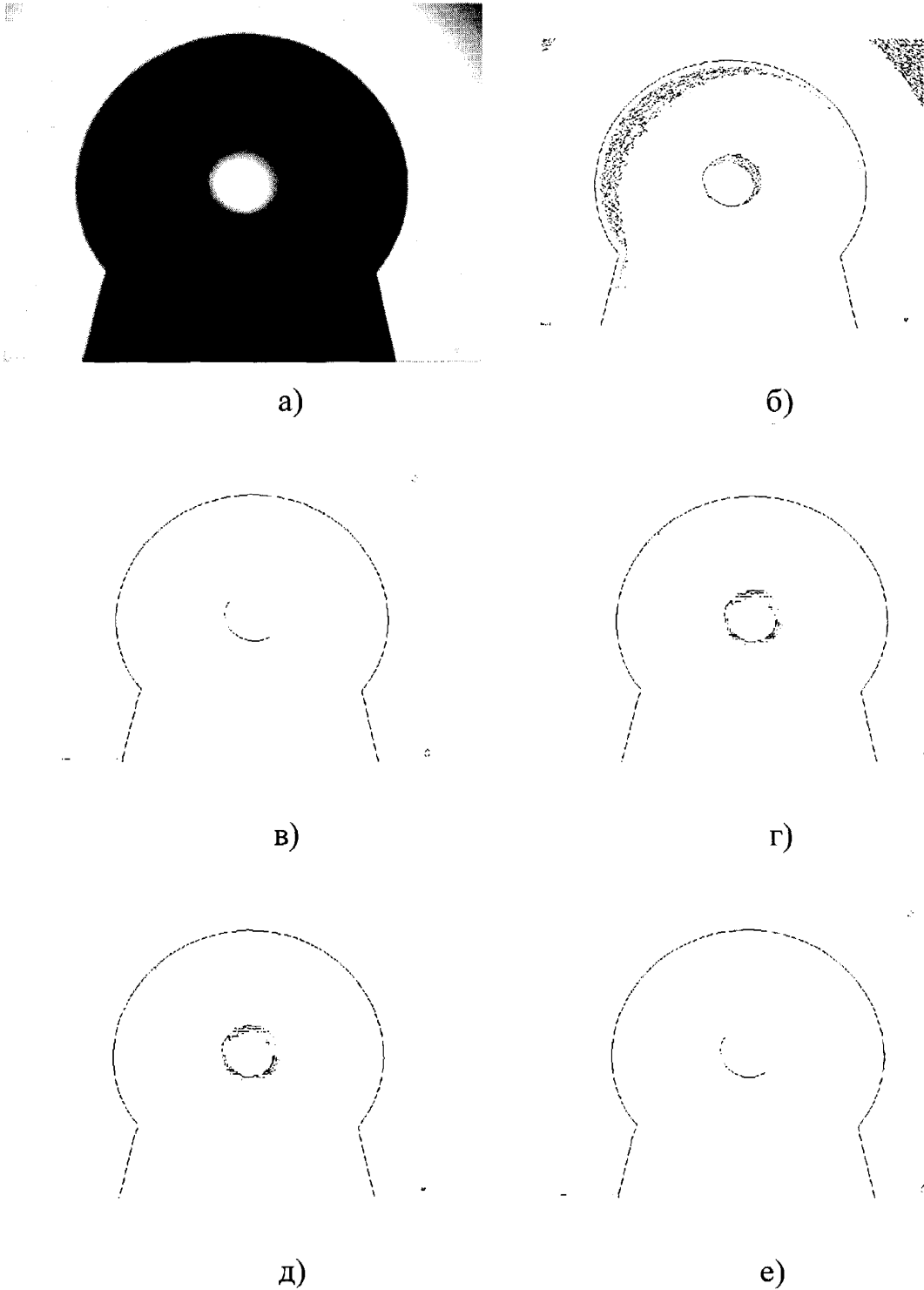


Рис. 3.2. Виділення краю лежачої краплі:

а) реальне зображення лежачої краплі; результати обробки операторами:
б) Кені; в) типу Log ; г) Превіта; д) Роберта; е) Собела

як сукупність точок або растр, а як список точок, що належать межі фрагмента. При такому підході отримують не тільки фрагмент, а й інформацію про його форму. Крім того, трасування контурів досить стійке при обробці навіть зображень низької якості.

Алгоритм використання методу трасування контурів наступний.

1. Спочатку необхідно провести аналіз вхідного набору пікселів і побудувати гістограму розподілу яскравостями за рівнями. Для визначення краю краплі необхідно вибрати точку P_0 з координатами (x_0, y_0) , що належить множині граничних точок. Можна прийняти, що нею є довільна точка, що відповідає впадині на гістограмі між двома піками. Даний підхід відрізняється від щойно описаного тим, що використовує отриману таким чином точку тільки як стартову при визначенні краю краплі і не ставить за мету проведення інтерпретації отриманого значення яскравості. Видається зручним використати метод, що досліджує зміну яскравості уздовж рядка відеозображення з метою встановлення початкової точки для трасування. Це пояснюється тим, що в реальних умовах у випадку, коли недостатньо забезпечена рівномірність освітлення фона, гістограма рівнів яскравостей відеозображення не має чітко вираженого двопікового вигляду і постає питання, який рівень прийняти за граничний.

Доцільно спочатку забезпечити таку освітленість фона, при якій яскравість кожного пікселя складала би FF (для 256-рівневої градації), а вже після цього проводити вимірювання. У цьому випадку кожному пікселю можна буде присвоїти статус “свій” або “чужий” (у загальному випадку на цьому етапі можна провести попереднє визначення меж об’єктів з метою введення для них цензу за площею, що відфільтрує шуми).

2. Для економії часу розрахунку рух у пошуках такої точки можна здійснювати згори униз по центру відеозображення, оскільки місце утворення краплі відоме. Ініціалізують вектор переміщення $D(0, -1)$.

3. Вносять точку з поточними координатами у список точок, що характеризують профіль краплі.

4. На кожному кроці переміщення розглядають картинку розміром 3×3 піксели і знаходять локальний градієнт яскравості для різних напрямів. Порівнюють яскравість точок, що оточують поточну, з її яскравістю з метою визначення односточкового коридору, в який буде спрямоване наступне переміщення.

5. При визначенні локальних градієнтів приймають за правило, що аналіз ділянок розміром 3×3 піксели буде проводитись, починаючи з елемента, що є наступним за годинниковою стрілкою щодо елемента - початку останнього переміщення, якщо за центр ділянки прийняти точку з поточними координатами (координати елементів ділянки наведені на рис. 3.3). Вектор, що вказує на нього, можна вибрати із списку (вектор останнього переміщення \rightarrow вектор наступного переміщення):

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1) $D(-1;-1) \rightarrow D(1;0)$; | 5) $D(1;1) \rightarrow D(-1;0)$; |
| 2) $D(-1;0) \rightarrow D(1;-1)$; | 6) $D(1;0) \rightarrow D(-1;1)$; |
| 3) $D(-1;1) \rightarrow D(0;-1)$; | 7) $D(1;-1) \rightarrow D(0;1)$; |
| 4) $D(0;1) \rightarrow D(-1;-1)$; | 8) $D(0;-1) \rightarrow D(1;1)$; |

Після того, як буде встановлено початковий елемент, можна провести аналіз градієнтного поля. Зміна координат поточної точки при проведенні цього аналізу відбувається за наступними правилами:

$$dx'_{i+1} = \begin{cases} (dy_i - dx_i) / 2, & dx \neq 0; \quad dy \neq 0, \\ dx_i & \text{в усіх інших випадках,} \end{cases} \quad dy'_{i+1} = \begin{cases} -(dx_i + dy_i) / 2, & dx \neq 0; \quad dy \neq 0, \\ dy_i & \text{в усіх інших випадках.} \end{cases}$$

де dx'_{i+1} , dy'_{i+1} – координати вектора D' , що можуть набувати значень із множини $\{-1; 0; 1\}$. Іншими словами, $A(x; y) + D'(x_{i+1}, y_{i+1})$ (де A – вектор, який характеризує довільну точку, що належить ділянці 3×3) вказує на точку, що рухається за годинниковою стрілкою навколо деякої точки з координатами (x, y) – центра ділянки.

$dx = -1;$ $dy = 1$	$dx = 0;$ $dy = 1$	$dx = 1;$ $dy = 1$
$dx = -1;$ $dy = 0$	$x; y$	$dx = 1;$ $dy = 0$
$dx = -1;$ $dy = -1$	$dx = 0;$ $dy = -1$	$dx = 1;$ $dy = -1$

Рис. 3.3. Координати елементів ділянки 3x3 піксели при проведенні трасування контурів

Таким чином, існує можливість отримання суцільного контуру краплі, який після проведення згладжування координат точок, що належать йому, можна використовувати для обчислення радіусів кривизни капілярної поверхні чи площі і екваторіального діаметра цієї краплі [83 – 88].

3.3 Розробка і опис конструкції основних блоків і вузлів приладу ВПНО-1

Загальний вигляд приладу ВПНО-1 наведено на рис. 3.4. До складу приладу ВПНО-1 входить вимірювальний блок 1 та ЕОМ 2. У свою чергу блок 1 включає механо-електричний пристрій 3, оптичну систему для вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі. ЕОМ 2 включає системний блок 4, клавіатуру 5 і монітор 6.

Механо-електричний пристрій 3 (рис. 3.4) містить усі блоки наведеної раніше структурної схеми приладу ВПНО-1 (рис. 3.1) крім блоків 17-22.

Характерними конструктивними особливостями блоків пристрою 3 є такі. Живлення джерела світла повинно здійснюватися стабілізованим постійним струмом. Це зумовлено безінерційністю матриці із ПЗЗ. Зміна яскравості джерела світла впродовж періоду вимірювання викликатиме неоднорідність освітленості

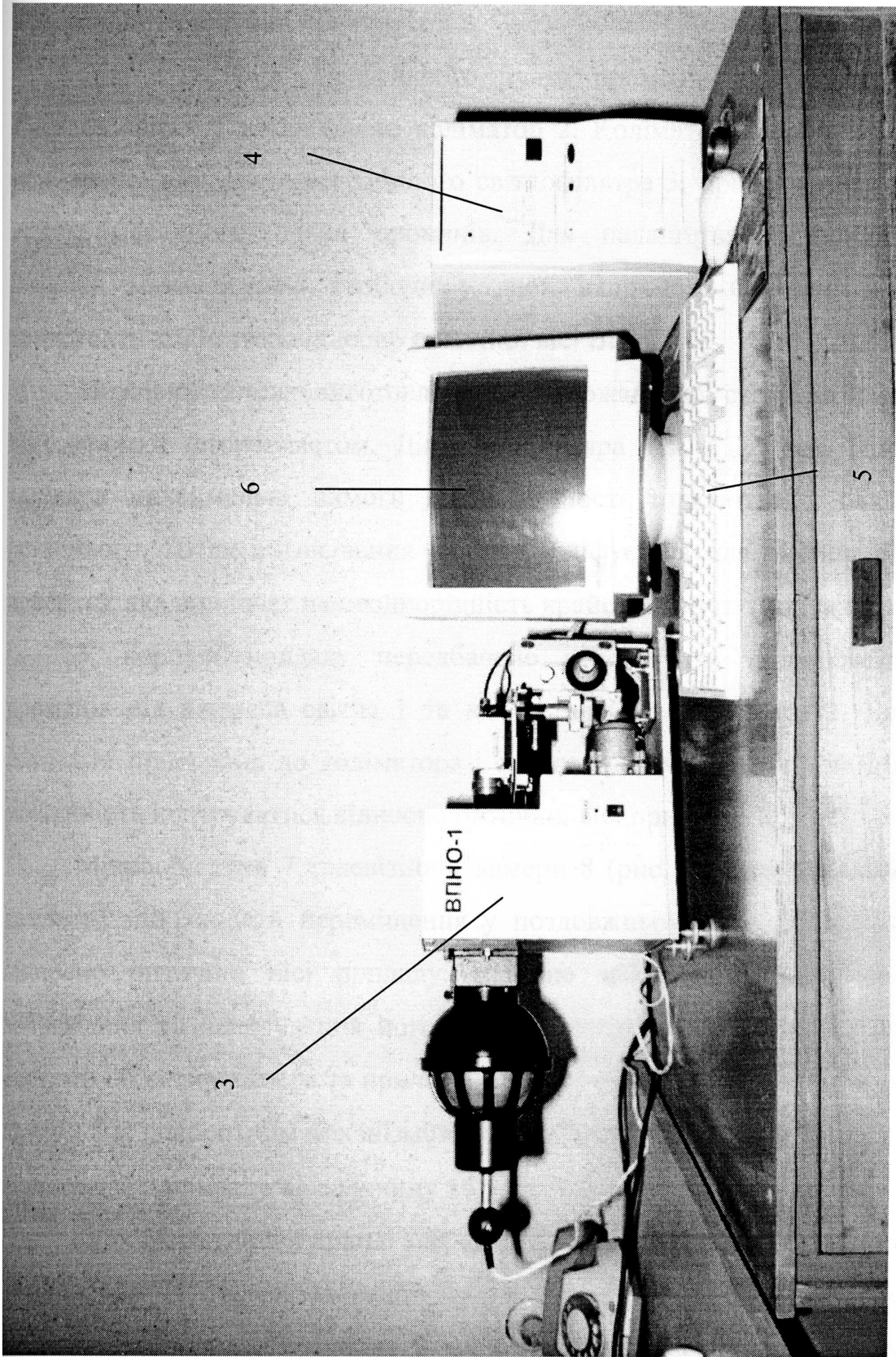


Рис. 3.4. Загальний вигляд приладу ВПНО-1.

окремих кадрів зображення, що небажано з метрологічної точки зору. Лампа джерела світла повинна бути обладнана механізмом просторового центрування відносно оптичної вісі приладу.

Для створення паралельного пучка променів на їхньому шляху після джерела світла 1 встановлено коліматор 2. Коліматор 2 повинен забезпечувати можливість використання змінного світлофільтра 3, призначеного для створення монохроматичного пучка променів. Для налаштування приладу коліматор повинен мати ступені свободи у двох напрямках. Останнє дає можливість центрувати коліматор відносно оптичної вісі ВПНО-1.

Ножовий капіляр виготовляється із нержавіючої сталі. Бажаним є покриття його кромки фторопластом. Діаметр капіляра 1,5 – 2,5 мм. При виготовленні капіляра максимальні вимоги щодо точності торкаються овальності торця останнього. Після виточування капіляр шліфується для зменшення шорсткості поверхні, яка впливає на неоднорідність крайового кута змочування.

У корпусі приладу передбачено отвори для проходження світлових променів від джерела світла 1 та для кріплення коліматора 2. Джерело світла гвинтами приєднано до коліматора і складає разом з ним єдине ціле, котре має можливість центруватися відносно оптичної вісі приладу.

Мікрооб'єктив 7 телевізійної камери 8 (рис. 3.5) має можливість разом із камерою здійснювати переміщення у поздовжньому та поперечному напрямках відносно оптичної вісі приладу. Вказане забезпечує наведення на різкість зображення та центрування його по горизонталі. Паралельність оптичних осей системи об'єктив-камера та приладу у цілому досягається механічним з'єднанням камери 8 із поворотним механізмом, який дозволяє повертати камеру з об'єктивом відносно вісі приладу на величину $\pm 5^\circ$.

Блок формування краплі має складну будову (на рис. 3.1 не показано). Він складається із термостатованої посудини змінного об'єму. Термостатування реалізується шляхом введення у конструкцію герметичного об'єму із великою площею контакту із робочою рідиною (рівною $\approx 1/2$ площі стінок посудини). До складу герметичного об'єму введено два штуцери, через які здійснюється

прокачування рідини із заданою температурою. Внаслідок постійного теплообміну між термостатуючим об'ємом та досліджуваною рідиною, інтенсивність якого забезпечується згаданою великою площею контакту, температура рідини залишається стабільною. Стальний капіляр який характеризується високою теплопровідністю, забезпечує підтримання температури утвореної на його верхньому торці лежачої краплі. Зміна об'єму робочої камери із досліджуваною рідиною відбувається за рахунок переміщення поршня, який сполучений з камерою. Вісь поршня з'єднана через конічну передачу із віссю реверсивного електродвигуна 13 РД-09-ТА із модифікованим редуктором (знижено швидкість обертання до 1 об/хв). Таким чином електродвигун забезпечує формування краплі рідини потрібних розмірів.

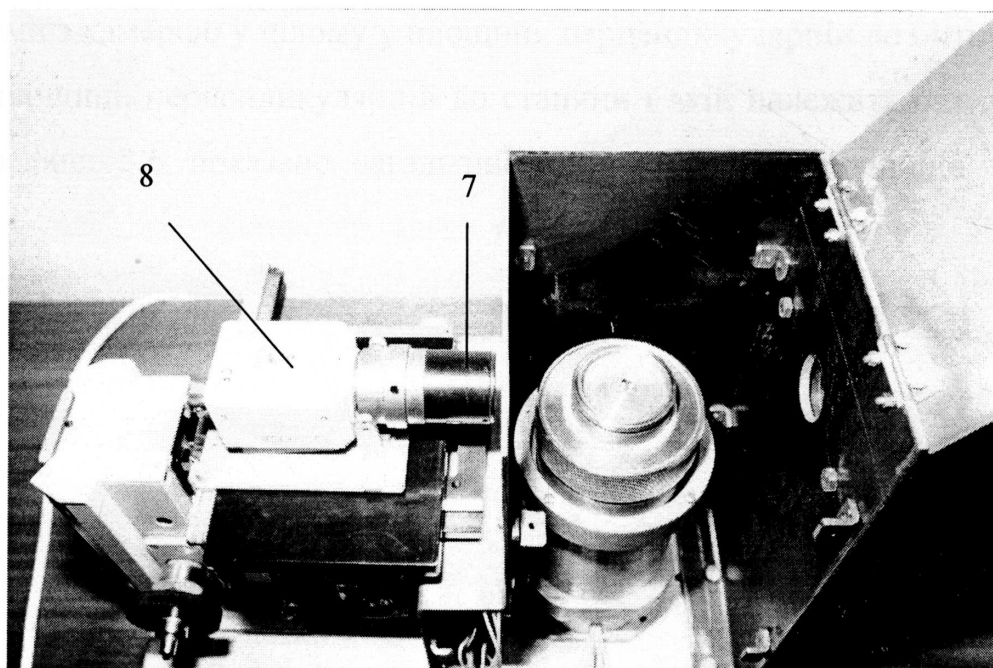


Рис. 3.5. Блок формування краплі. Оптична система

Конструктивно блок формування краплі виконано в одному корпусі із блоком давачів екстремальних положень поршня 11. Перебуваючи у максимально верхньому або нижньому положеннях механізм блоку замикає мікроперемикачі, які сигналізують про необхідність припинення переміщення. Опитування стану мікроперемикачів відбувається постійно керуючою програмою.

Блок керування процесом формування краплі 12 складається із групи реле РЕС-9 (паспорт РС4.524.200), які керують напрямом обертання реверсивного двигуна та його вмиканням / вимиканням, транзисторних ключів, які подають сигнали на реле та оптронної розв'язки сигналів керування, що формуються ПК. Розв'язано як сигнали керування, так і рівні сигналізації екстремальних положень поршня. Компресор нагнітання термостабілізуючої рідини 14 конструктивно оформлений як окремий блок із своїм власним джерелом живлення та блоком підтримання температури термостабілізуючої рідини 15. Вимірювання температури здійснюється у герметичному об'ємі термостатування.

Механізм позиціонування 17 положення відеокамери 8 дозволяє здійснювати переміщення останньої у вертикальному та горизонтальному напрямках. Крім того, даним механізмом реалізована можливість зміни кута нахилу системи з камерою у цілому у площині, перпендикулярній до оптичної вісі приладу та площині, перпендикулярній до станини і якій належить оптична вісь ВПНО-1. На рис. 3.6 показано загальний вигляд електромеханічної частини приладу.

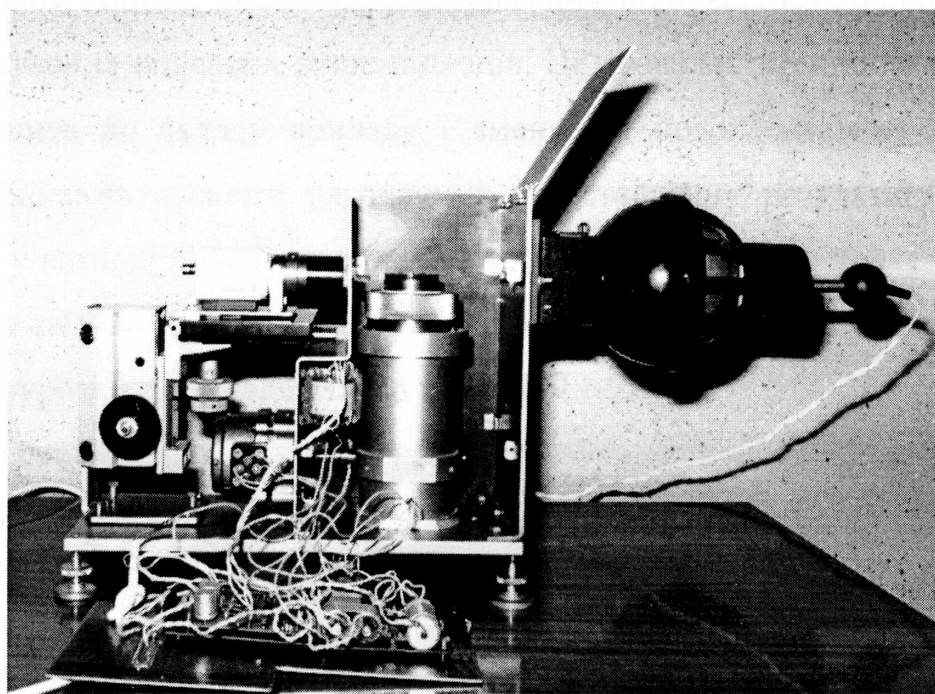


Рис. 3.6. Електромеханічна частини приладу ВПНО-1. Загальний вигляд.

3.4. Особливості програмного забезпечення для реалізації запропонованих методики вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі

Реалізовані у розглянутій вище методиці визначення ГН приладом ВПНО-1 алгоритми процедури виділення меж зображення лежачої краплі шляхом застосування удосконаленої методики трасування контурів та алгоритм знаходження значення поверхневого натягу досліджуваної рідини за вимірюваними площею профілю краплі та її екваторіальним діаметром наведено відповідно на рис. 3.7 та 3.8. Алгоритм роботи підпрограми для вимірювання поверхневого натягу, що базується на значеннях радіусів кривизни, наведено на рис. 2.18.

Алгоритм трасування контуру виділяє точку, яку приймає за межу розділу зображення лежачої краплі – фон у першому наближенні. Після цього проводиться обробка відеозображення краплі. Особливість даного алгоритму полягає у відсутності потреби аналізувати усе поле зображення: на кожному новому кроці вибирається напрям майбутнього переміщення (один із восьми можливих). Таким чином, аналіз відеозображення відбувається швидше, ніж у випадку застосування описаних вище підходів. Це дозволяє зменшити вимоги до ЕОМ, що входить до складу приладу і зменшити його загальну вартість. Головна особливість даного алгоритму: представлення результату обробки зображення не у вигляді поля із підсиленим контрастом, а у вигляді послідовності точок, що дає можливість легко реалізувати процедуру визначення площі фігури, обмеженої контуром, якому належать ці точки [89 – 91].

Суть алгоритму знаходження значення поверхневого натягу (рис. 3.8) полягає у побудові кривої $f(S/a^2, d_{екв}/a)$ за знайденими практично значеннями S та $d_{екв}$ при зміні a від мінімального до максимального значень ($a^2 = 1...10 \text{ мм}^2$). Точка перетину вказаної кривої із кривою, отриманою шляхом проведення розрахунків, описаних у розділі 2, дає шукане значення капілярної постійної a .

Коди відповідних підпрограм подано у додатках Е, Є, Ж, З.

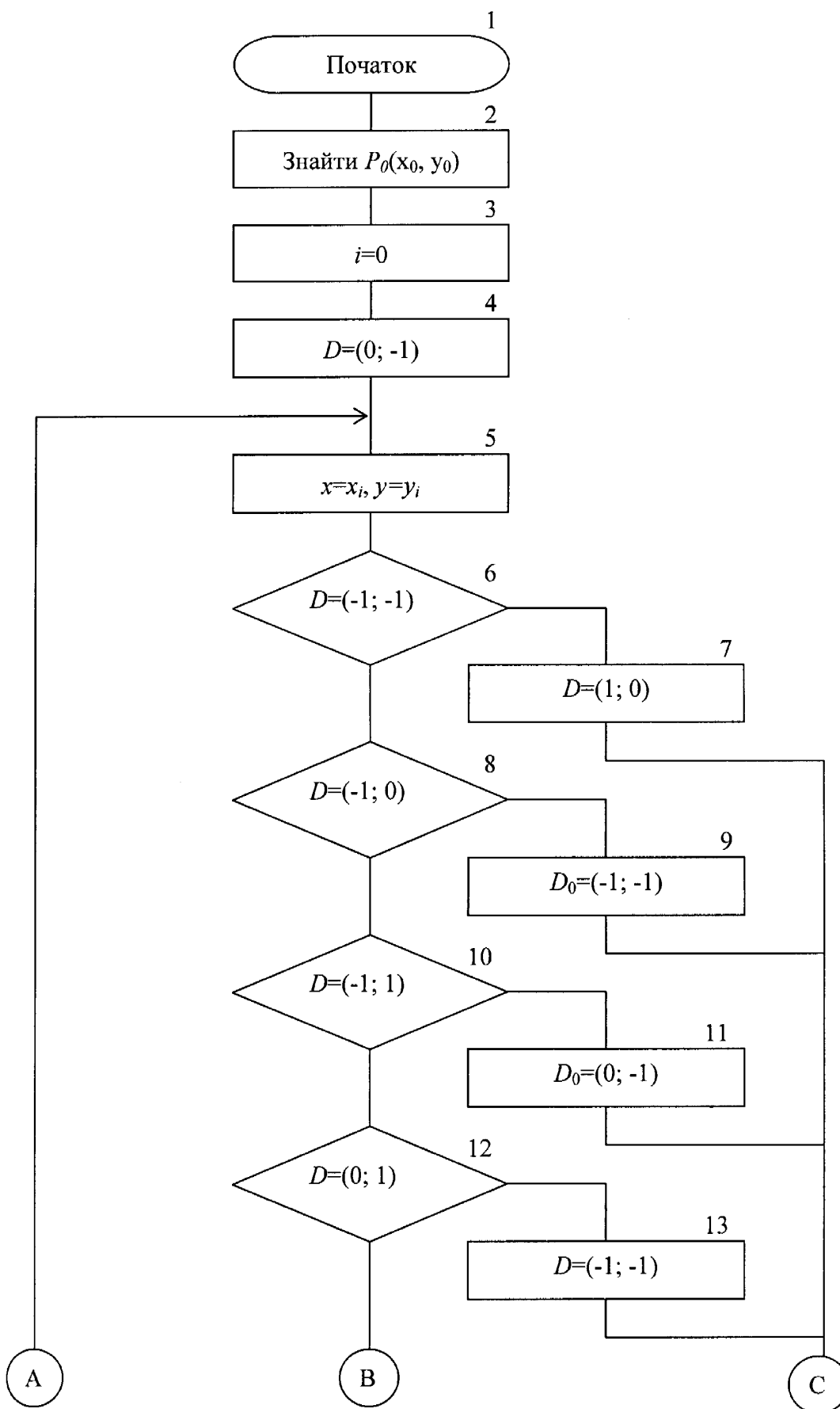


Рис. 3.7. Алгоритм трасування контуру лежачої краплі

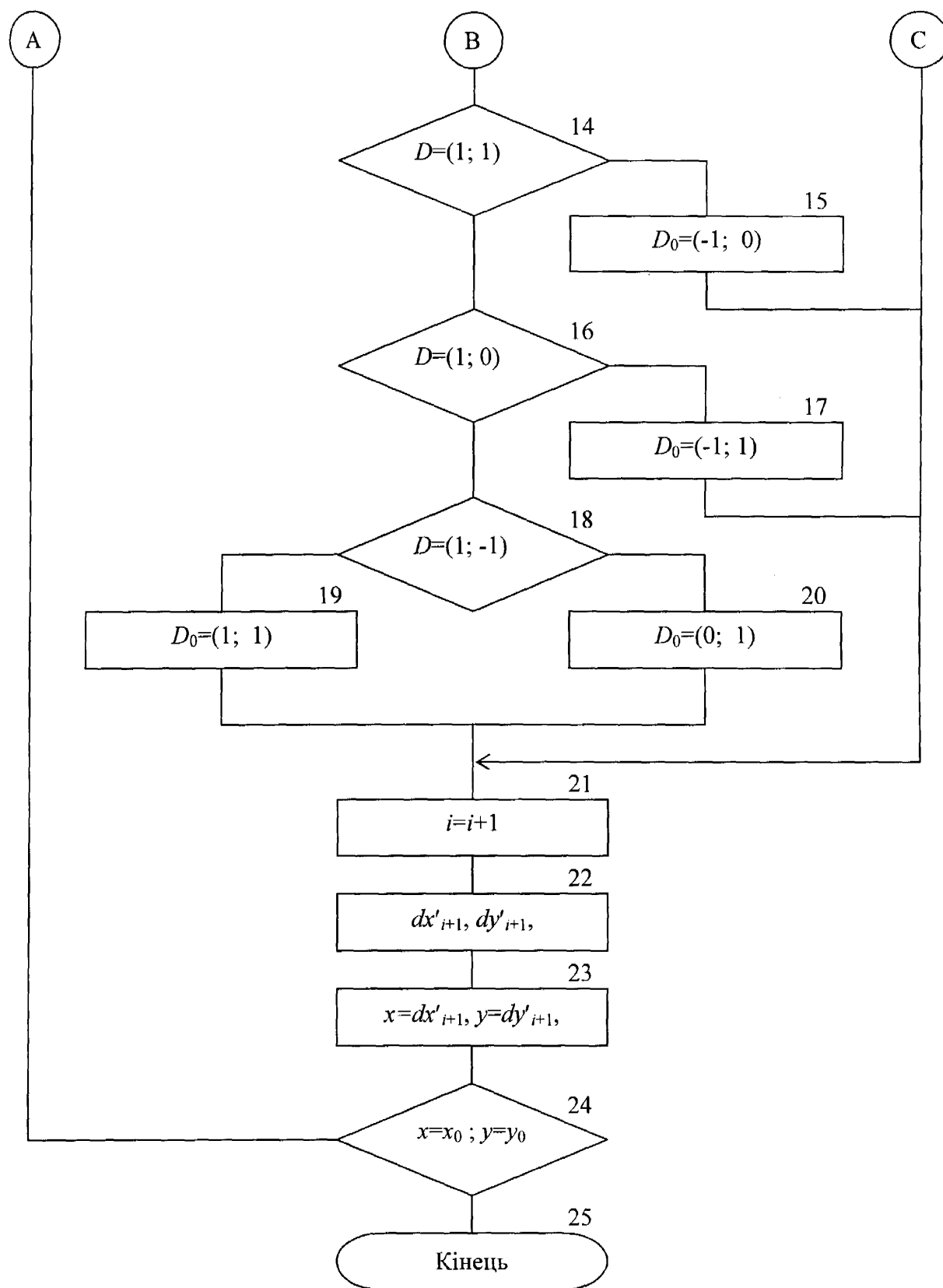


Рис. 3.7. Алгоритм трасування контуру лежачої краплі (продовження)

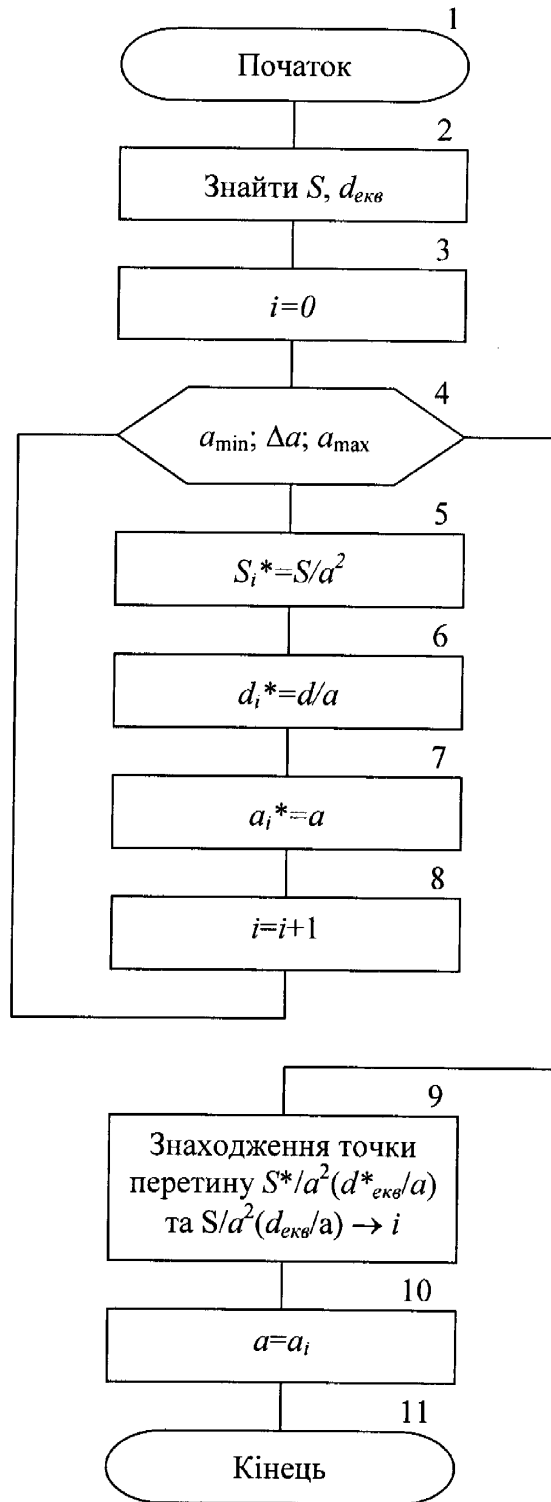


Рис. 3.8. Алгоритм знаходження значення поверхневого натягу досліджуваної рідини.

Розроблена програмне забезпечення дозволяє здійснювати керування процесом формування краплі як у бік збільшення, так і зменшення її об'єму.

Зв'язок комп'ютера із приладом ВПНО-1 здійснюється з використанням оптронної розв'язки.

3.5. Розробка методики проведення вимірювання поверхневого натягу приладом ВПНО-1

Методика проведення вимірювання поверхневого натягу σ розробленим приладом ВПНО-1, структурна схема якого наведена на рис. 3.1, а загальний вигляд у цілому і окремих його складових зокрема – на рис. 3.4, 3.5, 3.6, передбачає підготовку приладу і досліджуваних рідин до проведення вимірювання, безпосередню роботу з приладом та заходи, спрямовані на проведення наступних вимірювань.

1. Підготовка приладу до проведення вимірювань.

1.1. Розташувати прилад на масивній антивібраційній горизонтальній підставці. Бажано розташування приладу на віброізолюваній ділянці підлоги приміщення. Для проведення вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі найкращим типом приміщень є підвальні, у яких відсутнє сусіднє розташування двигунів, компресорів, приводів вентиляції тощо. Забороняється проводити вимірювання з порушенням вимог щодо віброізоляції приладу.

1.2. Виставити горизонтальне положення станини приладу шляхом обертання гвинтових ніжок. Контролювати ступінь горизонтальності за положенням повітряного пухирця у покажчикові рівня. Домогтися перебування пухирця у центрі рівня.

1.3. Увімкнути ПЕОМ.

1.4. Завантажити програмне забезпечення.

1.5. За допомогою механізму позиціонування 17 положення відеокамери 8 шляхом переміщення останньої у вертикальному та горизонтальному напрямках налаштувати камеру таким чином, щоб на екрані ЕОМ з'явилося чітке зображення стінок капіляра (оптичне збільшення об'єкту зменшує оптичну

глибину різкості утвореного зображення. Таким чином, різким буде зображення точок, що лежать у площині, перпендикулярній до оптичної вісі відеокамери). Даним механізмом реалізована можливість зміни кута нахилу системи з камерою у цілому у площині, перпендикулярній до оптичної вісі приладу та площині, перпендикулярній до станини і якій належить оптична вісь ВПНО-1. На рис. 3.9 наведено можливі зміни положення камери.

1.6. Забезпечити горизонтальність оптичної вісі відеокамери 8 (рис. 3.9, б). Для цього скористатися введеною у конструкцію приладу тонкою дротиною з вантажем, прикріпленим до її нижнього кінця. Дротиною під дією вантажу набуває строго вертикального положення; розташована у площині меридіанного перерізу краплі вона слугує тестовим об'єктом. Ознакою горизонтальності оптичної вісі камери 8 з об'єктивом 7 є однакова різкість зображення дротини по усій її довжині у полі зору відеосистеми (рис. 3.10, а). Розфокусування її у верхній (рис. 3.10, б) або нижній (рис. 3.10, в) частині необхідно усунути зміною кута нахилу камери (рис. 3.10, в).

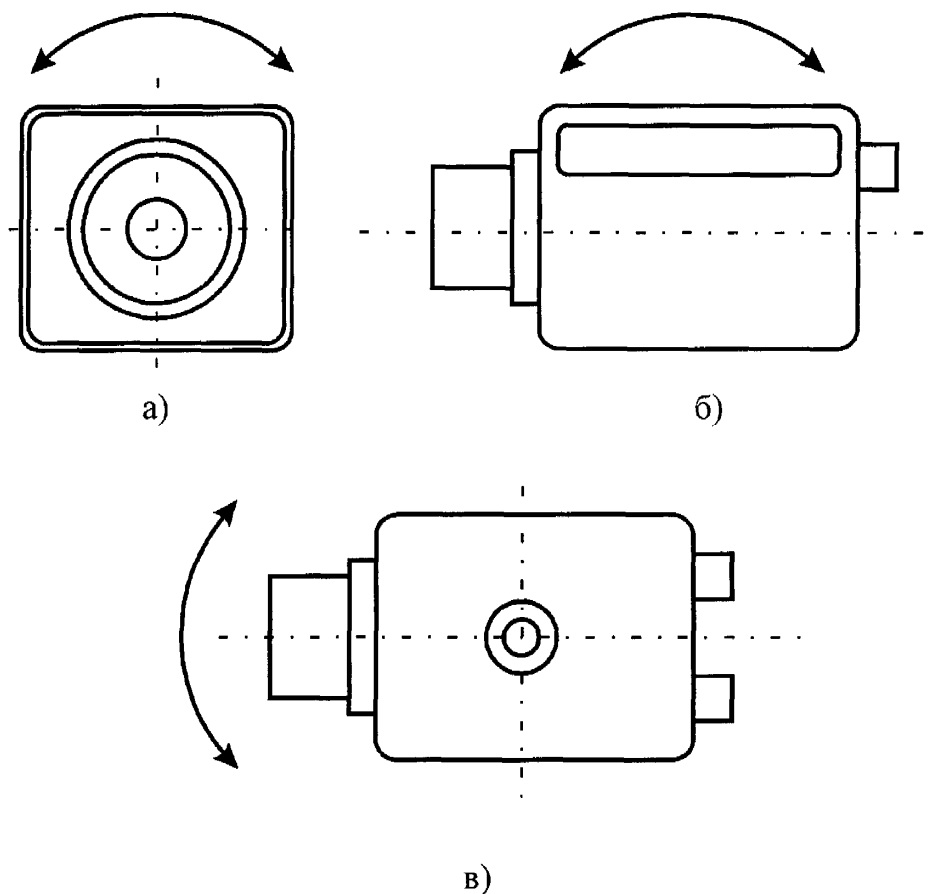


Рис. 3.9. Ступені свободи відеокамери.

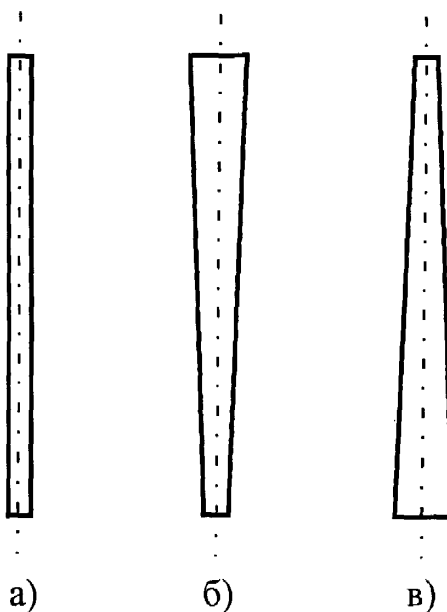


Рис. 3.10. Зображення вертикального тестового об'єкта:

- а) вісь камери встановлена горизонтально;
 б), в) – існують відхилення осі від горизонталі

1.7. Забезпечити співпадання оптичних осей відеокамери та приладу у вертикальній площині (рис. 3.10, в). Ознакою співпадання є однакова різкість зображення контурів капіляра.

1.8. Приєднати трубки термостатування до штуцерів блоку формування краплі 10.

1.9. Увести досліджувану рідину у термостатовану камеру за допомогою стерильного шприца.

1.10. Увімкнути термостабілізоване джерело витрати. Перейти до проведення вимірювання поверхневого натягу досліджуваної рідини через 30 хв.

2. Проведення визначення поверхневого натягу.

2.1. Натиснути спонку вмикання крокового двигуна на збільшення об'єму краплі.

2.2. Зупинити процес формування краплі в момент формування яскраво вираженого екваторіального діаметра лежачої краплі.

2.3. Налаштувати освітлювач так, щоб утворене зображення лежачої краплі було якомога контрастнішим.

2.4. Задати часовий інтервал фіксування зображення.

2.5. Увімкнути режим вимірювання геометрії краплі. При цьому відновиться процес збільшення об'єму краплі. Через заданий часовий інтервал здійснюватиметься автоматична фіксація зображення краплі.

2.6. Зупинити процес формування краплі (момент зупинки визначається дослідником).

2.7. Повторити п. 2.5 у режимі зменшення об'єму краплі.

2.8. Зупинити процес формування краплі (момент зупинки, аналогічно, визначається дослідником).

2.9. Перейти до режиму вимірювання σ . При цьому буде проаналізовано параметри S та $d_{\text{екв}}$ чи R_1 , R_2 та b отриманих зображень. Згідно із описаними методиками визначаються значення поверхневого натягу досліджуваної рідини на кожному кроці формування краплі у прямому та зворотньому напрямках і визначається похибка отриманого результату.

2.10. Вимкнути термостабілізоване джерело витрати.

2.11. Відкрутити кільце блоку формування краплі.

2.12. Зняти тримач із капіляром.

2.13. Звільнити об'єм камери від досліджуваної рідини.

2.14. Звільнити капіляр від залишків досліджуваної рідини.

2.15. Поставити назад тримач із капіляром.

2.16. Закрутити кільце блоку формування краплі.

2.17. За потреби вимірювання поверхневого натягу чергової рідини перейти до п. 1.9.

3. Закінчення роботи.

3.1. Вимкнути ПЕОМ.

3.2. Вимкнути термостабілізоване джерело витрати.

3.3. Відкрутити кільце блоку формування краплі.

3.4. Зняти тримач із капіляром.

- 3.5. Очистити ємність камери.
- 3.6. Очистити капіляр від залишків рідини.
- 3.7. Поставити назад тримач із капіляром.
- 3.8. Закрутити кільце.

Висновки до розділу

З метою розробки приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі здійснено наступне:

а) розроблена структурна схема приладу ВПНО-1, який реалізує запропоновані методики визначення поверхневого натягу методом лежачої краплі. Основними функціональними блоками приладу є: освітлювач, який формує монохроматичний пучок параксіальних променів, блок формування краплі, який забезпечує утворення лежачої краплі досліджуваної рідини на торці вертикально встановленого ножового капіляра, збільшення та зменшення об'єму утвореної краплі, блок підтримання температури термостабілізуючої рідини; механічні блоки для встановлення телевізійної камери у необхідному положенні, ЕОМ із відповідним програмним забезпеченням;

б) проаналізовано способи фільтрації, підвищення контрасту зображення та методика виділення профілю лежачої краплі методом трасування її контуру;

в) сформульовано вимоги щодо конструкції окремих механічних і електричних блоків приладу ВПНО-1, у тому числі до капіляра для формування лежачої краплі, до блоку формування краплі у цілому, параметрів освітлювача тощо. Визначені конкретні значення допустимих параметрів, які характеризують вказані вище блоки;

г) розроблені блок-схеми алгоритмів роботи системи вимірювання параметрів лежачої краплі (площі верхньої частини краплі, обмеженої вершиною та екваторіальним діаметром та самого екваторіального діаметра, радіусів кривизни капілярної поверхні у взаємно-перпендикулярних площинах для довільної точки капілярної поверхні) і відповідне програмне забезпечення, які

реалізують запропоновані удосконалені методики вимірювання поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина – повітря методом лежачої краплі;

д) розроблено методику вимірювання поверхневого натягу рідин приладом ВПНО-1, яка передбачає такі основні етапи вимірювання: попередню підготовку приладу ВПНО-1 до проведення вимірювань поверхневого натягу; вимірювання геометричних параметрів лежачої краплі згідно із запропонованими у розділі 2 методиками; підготовку приладу ВПНО-1 до проведення вимірювання поверхневого натягу наступних досліджуваних рідин. Вибір методики вимірювання поверхневого натягу здійснюється інтерактивним шляхом – за вибором користувача.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВІДОМИХ І УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК
ТА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО
НАТЯГУ МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

Незважаючи на те, що крім запропонованих удосконалених методик відомий ряд інших методик, які були проаналізовані в 1-ому розділі роботи, кожна з яких має свої переваги і недоліки, актуальним залишається питання їхнього порівняльного метрологічного аналізу, що дозволить з урахуванням умов проведення контролю і реалізації цих методик, а також вимог щодо точності отриманих результатів використовувати ці методики. Це вимагає розробки такої методики проведення порівняльного метрологічного аналізу, який був би приведений до однієї базової основи для всіх методик.

Крім цього необхідним є метрологічний аналіз розробленого і описаного в 3-ому розділі розробленого приладу ВПНО-1 з урахуванням особливостей складових його блоків для вимірювання необхідних геометричних параметрів лежачої краплі, інших параметрів, які входять в запропоновану залежність для контролю поверхневого натягу σ , а також впливу зовнішніх факторів на отримані результати.

Згадане є предметом досліджень даного розділу.

4.1. Метрологічний аналіз відомої методики вимірювання поверхневого
натягу методом лежачої краплі

Для проведення порівняльного метрологічного аналізу методичних похибок методик вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом лежачої краплі зручно скористатися наступним підходом. Необхідно задатися розрахованою моделлю лежачої краплі, яка б характеризувалася відповідним набором параметрів, що входять до складу досліджуваної моделі. Такими параметрами можуть бути капілярна стала a^2 , радіус кривизни у вершині краплі

b , коефіцієнт форми краплі β , що об'єднує ці два параметри, координати точок профілю краплі тощо.

Після цього слід застосувати математичний апарат досліджуваної методики до вхідного (розрахованого) набору даних з метою знаходження шуканого параметра (у даному випадку, капілярної постійної або пов'язаних із нею величин) і порівняння його із аналогічним, що був використаний як задаючий при проведенні розрахунку моделі.

Обчислення згідно із методикою Дорсі проводяться згідно із виразами (1.7), (1.8). Інформативними параметрами для даної методики є значення екваторіального радіуса та величини $H_{\pi/4}$ (розділ 1 даної роботи). Отже, для дослідження методичної похибки вказаної методики необхідно розрахувати теоретичний профіль краплі, задавшись безрозмірним параметром β і розрахувати значення величини a^2 / r^2 , що отримується за (1.7) двома способами: безпосередньо за вхідними даними та згідно із методикою Дорсі.

Відносна методична похибку методики у відсотках визначається наступним чином:

$$\delta = 100(a^2 / r^2 - (a^2 / r^2)_D) / (a^2 / r^2)_D, \quad (4.1)$$

де $(a^2 / r^2)_D$ – дійсні значення параметра, що знаходяться згідно із досліджуваною методикою.

Результати такого розрахунку наведено у табл. 4.1. Згідно із табличними даними при $\beta > 5$ відносна методична похибка за абсолютним значенням не перевищує 0,03%. Але при $\beta < 5$ похибка зростає і при $\beta = 0,9$ її значення різко збільшується і перевищує 1%. Слід зазначити, що згадана порогова величина безрозмірного параметра β охоплює більшість можливих комбінацій значень капілярної сталої та радіуса кривизни при вершині краплі для досліджуваних рідин. Тому можна зробити висновок про доцільність застосування такої методики для знаходження капілярних сталих розплавів металів, а не рідин,

оскільки розплави характеризуються значно більшими значеннями коефіцієнта форми, для яких відносна методична похибка за даною методикою зберігає прийнятні значення.

Таблиця 4.1.

Аналіз методики Дорсі

№ п/п	$\frac{H_{\pi/4}}{r}$	β	$\frac{a^2}{r^2}$ розр.	$\frac{a^2}{r^2}$ Дорсі	$\delta \frac{a^2}{r^2}, \%$
1	0,45	0,942	1,3404	1,3320	0,6296
2	0,451	0,977	1,3004	1,2925	0,6062
3	0,452	1,013	1,2624	1,2552	0,5733
4	0,453	1,05	1,2264	1,2197	0,5433
5	0,454	1,088	1,1921	1,1861	0,5037
6	0,455	1,126	1,1595	1,1541	0,4654
7	0,456	1,165	1,1285	1,1236	0,4300
8	0,457	1,204	1,099	1,0946	0,3990
9	0,458	1,245	1,071	1,0669	0,3817
10	0,459	1,285	1,0443	1,0404	0,3689
11	0,46	1,327	1,0187	1,0151	0,3493
12	0,461	1,369	0,9942	0,9909	0,3300
13	0,462	1,411	0,9708	0,9677	0,3180
14	0,463	1,454	0,9484	0,9455	0,3101
15	0,464	1,498	0,9269	0,9241	0,3019
16	0,465	1,543	0,9062	0,9036	0,2884
17	0,466	1,589	0,8863	0,8839	0,2746
18	0,467	1,636	0,8672	0,8649	0,2659
19	0,468	1,683	0,8488	0,8466	0,2557
20	0,469	1,731	0,8311	0,8290	0,2486
21	0,47	1,78	0,814	0,8121	0,2371
22	0,471	1,83	0,7976	0,7957	0,2375
23	0,472	1,88	0,7817	0,7799	0,2291
24	0,473	1,931	0,7663	0,7647	0,2151
25	0,474	1,983	0,7515	0,7499	0,2120
26	0,475	2,036	0,7372	0,7356	0,2105
27	0,476	2,09	0,7233	0,7219	0,2002
28	0,477	2,144	0,7099	0,7085	0,1976
29	0,478	2,2	0,6969	0,6956	0,1918

Продовження табл. 4.1.

№ п/п	$\frac{H_{\pi/4}}{r}$	β	$\frac{a^2}{r^2}$ розр.	$\frac{a^2}{r^2}$ Дорсі	$\delta \frac{a^2}{r^2}, \%$
68	0,517	5,315	0,3882	0,3881	0,0129
69	0,518	5,425	0,3834	0,3833	0,0198
70	0,519	5,538	0,3786	0,3786	0,0024
71	0,52	5,653	0,374	0,3739	0,0138
72	0,521	5,77	0,3694	0,3694	0,0017
73	0,522	5,89	0,3649	0,3649	-0,0066
74	0,523	6,011	0,3605	0,3605	-0,0105
75	0,524	6,134	0,3562	0,3562	-0,0091
76	0,525	6,259	0,352	0,3520	-0,0015
77	0,526	6,388	0,3478	0,3479	-0,0158
78	0,527	6,52	0,3437	0,3438	-0,0230
79	0,528	6,653	0,3397	0,3398	-0,0222
80	0,529	6,787	0,3358	0,3358	-0,0127
81	0,53	6,924	0,3319	0,3320	-0,0236
82	0,531	7,064	0,3281	0,3282	-0,0247
83	0,532	7,208	0,3244	0,3244	-0,0152
84	0,533	7,353	0,3207	0,3208	-0,0253
85	0,534	7,499	0,3171	0,3172	-0,0236
86	0,535	7,648	0,3135	0,3136	-0,0412
87	0,536	7,8	0,31	0,3101	-0,0460
88	0,537	7,957	0,3066	0,3067	-0,0370
89	0,538	8,118	0,3032	0,3033	-0,0464
90	0,539	8,279	0,2999	0,3000	-0,0408
91	0,54	8,443	0,2967	0,2968	-0,0195
92	0,541	8,609	0,2935	0,2935	-0,0155
93	0,542	8,78	0,2903	0,2904	-0,0290
94	0,543	8,952	0,2872	0,2873	-0,0254
95	0,544	9,128	0,2841	0,2842	-0,0388
96	0,545	9,31	0,2811	0,2812	-0,0338
97	0,546	9,492	0,2781	0,2782	-0,0454
98	0,547	9,679	0,2752	0,2753	-0,0374
99	0,548	9,871	0,2723	0,2724	-0,0456
100	0,549	10,065	0,2695	0,2696	-0,0329
101	0,55	10,26	0,2667	0,2668	-0,0359
102	0,551	10,46	0,2639	0,2640	-0,0547
103	0,552	10,67	0,2612	0,2613	-0,0511

4.2. Аналіз методичних похибок розроблених методик вимірювання поверхневого натягу

У центрованих оптико-цифрових системах з підсвіткою для вимірювання геометричних параметрів тіньового зображення лежачої краплі рідини чи розчину, за якими визначають їхній поверхневий натяг, важлива максимальна стигматичність [3]. Однією з основних причин невідповідності зображення краплі заданого масштабу передачі лінійних розмірів є розбіжність (або збіжність) підсвічу вального жмутка променів після колімуючого об'єктиву. Непаралельність променів, що освічують лежачу краплю, спричинює похибку визначення її геометричних параметрів за тіньовим зображенням, яке сприймає телевізійна камера [92]. Основними складовими такої похибки є сферохроматичні аберації самого колімуючого об'єктива, неточність його юстування відносно системи діафрагмування джерела світла, флуктуації кута розбіжності підсвічу вального жмутка внаслідок нестабільності частотної смуги та вібрації джерела, діафрагми, об'єктива й краплі. Оскільки ця похибка залежить не тільки від параметрів елементів оптичного каналу, але визначається, насамперед розмірами і формою краплі, її слід віднести до методичних [92; 93].

Розглянемо у загальному випадку залежність похибок визначення розмірів радіуса екватора та висоти полюса краплі від неколімованості освічувальних променів та граничні умови, яким повинен відповідати кут розбіжності (збіжності) освічувальних променів для забезпечення необхідної точності вимірювань.

Абсолютна та відносна похибки вимірювання радіуса екватора $d_{екв}$ через розбіжність підсвічувальних променів після колімуючого об'єктива визначається (рис. 4.1) співвідношенням:

$$\Delta d_{екв} = d_{екв} \cos \alpha - d_{екв}; \quad (4.2)$$

$$\delta d_{екв} = \Delta d_{екв} / d_{екв} = \cos \alpha - 1, \quad (4.3)$$

де α – кут розбіжності, що відповідає $d_{екв}$. Ця похибка завжди буде від'ємною незалежно від знака кута α , тобто розбіжності чи збіжності променів.

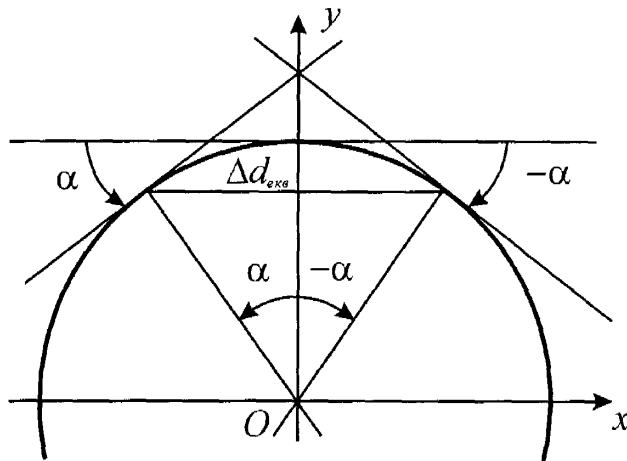


Рис. 4.1. Половина контуру перерізу краплі рідини з екваторіальною площиною: Ox збігається з головною оптичною віссю.

Абсолютна і відносна похибки вимірювання висоти полюса h , викликані розбіжністю променів, визначається (рис. 4.2) аналогічно:

$$\Delta h = \Delta R = R \cos \beta - b_0; \quad (4.4)$$

$$\delta h = \Delta h / h = R(\cos \beta - 1), \quad (4.5)$$

де R – радіус поверхні в області полюса, β – кут розбіжності, що відповідає h .

Для крапель середніх розмірів ($d_{екв} / h = 1 \div 2$) співвідношення $d_{екв}$ і R з достатньою для аналізу похибок точністю визначається розміром краплі ($d_{екв} / h$) [3], тобто тотожністю $R / d_{екв} = d_{екв} / h$, а сам радіус у полюсі – рівністю $R = d_{екв}^2 / h$.

З урахуванням цього, відносне значення похибки висоти полюса через розмір краплі (4.5) буде:

$$\delta h = (d_{екв} / h)^2 (\cos \beta - 1). \quad (4.6)$$

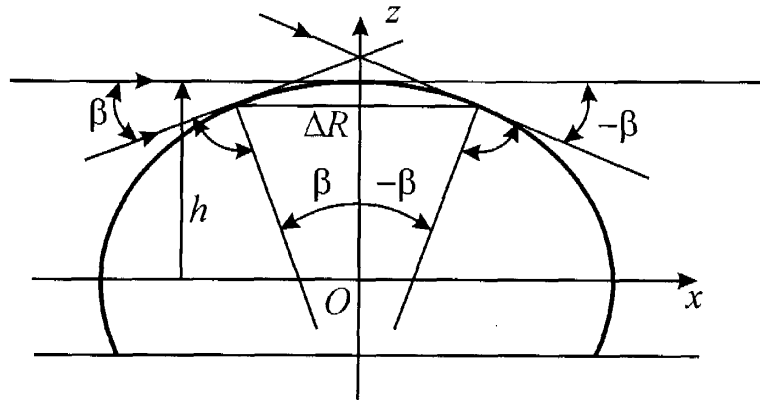


Рис. 4.2. Контур перерізу лежачої краплі рідини у меридіональній площині:
 Ox збігається є головною оптичною віссю.

За незначних (до 5°) кутів розбіжності розмір краплі з достатньою для аналізу похибок точністю визначатиметься залежністю $d_{екв}/h = \sin \alpha / \sin \beta$. Тоді відношення відносних похибок висоти полюса і радіуса екватора краплі:

$$\frac{\delta h}{\delta d_{екв}} = \frac{\sin^2 \alpha (\cos \beta - 1)}{\sin^2 \beta (\cos \alpha - 1)} = \frac{(1 - \cos^2 \alpha)(1 - \cos \beta)}{(1 - \cos^2 \beta)(1 - \cos \alpha)} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 + \cos \beta} \quad (4.7)$$

і близьке до одиниці за незначних кутів розбіжності.

Наприклад, при $\alpha = 5^\circ$, $\beta = 2^\circ$ $\delta h / \delta d_{екв} = 0.9984$, тобто рівне одиниці з похибкою 0.16%. При $\alpha = 1^\circ$, $\beta = 0.5^\circ$ $\delta h / \delta d_{екв} = 0.99994$, тобто рівне одиниці з похибкою $6 \cdot 10^{-3}\%$.

Із співвідношення (4.7) випливає, що відношення абсолютних похибок висоти полюса і радіуса екватора повинно зменшуватися пропорційно розміру краплі $d_{екв}/h$:

$$\Delta h / \Delta d_{екв} = h \delta h / d_{екв} \delta d_{екв} = \sin \beta (1 + \cos \alpha) / \sin \alpha (1 + \cos \beta). \quad (4.8)$$

При $\alpha = 5^\circ$, $\beta = 2^\circ$, $d_{екв}/h = 2.49734 \approx 2.5$ $\Delta h / \Delta d_{екв} \approx 0.399786$. При $\alpha = 1^\circ$,

$$\beta = 0.5^\circ, d_{екв} / h = 1.99992 \approx 2.0 \quad \Delta h / \Delta d_{екв} = 0.49999 \approx 0.5.$$

Отже, відношення абсолютних похибок (4.8) зменшується пропорційно $d_{екв} / h$.

Таким чином, допустимий кут розбіжності (збіжності) підсвічувального жмутка потрібно забезпечувати, виходячи з допустимої похибки передачі максимального розміру зображення – екваторіального діаметра краплі. Для визначення похибок передачі розміру підкладки придатні формули (4.4), (4.5). Оцінювати та встановлювати допустимі відхилення кута розбіжності доцільно, керуючись граничними можливостями пристрою, за допомогою якого реєструється зображення. Для матричних фотоприймачів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) вони визначаються розміром одного чутливого елемента (пікселя). Похибка дискретизації зображення ПЗЗ фотоприймачем є інструментальною випадковою рівномірно розподіленою в межах одного пікселя [93], абсолютне ентропійне значення якої складає ± 0.5 розміру пікселя, а середньоквадратичне $\sigma = |\Delta| / \sqrt{3} = 0.3$ розміру пікселя.

Для ефективного використання чутливого поля фотоприймача дискретизована величина діаметра екватора краплі повинна становити принаймі 90% від більшого розміру чутливого поля. Для максимального використання потенційних можливостей відеокамери відносна похибка (4.15), викликана розбіжністю променів, повинна бути на клас меншою за похибку дискретизації δ , тобто її модуль має становити $|\delta d_{екв}| \leq 0.3|\delta| = 1.5 \cdot 10^{-4} = 1.5 \cdot 10^{-2} \%$, а кут розбіжності α не повинен перевищувати 1° .

У [92] показано, що усунення похибок визначення розмірів лежачої краплі, зумовлених розбіжністю (збіжністю) підсвічувальних променів неможливе. Компенсація їхніх систематичних складових корегуванням масштабу оптичного каналу нереальна, оскільки крапля і ножовий капіляр (верхній торець якого є зразковим елементом для визначення масштабу) є тілами обертання з різною кривизною, а кривизна поверхні краплі є змінною і наперед невідомою. Основним критерієм юстування масштабу може бути мінімум похибки передачі діаметра

верхнього торця ножового капіляра.

У [92] визначено умови, за яких похибками можна знехтувати як на клас меншими порівняно із неминучими похибками дискретизації зображення відеокамерою: для ПЗЗ-матриць типу 2048×2048 кут розбіжності (збіжності) підсвічувальних променів, дотичних до екватора краплі, не повинен перевищувати 1°, для матриць типу 512×512, 640×480 – не бути більшим 2°. При цьому повинна бути забезпечена як мінімум удвічі вища роздільна здатність оптичної системи біля краю тіньового зображення порівняно із матричним фотоприймачем, тобто при розмірі пікселя 14×14 мкм – не менше 143 ліній/мм, при розмірі 8×8 мкм – не менше 250 ліній/мм.

4.2.1. Методична похибка вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни.

Для аналізу розробленої методики вимірювання поверхневого натягу, яка передбачає визначення радіусів кривизни, скористаємось підходом, аналогічним до того, який було використано для аналізу методики Дорсі.

Розрахунковий профіль краплі отримуємо, розв'язуючи рівняння (2.18). Значення радіусів кривизни отримуємо безпосередньо із розв'язку: (2.11), (2.12). Згідно із розробленою методикою знаходимо відповідні значення радіусів кривизни. Для знаходження відносної методичної похибки скористаємося виразом (2.22), розділивши його на $\Delta\rho g$ і позначимо його через F :

$$F = \frac{z}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}. \quad (4.9)$$

Відповідний вираз, який оперує значеннями радіусів кривизни, знайденими за досліджуваною методикою, позначимо F_1 .

Тоді можна записати:

$$\delta F_{\text{відн}} = 100(F_1 - F) / F. \quad (4.10)$$

Результати розрахунків наведені у табл.4.2. Значення R_1 , R_2 відповідають радіусам кривизни, отриманим із розв'язку рівняння капілярності.

Таблиця 4.2

Аналіз методичної похибки методики,
що використовує значення радіусів кривизни ($a^2 = 10 \text{ мм}^2$, $b = 1 \text{ мм}$)

l	φ	x	z	R_1	R_2	F	F_1	$\delta F_{\text{відн.}}$ %
0,2441	0,2444	0,2416	0,0297	0,9956	0,9985	5,0544	5,0542	-0,0035
0,2473	0,2476	0,2448	0,0304	0,9955	0,9985	5,0553	5,0556	0,0048
0,2505	0,2509	0,2479	0,0312	0,9954	0,9985	5,0561	5,0555	-0,0121
0,2537	0,2541	0,2510	0,0320	0,9953	0,9984	5,0568	5,0563	-0,0093
0,2569	0,2573	0,2541	0,0328	0,9952	0,9984	5,0573	5,0571	-0,0046
0,2601	0,2605	0,2572	0,0337	0,9950	0,9983	5,0577	5,0571	-0,0113
0,2633	0,2638	0,2603	0,0345	0,9949	0,9983	5,0580	5,0572	-0,0154
0,2665	0,2670	0,2634	0,0353	0,9948	0,9982	5,0581	5,0589	0,0156
0,2697	0,2702	0,2664	0,0362	0,9947	0,9982	5,0582	5,0573	-0,0177
0,2729	0,2734	0,2695	0,0370	0,9945	0,9982	5,0582	5,0580	-0,0033
0,2761	0,2766	0,2726	0,0379	0,9944	0,9981	5,0581	5,0577	-0,0091
0,2793	0,2799	0,2757	0,0388	0,9943	0,9981	5,0579	5,0580	0,0009
0,2825	0,2831	0,2788	0,0397	0,9942	0,9980	5,0577	5,0583	0,0110
0,2857	0,2863	0,2819	0,0406	0,9940	0,9980	5,0574	5,0579	0,0103
0,2889	0,2895	0,2849	0,0415	0,9939	0,9979	5,0571	5,0569	-0,0041
0,2922	0,2928	0,2880	0,0424	0,9938	0,9979	5,0567	5,0571	0,0084
0,2954	0,2960	0,2911	0,0433	0,9936	0,9979	5,0562	5,0554	-0,0172
0,2986	0,2992	0,2941	0,0443	0,9935	0,9978	5,0557	5,0547	-0,0202
0,3018	0,3025	0,2972	0,0452	0,9933	0,9978	5,0552	5,0547	-0,0099
0,3050	0,3057	0,3003	0,0462	0,9932	0,9977	5,0547	5,0553	0,0116
0,3082	0,3089	0,3033	0,0472	0,9931	0,9977	5,0541	5,0538	-0,0050

Таким чином, абсолютне значення відносної методичної похибки даної методики на перевищує 0,15%.

4.2.2. Методична похибка вимірювання поверхневого натягу на основі значень площі профілю лежачої краплі та її екваторіального діаметра.

Для розрахунку площі краплі та її екваторіального діаметра у безрозмірних координатах необхідно володіти інформацією про координати точок профілю

краплі. Їх отримують, розв'язуючи систему рівнянь (2.18) методом Рунге-Куты 4 порядку.

Доведено: якщо метод Рунге-Кутты апроксимує вихідне рівняння, то він сходиться при $\tau \rightarrow 0$, причому порядок точності співпадає із порядком апроксимації.

Отже, оскільки у даному випадку використовується метод 4 порядку, точність визначення безрозмірних координат точок профілю лежачої краплі – 0.0001.

Для того, щоб визначити методичну похибку запропонованої методики, що полягає у вимірюванні площі верхньої частини меридіанного профілю лежачої краплі та екваторіального діаметра, можна здійснити наступне.

Необхідно задатися значеннями двох розмірних параметрів: капілярної сталої та радіуса кривизни у вершині краплі, розрахувати координати точок профілю лежачої краплі у розмірних координатах згідно (1.19). Далі необхідно визначити площу перерізу та екваторіальний діаметр краплі і, застосувавши розроблену методику, використати залежність вказаної площі профілю лежачої краплі від екваторіального діаметра для визначення за нею вихідного значення капілярної постійної.

Значення відносної методичної похибки визначаються, як і у попередніх випадках.

У табл. 4.3 наведено результати такого розрахунку при $a^2 = 1$; $b = 0,1 \div 4$. Показано, також, значення абсолютної методичної похибки.

Таблиця 4.3

Методична похибка при вимірюванні σ за значеннями площі перерізу та екваторіального діаметра ($a^2 = 1$; $b = 0,1 \div 4$)

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
1,0000	0,1000	0,1994	0,0156	1,0000	0,0000	-0,0035
1,0000	0,2000	0,3950	0,0601	0,9995	-0,0005	-0,0507
1,0000	0,3000	0,5838	0,1282	0,9995	-0,0005	-0,0499

Продовження табл. 4.3.

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
1,0000	0,4000	0,7636	0,2152	0,9991	-0,0009	-0,0900
1,0000	0,5000	0,9332	0,3142	0,9997	-0,0003	-0,0259
1,0000	0,6000	1,0923	0,4185	0,9999	-0,0001	-0,0094
1,0000	0,7000	1,2415	0,5248	0,9991	-0,0009	-0,0910
1,0000	0,8000	1,3816	0,6331	0,9999	-0,0001	-0,0139
1,0000	0,9000	1,5133	0,7381	1,0003	0,0003	0,0308
1,0000	1,0000	1,6363	0,8387	1,0007	0,0007	0,0721
1,0000	1,1000	1,7524	0,9433	0,9998	-0,0002	-0,0222
1,0000	1,2000	1,8619	1,0442	0,9991	-0,0009	-0,0926
1,0000	1,3000	1,9655	1,1374	1,0003	0,0003	0,0300
1,0000	1,4000	2,0633	1,2253	1,0009	0,0009	0,0876
1,0000	1,5000	2,1559	1,3111	0,9994	-0,0006	-0,0633
1,0000	1,6000	2,2440	1,3984	0,9995	-0,0005	-0,0523
1,0000	1,7000	2,3278	1,4835	1,0009	0,0009	0,0945
1,0000	1,8000	2,4079	1,5640	0,9992	-0,0008	-0,0846
1,0000	1,9000	2,4844	1,6378	1,0008	0,0008	0,0757
1,0000	2,0000	2,5577	1,7035	1,0001	0,0001	0,0147
1,0000	2,1000	2,6280	1,7843	0,9991	-0,0009	-0,0936
1,0000	2,2000	2,6955	1,8563	0,9992	-0,0008	-0,0819
1,0000	2,3000	2,7606	1,9195	1,0009	0,0009	0,0942
1,0000	2,4000	2,8231	1,9866	0,9995	-0,0005	-0,0493
1,0000	2,5000	2,8834	2,0430	1,0001	0,0001	0,0072
1,0000	2,6000	2,9416	2,1023	1,0004	0,0004	0,0426
1,0000	2,7000	2,9979	2,1642	1,0000	0,0000	0,0010
1,0000	2,8000	3,0523	2,2134	1,0003	0,0003	0,0325
1,0000	2,9000	3,1050	2,2645	1,0010	0,0010	0,0977
1,0000	3,0000	3,1560	2,3174	0,9992	-0,0008	-0,0797
1,0000	3,1000	3,2054	2,3720	1,0001	0,0001	0,0140
1,0000	3,2000	3,2533	2,4285	1,0007	0,0007	0,0709
1,0000	3,4000	3,3451	2,5130	0,9997	-0,0003	-0,0331
1,0000	3,5000	3,3891	2,5570	1,0006	0,0006	0,0606
1,0000	3,6000	3,4320	2,6022	0,9991	-0,0009	-0,0885
1,0000	3,7000	3,4738	2,6486	1,0005	0,0005	0,0487
1,0000	3,8000	3,5146	2,6962	1,0008	0,0008	0,0824
1,0000	3,9000	3,5543	2,7448	1,0008	0,0008	0,0777
1,0000	4,0000	3,5931	2,7766	1,0007	0,0007	0,0700

У табл.4.4 та 4.5 наведено аналогічну інформацію для різних значень капілярної сталої та радіуса кривизни у вершині краплі

Таблиця 4.4.

Методична похибка при вимірюванні σ за значеннями площі перерізу та екваторіального діаметра ($a^2 = 3; b = 0,1 \div 4$)

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
3,0000	0,1000	0,1999	0,0157	3,0009	0,0009	0,0287
3,0000	0,2000	0,3984	0,0620	2,9999	-0,0001	-0,0021
3,0000	0,3000	0,5944	0,1373	2,9972	-0,0028	-0,0924
3,0000	0,4000	0,7868	0,2368	3,0029	0,0029	0,0955
3,0000	0,5000	0,9749	0,3594	2,9980	-0,0020	-0,0676
3,0000	0,6000	1,1578	0,4999	3,0006	0,0006	0,0189
3,0000	0,7000	1,3350	0,6567	3,0029	0,0029	0,0974
3,0000	0,8000	1,5062	0,8265	3,0018	0,0018	0,0593
3,0000	0,9000	1,6715	0,9979	2,9994	-0,0006	-0,0204
3,0000	1,0000	1,8310	1,1784	3,0018	0,0018	0,0606
3,0000	1,1000	1,9847	1,3620	2,9975	-0,0025	-0,0848
3,0000	1,2000	2,1328	1,5475	2,9991	-0,0009	-0,0285
3,0000	1,3000	2,2754	1,7359	2,9979	-0,0021	-0,0710
3,0000	1,4000	2,4128	1,9221	2,9985	-0,0015	-0,0505
3,0000	1,5000	2,5452	2,1003	3,0004	0,0004	0,0118
3,0000	1,6000	2,6728	2,2860	3,0004	0,0004	0,0134
3,0000	1,7000	2,7959	2,4701	2,9985	-0,0015	-0,0512
3,0000	1,8000	2,9147	2,6472	3,0014	0,0014	0,0467
3,0000	1,9000	3,0295	2,8219	3,0029	0,0029	0,0974
3,0000	2,0000	3,1403	2,9820	2,9985	-0,0015	-0,0492
3,0000	2,1000	3,2476	3,1575	2,9975	-0,0025	-0,0838
3,0000	2,2000	3,3513	3,3271	2,9984	-0,0016	-0,0523
3,0000	2,3000	3,4518	3,4880	3,0013	0,0013	0,0419
3,0000	2,4000	3,5493	3,6383	3,0010	0,0010	0,0337
3,0000	2,5000	3,6438	3,7943	2,9975	-0,0025	-0,0818
3,0000	2,6000	3,7355	3,9557	2,9995	-0,0005	-0,0178
3,0000	2,7000	3,8246	4,1033	2,9992	-0,0008	-0,0259

Продовження табл.4.4.

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
3,0000	2,8000	3,9111	4,2357	3,0029	0,0029	0,0966
3,0000	2,9000	3,9952	4,3915	2,9985	-0,0015	-0,0490
3,0000	3,0000	4,0771	4,5311	2,9974	-0,0026	-0,0858
3,0000	3,1000	4,1568	4,6534	2,9995	-0,0005	-0,0177
3,0000	3,2000	4,2345	4,7994	3,0018	0,0018	0,0585
3,0000	3,3000	4,3102	4,9273	3,0006	0,0006	0,0202
3,0000	3,4000	4,3840	5,0579	3,0013	0,0013	0,0426
3,0000	3,5000	4,4560	5,1689	3,0004	0,0004	0,0144
3,0000	3,6000	4,5263	5,3045	3,0007	0,0007	0,0225
3,0000	3,7000	4,5950	5,4198	3,0012	0,0012	0,0405
3,0000	3,8000	4,6621	5,5373	2,9997	-0,0003	-0,0100
3,0000	3,9000	4,7278	5,6568	2,9993	-0,0007	-0,0225
3,0000	4,0000	4,7919	5,7545	2,9992	-0,0008	-0,0267

Таблиця 4.5.

Методична похибка при вимірюванні σ за значеннями площі перерізу та екваторіального діаметра ($a^2 = 9$; $b = 0,1 \div 4$).

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
9,0000	0,1000	0,2000	0,0157	8,9990	-0,0010	-0,0112
9,0000	0,2000	0,3995	0,0623	8,9960	-0,0040	-0,0440
9,0000	0,3000	0,5982	0,1395	9,0050	0,0050	0,0550
9,0000	0,4000	0,7956	0,2451	9,0065	0,0065	0,0717
9,0000	0,5000	0,9913	0,3818	9,0035	0,0035	0,0393
9,0000	0,6000	1,1851	0,5436	8,9969	-0,0031	-0,0340
9,0000	0,7000	1,3764	0,7286	9,0049	0,0049	0,0550
9,0000	0,8000	1,5650	0,9326	8,9966	-0,0034	-0,0379
9,0000	0,9000	1,7507	1,1565	9,0001	0,0001	0,0015
9,0000	1,0000	1,9334	1,3969	8,9996	-0,0004	-0,0047
9,0000	1,1000	2,1131	1,6627	9,0042	0,0042	0,0468
9,0000	1,2000	2,2895	1,9322	8,9994	-0,0006	-0,0067
9,0000	1,3000	2,4626	2,2140	9,0006	0,0006	0,0066
9,0000	1,4000	2,6323	2,5074	9,0036	0,0036	0,0403
9,0000	1,5000	2,7985	2,8118	9,0001	0,0001	0,0014
9,0000	1,6000	2,9613	3,1205	9,0016	0,0016	0,0172
9,0000	1,7000	3,1207	3,4335	9,0011	0,0011	0,0119

Продовження табл. 4.5.

a^2	b	S/a^2	$d_{екв}/a$	$a^2_{метод.}$	Δa^2	$\delta a^2, \%$
9,0000	1,8000	3,2768	3,7500	9,0002	0,0002	0,0017
9,0000	1,9000	3,4295	4,0702	8,9981	-0,0019	-0,0210
9,0000	2,0000	3,5790	4,3949	9,0021	0,0021	0,0234
9,0000	2,1000	3,7252	4,7071	9,0020	0,0020	0,0224
9,0000	2,2000	3,8683	5,0273	8,9970	-0,0030	-0,0329
9,0000	2,3000	4,0083	5,3473	8,9986	-0,0014	-0,0158
9,0000	2,4000	4,1454	5,6664	9,0049	0,0049	0,0542
9,0000	2,5000	4,2795	5,9907	9,0061	0,0061	0,0673
9,0000	2,6000	4,4108	6,3242	9,0004	0,0004	0,0048
9,0000	2,7000	4,5394	6,6444	9,0059	0,0059	0,0654
9,0000	2,8000	4,6653	6,9496	9,0000	0,0000	-0,0005
9,0000	2,9000	4,7886	7,2510	9,0050	0,0050	0,0556
9,0000	3,0000	4,9093	7,5655	8,9962	-0,0038	-0,0427
9,0000	3,1000	5,0277	7,8694	9,0043	0,0043	0,0475
9,0000	3,2000	5,1437	8,1737	9,0000	0,0000	0,0005
9,0000	3,3000	5,2574	8,4711	8,9997	-0,0003	-0,0030
9,0000	3,4000	5,3689	8,7837	8,9972	-0,0028	-0,0311
9,0000	3,5000	5,4782	9,0821	8,9998	-0,0002	-0,0026
9,0000	3,6000	5,5854	9,3635	9,0000	0,0000	-0,0002
9,0000	3,7000	5,6907	9,6538	8,9982	-0,0018	-0,0206
9,0000	3,8000	5,7939	9,9235	9,0031	0,0031	0,0345
9,0000	3,9000	5,8953	10,2296	8,9961	-0,0039	-0,0431
9,0000	4,0000	5,9949	10,4835	8,9987	-0,0013	-0,0144

Як видно із табл.4.3 – 4.5 відносна методична похибка даної методики не перевищує 0,08%.

4.3 Аналіз інструментальних та сумарних похибок приладу, який реалізує запропоновані методики вимірювання поверхневого натягу

Прилади, які використовуються для вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі, мають однакову будову (освітлювач, пристрій формування краплі, телевізійна система контролю – розділ 3). У даному випадку

не розглядається отримання тіньового зображення краплі за допомогою мікроскопа та проектування чи фотографування, оскільки такі способи застарілі і не забезпечують у першому випадку достатньої швидкості проведення вимірювання, а у двох інших – не дозволяють проводити вимірювання із високою точністю.

Схема накопичення сумарної похибки приладів для реалізації методу лежачої краплі та розробленого приладу ВПНО-1 для вимірювання поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів, який реалізує запропоновану методику (п.2.4.1), що передбачає визначення радіусів кривизни профілю лежачої краплі для довільної точки її поверхні у двох взаємно-перпендикулярних площинах та омболічній точці, наведена на рис. 4.3. Вона включає похибки від вимірювання густин досліджуваної рідини ρ_1 і оточуючого середовища ρ_2 , вказаних радіусів кривизни R_1 , R_2 , b та лінійних координат точок, що належать профілеві лежачої краплі x_i, y_i (де i – кількість точок, що отримуються у процесі виділення контуру).

У випадку існування залежності, що пов'язує вхідні і вихідні параметри процесу вимірювання поверхневого натягу рідин аналітично значення окремих складових $\Delta\sigma_i$ інструментальної похибки $\Delta\sigma_{instr.}$ диференціальним методом розраховують наступним чином:

$$\Delta\sigma_{instr.} = \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{l_i} = \frac{\partial\sigma}{\partial l_i} \Delta l_i, \quad (4.11)$$

де l_i – i -й аргумент згаданої залежності, який відповідає її певному вхідному параметрові; Δl_i – значення абсолютної похибки вимірювання i -го параметра; N – кількість параметрів.

Густина повітря становить $\rho_2 = 1,0014 \text{ кг/м}^3$ при 20°C [1]. Відхилення реальної густини повітря від довідникового значення є достатньо малим, що дозволяє не враховувати дану похибку. Однак при дослідженні поверхні розділу рідина-газ, що не є повітрям, необхідно враховувати густину цього газу з

достатнім ступенем точності (максимальна зведена похибка вимірювання не повинна перевищувати 0,5%). Отже, $\Delta\rho_2=0$.

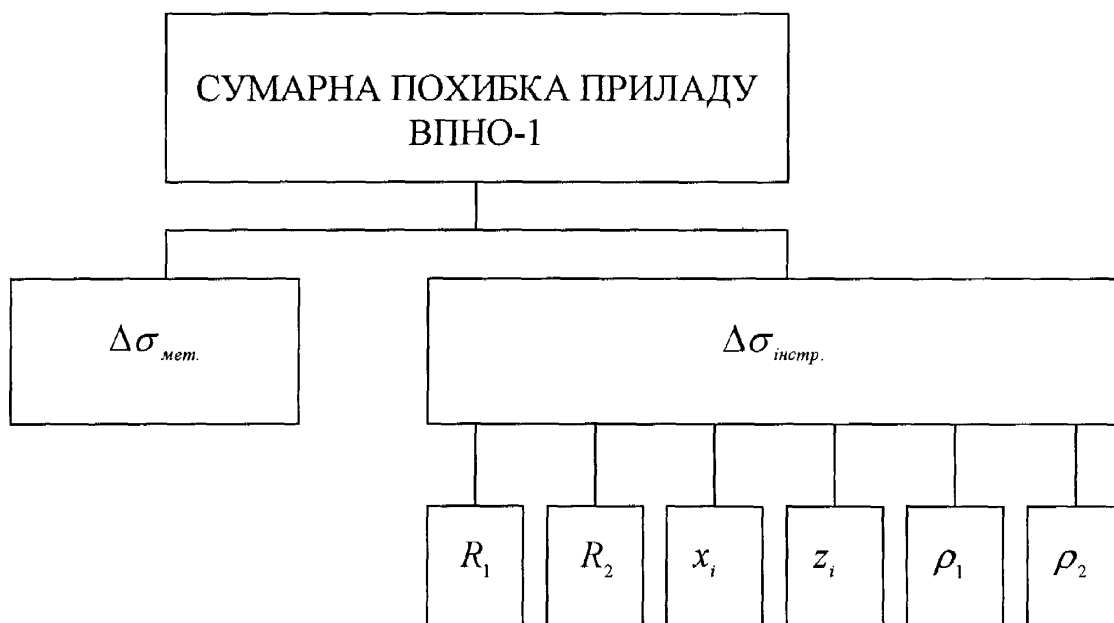


Рис. 4.3. Схема накопичення сумарної похибки приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі, який базується на вимірюванні радіусі кривизни капілярної поверхні

Точність визначення координат точок меридіанного перерізу краплі, що лежать на межі розділу рідина-повітря, визначається роздільною здатністю світло-електричного перетворювача (СЕП), який використовується для отримання зображення лежачої краплі.

Телевізійне зображення можна визначити як сукупність відліків сигналу з прив'язкою до координат мішені [94]. Освітленість пікселя характеризує значення відліку, а його координати визначають геометричні характеристики телевізійного зображення.

Розглянемо компоненти, які є основними джерелами похибок визначення геометричних характеристик телевізійного зображення.

Основними джерелами похибок СЕП є нерівномірність чутливості, фільтрація просторових частот, шуми самого перетворювача.

У [95] відзначається, що головними факторами, які впливають на роздільну здатність телевізійного засобу контролю є нерівномірність чутливості та фільтрація просторових частот.

При застосуванні телевізійних засобів контролю, як правило, приймають, що роздільна здатність у площині зображення визначається розмірами пікселя, тобто точність визначення геометричних характеристик телевізійного зображення обмежена лінійним розміром пікселя по відповідній координаті.

У [94] показано визначення роздільної здатності через функцію передачі модуляції та деякий пороговий рівень коефіцієнта передачі модуляції K_{II} . Для найбільш поширених у науковій практиці телевізійних засобів контролю на базі ПЗЗ шум СЕП описується нормальним законом розподілу [95]. Це пояснюється тим, що шумовий сигнал утворюється під впливом одночасної дії кількох незалежних факторів. Тому ймовірність реєстрації сигналу визначається наступним чином:

$$P(q_3 < q_1 - q_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{q_1 - q_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (4.12)$$

де q_1 – приведені значення сигналу $A(t)$ у момент часу t $A(t)/\sigma$; q_2 – приведені порогове значення A_{II}/σ ; q_3 – приведені шумове значення сигналу; z – випадкова величина; σ – середнє квадратичне значення шумового сигналу. Відповідно, умова реєстрації сигналу $q_3 < q_1 - q_2$. Аналіз виразу (4.12) [94] свідчить, що кількість ділянок, які можуть бути розрізнені у межах одного пікселя як окремі:

$$N = \frac{A_0}{3.2\sigma}, \quad (4.13)$$

де A_0 – максимальний сигнал, який формується пікселем при освітленості E_0 .

Таким чином, використання залежності вихідного сигналу пікселя від

співвідношення між більш освітленою і менш освітленою його ділянками дозволяє збільшити точність визначення координат без внесення змін у оптико-електронну схему приладу.

У [95] зазначено, що гранична похибка вимірювання координати сучасних ПЗЗ може бути зменшена до 1...2 мкм.

Задача виділення контуру лежачої краплі характеризується наступними особливостями: сигнал, сформований пікселом, лежить в межах від $A_{KP} = 35$ до фонового значення $A_{\phi} = 220$; значення A_{KP} , згідно із [94] перевищує середнє квадратичне шумового сигналу ПЗЗ-камери, тобто:

$$N = \frac{A_{\phi}}{3.2A_{KP}}. \quad (4.14)$$

Отже, виходячи із оцінки сигналу, сформованого у полі зору приладу, можна у межах пікселя з ймовірністю 0.99 [94] розрізнити 2 ділянки.

При лінійному розмірі пікселя 0.7 мкм прилад дозволяє розрізнити ділянку 5 мкм. Якщо ймовірність реєстрації зменшити до величини 0.90 (величина, прийнятна для даної задачі), кількість ділянок становить 3. Відповідно, мінімальна ділянка, яку можна розрізнити, становить 2,5 мкм.

Таким чином, можна записати, що $\Delta x = 2,5$ мкм, $\Delta z = 2,5$ мкм.

Знаходження значення поверхневого натягу рідини на межі розділу рідина – повітря проводиться згідно із формулою (2.22). З урахуванням (4.11) можемо записати:

$$\Delta\delta_{\text{онстр.}} = \frac{\partial\sigma}{\partial R_1} \frac{dR_1}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial R_2} \frac{dR_2}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial b} \frac{db}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 + \frac{\partial\sigma}{\partial z} \Delta z. \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial R_1} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 R_1^2}; \quad \frac{\partial\sigma}{\partial R_2} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 R_2^2}; \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial b} = \frac{-2(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 b^2}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}};$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \rho_1} = \frac{gz}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \rho_2} = \frac{gz}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}.$$

Значення R_1 , R_2 та b знаходяться шляхом апроксимації вхідного набору точок згладжуючим сплайном (вигляд полінома співпадає із звичайним кубічним сплайном) та обчислення за формулами (2.23, 2.23).

Назвемо функцію, що описує профіль лежачої краплі $Z_1(x)$. Тоді:

$$Z_1(x) = a_1 + c_1(x - x_1) + \frac{d_1}{2}(x - x_1)^2 + \frac{e_1}{6}(x - x_1)^3, \quad (4.17)$$

де a_1 , c_1 , d_1 , e_1 – коефіцієнти сплайна на відрізку, що включає точки з горизонтальними координатами x та x_1 (точка з координатою x – це точка, через яку проходять дві взаємно-перпендикулярні площини, у яких лежать вказані радіуси кривизни).

Тоді:

$$\frac{dZ_1}{dx} = c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2; \quad \frac{d_2 Z_1}{dx^2} = d_1 + e_1(x - x_1). \quad (4.18)$$

Таким чином, з урахуванням (2.23, 2.23) можна записати, що

$$R_1 = \frac{\left[1 + \left(c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2\right)^2\right]^{3/2}}{d_1 + e_1(x - x_1)}; \quad (4.19)$$

$$R_2 = \frac{x \left[1 + \left(c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2} e_1(x - x_1) \right)^2 \right]^{1/2}}{c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2} e_1(x - x_1)^2}. \quad (4.20)$$

Оскільки $\Delta R_1 = \frac{dR_1}{dx} \Delta x$ і $\Delta R_2 = \frac{dR_2}{dx} \Delta x$, запишемо

$$\Delta R_1 = \left[3 \frac{(1 + A^2) A (c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2} e_1(x - x_1)^2)}{d_1 + e_1(x - x_1)} - \frac{1}{2} \frac{(1 + A^2)^3 e_1}{(d_1 + e_1(x - x_1))^2} \right] \Delta x; \quad (4.21)$$

$$\Delta R_2 = \left[\frac{1}{2} \frac{1 + A^2}{A} + x(c + d(x - x_1) + \frac{1}{2} e(x - x_1)^2) - \frac{1}{2} \frac{x(1 + A^2)(c + d(x - x_1) + \frac{1}{2} e(x - x_1)^2)}{A^2} \right] \Delta x, \quad (4.22)$$

де $A = c_1(x - x_1) + \frac{1}{2} d_1(x - x_1)^2 + \frac{1}{6} e_1(x - x_1)^3$.

За аналогією з виразом (4.17) запишемо функцію $Z_2(x)$, що описує профіль лежачої краплі у омболічній точці (вершині)

$$Z_2(x) = a_2 + c_2(x - x_1) + \frac{d_2}{2}(x - x_1)^2 + \frac{e_2}{6}(x - x_1)^3, \quad (4.23)$$

де a_2, c_2, d_2, e_2 – коефіцієнти сплайна на відрізку, що включає точки з горизонтальними координатами $x = 0$ та x_1 . Тоді

$$\Delta b = \left[3 \frac{(1 + A^2)A(c_2 + d_2(x - x_1) + \frac{1}{2}e_2(x - x_1)^2)}{d_2 + e_2(x - x_1)} - \frac{1}{2} \frac{(1 + A^2)^3 e_2}{(d_2 + e_2(x - x_1))^2} \right] \Delta x, \quad (4.24)$$

$$\text{де } A = c_2(x - x_1) + \frac{1}{2}d_2(x - x_1)^2 + \frac{1}{6}e_2(x - x_1)^3.$$

З урахуванням того, що горизонтальна координата точки вершини $x = 0$, вираз (4.24) можна записати у вигляді

$$\Delta b = \left[3 \frac{(1 + A^2)A(c_2 + d_2x_1 + \frac{1}{2}e_2x_1^2)}{d_2 + e_2x_1} - \frac{1}{2} \frac{(1 + A^2)^3 e_2}{(d_2 + e_2x_1)^2} \right] \Delta x. \quad (4.25)$$

$$\text{При цьому } A = c_2x_1 + \frac{1}{2}d_2x_1^2 + \frac{1}{6}e_2x_1^3.$$

Для визначення інструментальної похибки приладу, що реалізує дану методику, необхідно розрахувати профіль лежачої краплі, що відповідає певному коефіцієнтові форми, виконати обчислення за виразами (4.17) – (4.25) знайти результат за (4.15). Розрахунки показують, що сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу запропонованою методикою розробленим приладом не перевищує 1,45%.

Один із можливих варіантів оцінки інструментальної похибки вимірювання поверхневого натягу рідин на основі значень екваторіального діаметра та площі верхньої частини краплі, обмеженої екваторіальним діаметром та вершиною краплі наступний.

Визначення площі верхньої частини лежачої краплі, обмеженої екваторіальним діаметром та вершиною краплі, здійснюється за допомогою формули Сімпсона.

ІІ можна записати у вигляді

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(d)dx \approx \frac{h}{6}(f_{i-1} + 4f_{i-1/2} + f_i), \quad (4.26)$$

де $i-1/2$ – індекс точки, що знаходиться між точками $i-1$ та i . Те ж саме можна подати, наприклад, за допомогою індексів 1, 2, 3. Тоді $i-1/2$ відповідатиме 2. h – крок інтегрування для випадку, коли він зберігає сталі значення. Розглядуване тут не характеризується сталістю h . У даному випадку h буде рівним відстані між 3 точками, що лежать підряд (рис. 4.4). Таким чином, для рис. $h = x_i - x_{i-1}$. Мінімальна відстань між точками з індексами $i-1$ та $i-1/2$ і $i-1/2$ та i становить Δx -величину, яка рівна роздільній здатності відеокамери. Вище зазначено, що для приладу ВПНО-1 $\Delta x = 2.5$ мкм.

Внаслідок існування похибки дискретизації відеозображення лежачої краплі можливі варіанти, коли горизонтальні координати точок з індексами $i-1$, $i-1/2$ та i або співпадатимуть (тоді $h=0$), або, навпаки, відстань між ними збільшуватиметься. Тоді $x_{i-1} = x_i - \Delta x$, $x_i = x_i + \Delta x$. Відповідно, у цьому випадку $h = 4\Delta x$. При цьому значення інтеграла буде рівним або 0, або

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(d)dx \approx \frac{4\Delta x}{6}(f_{i-1} + 4f_{i-1/2} + f_i). \quad (4.27)$$

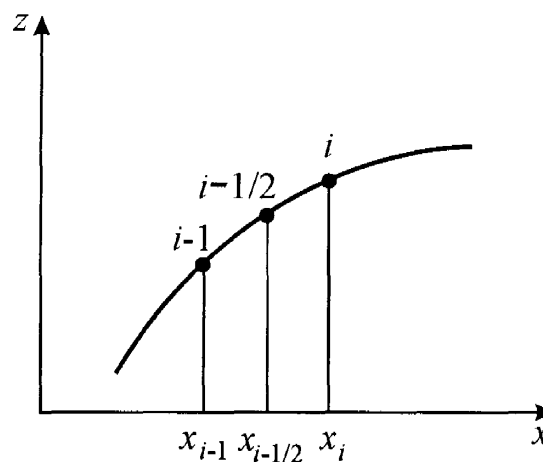


Рис. 4.4. Вимірювання площі лежачої краплі

Проте, оскільки відхилення відстаней між точками $i-1$ та $i-1/2$ і $i-1/2$ та

іносять випадковий характер, у підсумку вони компенсують одне одного, тому на результат обчислень у цілому похибка дискретизації у горизонтальному напрямі матиме незначний вплив, що дозволяє нехтувати нею.

З виразу (4.27) видно, що похибка вимірювання вертикальної координати важлива при визначенні площі меридіонального перерізу лежачої краплі і визначається похибкою дискретизації світлочутливої матриці. У приладі ВПНО-1, як було показано вище, Δz становить 2,5 мкм.

Оскільки $f_i = z_i$, з урахуванням Δz можна записати, що

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(d) dx \approx \sum_{i=0}^N \frac{h}{6} (f_{i-1} + \Delta z + 4(f_{i-1/2} + \Delta z) + f_i + \Delta z) \quad \text{або} \quad (4.28)$$

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(d) dx \approx \sum_{i=0}^N \frac{h}{6} (f_{i-1} - \Delta z + 4(f_{i-1/2} - \Delta z) + f_i - \Delta z). \quad (4.29)$$

Отже, неважко помітити, що похибка вимірювання вертикальної координати Δz викликатиме похибку визначення площі верхньої частини меридіонального перерізу лежачої краплі, обмеженої екваторіальним діаметром та вершиною краплі $\pm 2\Delta x \Delta z N$ (приймаючи до уваги, що $h = 2\Delta x$), де N – кількість точок контуру меридіонального перерізу краплі – 1. У середньому, якщо величина екваторіального діаметра лежачої краплі складає 90% відповідного розміру світлочутливої матриці (що диктується умовами ефективного її використання), кількість точок, що отримуються при виділенні контуру краплі, рівна ≈ 1000 .

Таким чином можна оцінити межі похибки вимірювання площі утвореної лежачої краплі: $\pm \Delta S = 2000\Delta x \Delta z = 2000 \cdot 0.0025\text{мм} \cdot 0.0025\text{мм} = 0.0125\text{мм}^2$. Необхідно пам'ятати, що ця величина напряму визначається розмірами краплі: більша крапля володітиме більшою накопиченою абсолютною похибкою вимірювання площі, ніж менша крапля, оскільки кількість точок, що отримуються у ході виділення контуру краплі, практично пропорційна її розмірам.

На рис. 4.5 показано можливі похибки визначення капілярної сталої за розробленою методикою внаслідок впливу похибки визначення екваторіального

діаметра лежачої краплі (рівний $\pm 2\Delta x$ – сума похибок квантування для двох крайніх точок діаметра).

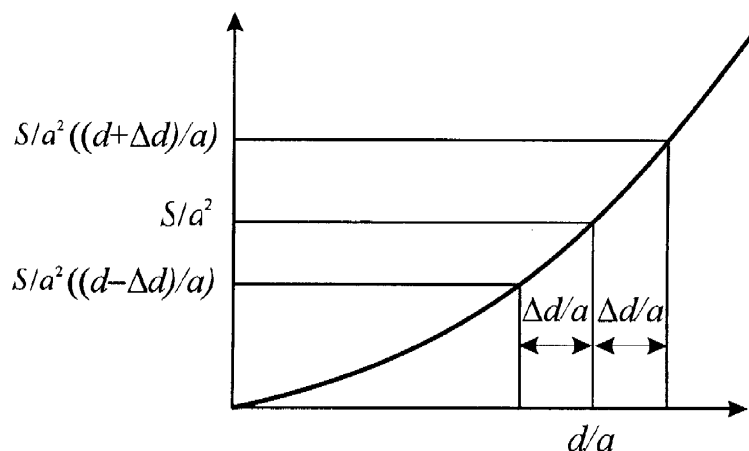


Рис. 4.5. Визначення інструментальної похибки приладу ВПНО-1

Для визначення інструментальної похибки вимірювання поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина-повітря методом лежачої краплі за запропонованою методикою необхідно задатися значенням $a^2 = 2 \div 10 \text{ мм}^2$ та відповідними значеннями радіуса кривизни капілярної поверхні у омболічній точці b такими, щоб $\beta = b^2 / a^2 = 0.1 \div 10$. Визначивши площу верхньої частини краплі S та її екваторіальний діаметр d у розмірних координатах, враховуючи значення a^2 , знаходимо d/a . З рис. 4.5 отримуємо відповідне значення S/a^2 .

Тепер візьмемо до уваги можливу похибку вимірювання екваторіального діаметра краплі $\pm \Delta d$ (рис. 4.5). Відповідно отримаємо ще два значення площі краплі у безрозмірних координатах $S/a^2((\Delta d + d)/a)$ та $S/a^2((-\Delta d + d)/a)$.

Маючи реальну (у даному випадку розраховану) площу верхньої частини лежачої краплі, легко знайти значення відхилень капілярної сталої, викликані похибкою вимірювання екваторіального діаметра.

Скориставшись визначеним абсолютним значенням похибки вимірювання площі верхньої частини краплі, оцінимо сумарний вплив $\pm \Delta S$ та $\pm \Delta d$ на шукане значення a^2 .

Очевидно, що максимальні відхилення a^2 від реального даватимуть

комбінації $-\Delta S$, $-\Delta d$ та ΔS , Δd .

Значення капілярної постійної знаходять наступним чином:

$$a_1^2 = (S - \Delta S)(S / a^2); \quad a_2^2 = (S + \Delta S)(S / a^2) \quad (4.30)$$

a_1^2 відповідає випадку негативних приростів $-\Delta S$, $-\Delta d$, a_2^2 – відповідно, додатнім приростам ΔS , Δd .

Розрахунок показує, що сумарна похибка вимірювання капілярної сталої (отже, і поверхневого натягу) за описаною методикою не перевищує 1,15%.

4.4. Розробка методики звірення похибки приладу ВПНО-1

Наявність приладу ВПНО-1 у заводській лабораторії чи у науково-дослідній організації дозволяє вирішувати питання, пов'язані із дослідженням поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів на межі контакту рідина (розчин) – повітря. Для оцінки реальних метрологічних характеристик і проведення звірення таких приладів достатньою є їхня метрологічна атестація, яка повинна включати процедуру проведення звірення приладу згідно із наведеними нижче методичними вказівками.

Важливим аспектом при проведенні звірення приладу ВПНО-1 є перевірка його похибки, яка згідно із наведеними метрологічними характеристиками не повинна бути більшою 1,45%, тобто клас точності приладу може бути визначений як 1,5.

Для визначення реальної похибки приладу ВПНО-1 необхідні проби зразкових атестованих рідин, для яких значення поверхневого натягу на межі контакту рідина-повітря відоме з похибкою, хоча б у 3 рази меншою за похибку вимірювання приладу і знаходиться у його робочому діапазоні. На даний час таких атестованих рідин немає (можна використовувати тільки дистильовану воду; значення її поверхневого натягу відоме і рівне 72.54 мН/м, проте воно

знаходиться у кінці діапазону робочих значень поверхневого натягу). Дану проблему рекомендується вирішувати шляхом виготовлення каліброваних, а у подальшому атестованих калібрів відповідної форми, за розмірами яких можна здійснювати визначення значення поверхневого натягу умовної рідини (оскільки виготовлення калібру із формою, що відповідає формі реальної краплі рідини у даних умовах – задача практично неможлива).

Матеріал, з якого виготовлятиметься калібр повинен мати відомий якомога менший коефіцієнт температурного розширення. Діаметр калібру та коефіцієнт його температурного розширення повинні бути атестованими органами Держстандарту України із загальною похибкою не більшою за 0.5 %.

Для виготовлення калібру можуть бути використані різні пластмаси, поліетилени тощо, які дозволяють виготовляти тіла вказаної форми.

Калібрів повинно бути не менше трьох з різними діаметрами. Наприклад: 1,5 мм, 2.0 мм, 2.5 мм. Тобто розміри калібру повинні бути такими, щоб відповідати реальним граничним розмірам краплі рідини у процесі росту.

Вказані калібри повинні періодично атестуватися, мати як відповідні нормативні документи для проведення їхньої атестації, так і підтверджуючі їхній клас точності, а також повинні зберігатися у відповідності із технічними умовами. Крім того, у атестаті на кожний калібр повинна бути вказана залежність зміни лінійних розмірів калібру від температури оточуючого середовища при зміні її від 15°C до 50°C через 1°C або коефіцієнт температурного розширення матеріалу, з якого виготовлено зразок.

Кожний із калібрів повинен також супроводжуватися атестованими значеннями умовного поверхневого натягу на межі контакту із повітрям.

Процес звіряння похибки приладу ВПНО-1 за допомогою вказаних калібрів повинен відбуватися наступним чином.

Процес підготовки приладу до початку вимірювань відбувається аналогічно, як і у випадку проведення досліджень значення поверхневого натягу реальної рідини.

Каліброване тіло необхідно помістити у місце утворення лежачої краплі.

Після цього вмикають прилад і проводять вимірювання геометричних параметрів “краплі” відповідно із вибраною методикою (за значеннями радіусів кривизни чи за площею та екваторіальним діаметром). Під час проведення вимірювань калібр повинен перебувати у полі зору телевізійної системи контролю і займати приблизно 90% ефективного розміру світлочутливої матриці.

Після цього вмикають режим визначення поверхневого натягу за отриманими геометричними параметрами.

Аналогічні вимірювання проводять для інших калібрів.

Порівнюють значення умовного поверхневого натягу із градувальними для кожного із калібрів з урахуванням температури навколишнього середовища і на основі такого порівняння оцінюють похибку приладу ВПНО-1.

На основі отриманих результатів роблять висновок щодо відповідності похибки приладу ВПНО-1 її нормованому значенню.

Висновки до розділу

Аналізуючи приведені в 4-ому розділі результати метрологічного аналізу відомих і розглянутої методик контролю МН рідин методом обертової краплі, а також приладів, які реалізують ці методики контролю можна зробити такі висновки:

а) проведено аналіз існуючої методики вимірювання поверхневого натягу рідин Дорсі. Методична похибка методики Дорсі становить 1% і більше у реальному діапазоні зміни капілярної постійної. Зроблено висновок про доцільність використання методики Дорсі для вимірювання поверхневого натягу розплавів металів, а не рідин та їхніх розчинів;

б) розроблена методика визначення методичної похибки розробленої методики вимірювання ПН рідин методом лежачої краплі, що передбачає визначення радіусів кривизни капілярної поверхні для довільної точки профілю та у вершині краплі;

в) розроблена методика визначення методичної похибки розробленої

методики вимірювання ПН рідин методом лежачої краплі, що передбачає визначення площі верхньої частини профілю лежачої краплі, обмеженої екваторіальним діаметром та вершиною краплі і цього діаметра.

г) проведений аналіз складових інструментальних та сумарних відносних похибок приладів, які реалізують методики контролю ПН методом лежачої краплі. Сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу з використанням значень радіусів кривизни на перевищує 1,45%, а у випадку використання значень площі меридіанного перерізу краплі та її екваторіального діаметра сумарна похибка на перевищує 1,15%.

РОЗДІЛ 5

ЛАБОРАТОРНІ І ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ВПНО-1 ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ

Розроблений і описаний в 3-ому розділі прилад ВПНО-1 необхідно перевірити на відповідність метрологічним характеристикам згідно з 4-им розділом, визначити сферу його ефективного застосування. Крім цього необхідно розробити методику підбору ПАР і їхньої концентрації у розчинах для різних технологічних процесів за допомогою приладу ВПНО-1, провести лабораторні і промислові випробування з метою оцінки працездатності приладу і ефективності отриманих результатів з його використанням.

Вказане дозволить користувачам приладів ВПНО-1 ефективно використовувати його як для проведення досліджень щодо розробки якісних за відповідними показниками ПАР, так і для визначення компонентів розчинів цих ПАР з врахуванням умов їх використання (температури, реального часу існування межі контакту фаз, впливу об'ємів рідких фаз тощо).

Вищезгадане є предметом досліджень даного розділу.

5.1. Проведення лабораторних випробувань приладу ВПНО-1 і аналіз отриманих результатів

Метою лабораторних випробувань приладу ВПНО-1 є експериментальна оцінка вказаних в 4-ому розділі метрологічних характеристик приладу з врахуванням умов роботи приладу. До основних характеристик приладу ВПНО-1, які необхідно експериментально перевірити, слід віднести такі:

відносна похибка, %	1,45
діапазон вимірювання ПН, мН/м	20...72,5
температурний діапазон контролю МН, °С	від кімнатної до +60

тривалість безперервної роботи, год., не менше 8.

При проведенні вимірювання ПН використовувалися такі рідини: Жиринокс, Ріпокс-6, Мирол-1. При цьому ПН вимірювався приладом ВПНО-1 на межі контакту розчин–повітря. Вимірювання значення ПН на вказаних межах контакту приладом ВПНО-1 здійснювалося згідно з методикою, яка описана в п. 3.5. Результати вимірювань поверхневого натягу водних розчинів ПАР наведені у табл. 5.1. При проведенні лабораторних досліджень готувалися водні розчини поверхнево-активних речовин та розчини із газовим конденсатом. На рис. 5.1 показано залежності зміни поверхневого натягу газоконденсатних розчинів ПАР.

Для перевірки верхньої межі діапазону вимірювання використовувалася дистильована вода із поверхневим натягом на межі розділу вода–повітря 72,54 мН/м.

Таблиця 5.1.

Залежність ПН водного розчину ПАР від концентрації ПАР при 20°C

Концентрація, %	Жиринокс	Ріпокс-6	Мирол-1
2	58,12 мН/м	35,45 мН/м	47,34 мН/м
2,5	56,34 мН/м	34,7 мН/м	45,23 мН/м
3	55,65 мН/м	33,2 мН/м	43,12 мН/м
3,5	53,37 мН/м	32,54 мН/м	42,38 мН/м
4	52,93 мН/м	32,14 мН/м	40,25 мН/м
4,5	52,16 мН/м	32,02 мН/м	40,23 мН/м
5	52,13 мН/м	32,00 мН/м	40,20 мН/м
5,5	52,22 мН/м	32,00 мН/м	40,15 мН/м
6	52,05 мН/м	32,00 мН/м	40,11 мН/м

Аналізуючи дані табл. 5.1 можна відзначити, що існує залежність між концентрацією поверхнево-активної речовини у розчині і поверхневим натягом

цього розчину. Залежність спостерігається до певної межі концентрації, різної для різних ПАР. Подальше збільшення концентрації не змінює значення поверхневого натягу розчину.

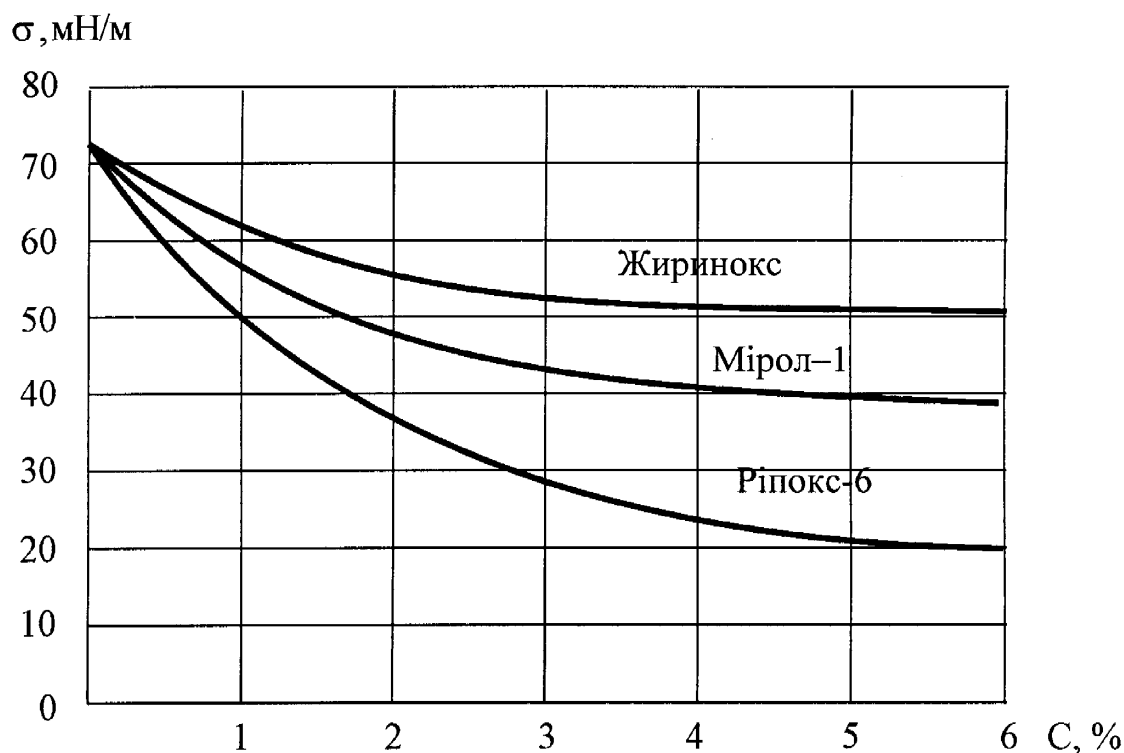


Рис.5.1. Залежність поверхневого натягу розчинів ПАР від їхньої концентрації при 20 °С. Розчинник – газовий конденсат

З метою перевірки теоретично встановленого класу точності приладу ВПНО-1 були проведені багатократні вимірювання поверхневого натягу дистильованої води та розчинів ПАР. Результати вимірювань наведено у табл. 5.2. На рис. 5.2 представлено зображення лежачої краплі води на екрані комп'ютера.

Таблиця 5.2.

Результати лабораторних вимірювань поверхневого натягу при 20°С, мН/м

№ п/п	Дистил. вода	Жиринокс, 3%	Ріпокс-6, 3%
1	72,56 мН/м	54,94 мН/м	32,96 мН/м
2	72,47 мН/м	54,78 мН/м	33,03 мН/м
3	72,49 мН/м	54,64 мН/м	32,96 мН/м

№ п/п	Дистил. вода	Жиринокс, 3%	Ріпокс-6, 3%
4	73,04 мН/м	54,51 мН/м	32,93 мН/м
5	72,10 мН/м	54,50 мН/м	32,97 мН/м
6	72,17 мН/м	55,06 мН/м	33,01 мН/м
7	72,73 мН/м	55,42 мН/м	32,96 мН/м
8	73,05 мН/м	54,64 мН/м	33,04 мН/м
9	72,99 мН/м	54,64 мН/м	33,04 мН/м
10	71,94 мН/м	55,15 мН/м	32,93 мН/м
11	72,90 мН/м	55,52 мН/м	33,00 мН/м
12	73,06 мН/м	55,10 мН/м	32,98 мН/м
13	72,01 мН/м	54,98 мН/м	33,05 мН/м
14	72,94 мН/м	55,30 мН/м	33,02 мН/м
15	72,16 мН/м	55,13 мН/м	32,94 мН/м
16	72,65 мН/м	54,52 мН/м	33,03 мН/м
17	73,07 мН/м	55,47 мН/м	33,04 мН/м
18	72,49 мН/м	55,45 мН/м	32,95 мН/м
19	73,04 мН/м	54,83 мН/м	33,05 мН/м

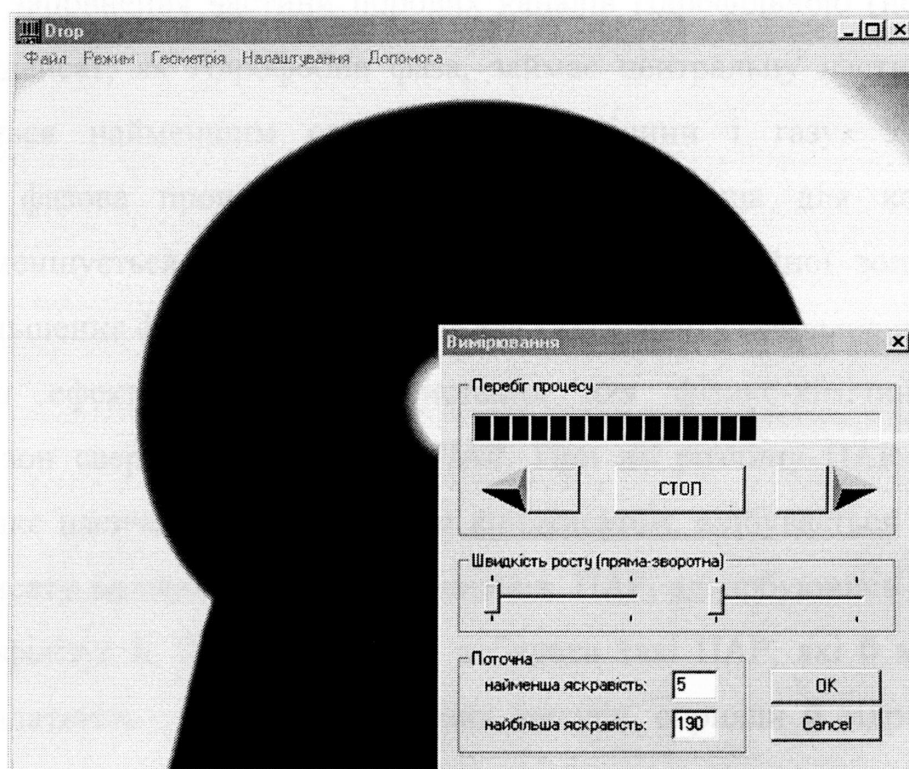


Рис. 5.2. Зображення краплі дистильованої води на екрані ПК у процесі вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі

При цьому поверхневий натяг дистильованої води становив $72,62 \pm 0,39$ мН/м; 3%-го розчину Жириноксу: $54,98 \pm 0,34$ мН/м; 3%-го водного розчину Ріпоксу-6: $32,99 \pm 0,40$ мН/м. Отже, прилад зберігає точність вимірювання поверхневого натягу у робочому діапазоні σ .

5.2. Методика підбору поверхнево-активних речовин і їхніх концентрацій для обробки привибійних зон нафтових свердловин з використанням приладу ВПНО-1

Ефективним методом підвищення продуктивності газоконденсатних свердловин в умовах випадання з газу і накопичення у привибійній зоні вуглеводневого конденсату є проведення фізико-хімічних обробок. Суть їх полягає в очищенні пористого середовища від вуглеводневої рідини, гідрофілізації поверхні порових каналів і заповненні частини пор, об'єм яких відповідає критичній (нерухомій) конденсатонасиченості, рідиною з нейтральною змочуваністю чи гідрофільною рідиною. В умовах гідрофільного пористого середовища і заповнення частини порових каналів гідрофільною (нейтральною) рідиною, конденсат, як гідрофобна фаза, займає центральну частину пор, що характеризується найменшим опором рухові рідини і газу. У результаті збільшується фазова проникність пористого середовища для конденсату і відповідно зменшується насиченість конденсатом привибійної зони, що приводить до збільшення фазової проникності для газу і дебіту свердловини.

Найбільш ефективним є використання для фізико-хімічних обробок привибійних зон свердловин розчинів ПАР. При дії розчину ПАР на пористе середовище, яке насичене вуглеводневим конденсатом, відбувається руйнування плівки конденсату на поверхні порових каналів. ПАР, адсорбуючись на поверхні породи, гідрофілізує її. При цьому слід вибирати такі ПАР, які б мали високу адсорбційну здатність на поверхні порових каналів, сприяли її гідрофілізації, а при поступовому винесенні з привибійної зони у процесі експлуатації свердловини спінювали вуглеводневий конденсат.

З метою ефективного використання ПАР в різних технологічних процесах

необхідно правильно здійснювати їх вибір, а також визначати необхідну концентрацію у розчині з тим, щоб значення поверхневого натягу на межі розділу розчина-оточуючий газ (повітря) було мінімальним а подальше збільшення концентрації ПАР у розчині вже не приводило до зменшення ПН.

Вказане може бути виконаним з використанням приладу ВПНО-1. Для цього готують проби розчинів одного із наявних ПАР з концентраціями активної маси в розчині від 2% до 6% (2%; 2,5%; 3,0%; 3,5% 4,0%; 5,0%, 5,5%, 6%) в кількості по 30 мл кожного. За основу розчину використовують ту рідину, на базі якої передбачається готувати промисловий розчин ПАР.

Аналогічно вищенаведеному готують по вісім розчинів інших ПАР, а також їхніх композицій, розчини з використанням яких також можуть використовуватися в даному технологічному процесі, наприклад для закачування в нафтоносні пласти для збільшення нафтовилучення з них, для обробки привибійних зон експлуатаційних свердловини тощо.

Вмикають прилад ВПНО-1 і згідно з інструкцією з його експлуатації здійснюють підготовку його до роботи.

Вимірювання поверхневого натягу і раціональний вибір компонентів та їхніх оптимальних концентрацій у розчинах здійснюють таким чином.

За допомогою приладу ВПНО-1 здійснюють вимірювання поверхневого натягу на межі розділу між приготованими водяними чи газоконденсатними розчинами різних ПАР даних концентрацій з повітрям. Вимірювання проводять згідно інструкції по експлуатації приладу ВПНО-1. Рекомендується вимірювання поверхневого натягу починати з розчину одного із ПАР з найменшою концентрацією. Це не вимагає подальшої детальної промивки вимірювального капіляру приладу ВПНО-1 при його наступному заповненні розчином даного ПАР більшої концентрації.

На основі результатів отриманих значень ПН будують графічні залежності поверхневого натягу від концентрації кожного ПАР у розчині. За оптимальну концентрацію даного ПАР або їх композицій в розчині вибирають ту концентрацію, перевищення якої вже не призводить до зменшення ПН.

Аналогічно будують графічні залежності ПН від концентрації для всіх інших розчинів ПАР і їх композицій. Для кожного із цих розчинів ПАР, а також їх композицій визначають аналогічно вищеописаному оптимальну концентрацію ПАР в розчині.

За найбільш ефективний ПАР для приготування розчину з його використанням вибирають такий ПАР чи композицію, розчин з яким має найменше значення ПН.

5.3. Аналіз результатів впровадження приладу ВПНО-1

У результаті розробки методики вибору виду ПАР і його концентрації у розчинах, яка була описана в п. 5.2, було здійснено використання приладу ВПНО-1 для приготування і вимірювання ПН розчинів ПАР в ГПУ “Полтавагазвидобування” з метою підвищення ефективності використання ПАР для обробок привибійних зон продуктивних свердловин.

Вказані зони свердловин можуть мати потужність від 0,5 до 20 м і більше і є кінцевою ділянкою перед поступленням пластового флюїду (нафти, води і газу) на вибій експлуатаційної нафтової свердловини. Внаслідок того, що в цій зоні швидкість руху пластового флюїду більша від швидкості руху цього флюїду в глибині пласта, температура тут дещо нижча, ніж температура в пласті. Це приводить до випадання асфальто-смолистих компонентів із нафти на поверхню пор пласта і, таким чином, до закупорювання прохідних капілярів, щілин тощо. Крім цього, в результаті буріння свердловин в цій же зоні є значна кількість дрібних і інших механічних частинок (вибуреної породи, основи глинистого розчину тощо), які також чинять відповідний гідравлічний опір руху пластового флюїду до вибою. Правильно підібрані розчини ПАР при пластовій температурі можуть здійснювати відповідну миючу дію з метою вилучення вказаних відкладів із стінок породи привибійної зони.

Якість миючих реагентів визначається кутом змочування миючого реагенту поверхні породи пласта на межі контакту із пластовим флюїдом. Чим меншим є

цей кут змочування, тим краще відбувається відмив поверхні породи пласта від різних налипань на ній. З другого боку вказаний кут залежить від ПН на межі контакту розчину рідини із повітрям. Чим меншим буде ПН, тим меншим буде кут змочування. Тому в даному випадку ПН є важливим параметром, який дозволяє контролювати якість розчинів ПАР, які використовуються для обробок (очистки) привибійних зон продуктивних пластів експлуатаційних нафтових свердловин.

Упродовж періоду з 02.11.2002р. по 30.04.2003р. були проведені науково-дослідні роботи по вибору типу поверхнево-активних речовин і їхніх концентрацій у розчинах для проведення обробок привибійних зон нафтових експлуатаційних свердловин №111 і №500 Яблунівського нафтогазо-конденсатного родовища (НГКР), №209 Більського НГКР і №57 Чутівського НГКР. У процесі проведення експериментальних досліджень використовувався газовий конденсат як основа розчину для проведення обробок, а також проби таких ПАР: Мірол-1, Жиринокс і Ріпокс-6. Вибір типу ПАР і його концентрації у розчинах газового конденсату здійснювався за допомогою приладу для вимірювання поверхневого натягу ВПНО-1. У процесі проведення досліджень готувалися такі концентрації вказаних вище ПАР у газовому конденсаті: 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%.

На основі отриманих залежностей вимірюного за допомогою приладу ВПНО-1 поверхневого натягу від концентрації вказаних ПАР у газовому конденсаті для проведення обробок найбільш оптимальним є ПАР типу Ріпокс-6, оскільки розчини з ним при відповідних концентраціях мають найнижчий поверхневий натяг на межі контакту із повітрям (22-28 мН/м), який є майже у два рази меншим, ніж для інших вказаних ПАР.

За оптимальну концентрацію Ріпоксу-6 у газовому конденсаті для проведення обробок привибійних зон свердловин №111, 57, 209, 500 вибрано концентрацію 5%, оскільки при подальшому збільшенні концентрації Ріпоксу-6 у газовому конденсаті поверхневий натяг такого розчину практично не зменшується і подальше додавання Ріпоксу-6 у розчин газового конденсату вже не веде до

отримання кращого результату від проведення обробки ним привибійних зон нафтових свердловин.

У табл. 5.3 наведено результати промислових досліджень приладу ВПНО-1 при 20°C.

Таблиця 5.3.

Залежність ПН розчині ПАР у газовому конденсаті від концентрації ПАР

Концентрація, %	Жиринокс	Ріпокс-6	Мирол-1
2	58 мН/м	30 мН/м	47 мН/м
2,5	55 мН/м	27 мН/м	45 мН/м
3	53 мН/м	26 мН/м	40 мН/м
3,5	52 мН/м	25 мН/м	37 мН/м
4	50 мН/м	24 мН/м	36 мН/м
4,5	49 мН/м	23 мН/м	35 мН/м
5	48 мН/м	22 мН/м	35 мН/м
5,5	48 мН/м	22 мН/м	35 мН/м
6	48 мН/м	22 мН/м	35 мН/м

У табл.5.4 наведено результати вимірювання поверхневого натягу при температурі 40°C, а у табл. 5.5 – результати проведення аналогічного дослідження при 60°C. Хані свідчать про наявність існування температурного градієнта поверхневого натягу.

Проведення робіт підтверджено Актом впровадження результатів науково-дослідних робіт по темі №243/01 (додаток И).

Слід зазначити, що проведення досліджень впливу концентрації ПАР на поверхневий натяг розчину слід проводити із розчинником, узятим з того родовища, на якому планується проводити використання даного розчину.

Використання проб інших розчинників може привести до невірних результатів і в результаті до зниження ефективності використання ПАР.

Таблиця 5.4.

Залежність ПН розчині ПАР у газовому конденсаті
від концентрації ПАР при температурі розчину 40°C

Концентрація, %	Жиринокс	Ріпокс-6	Мирол-1
2	56,53 мН/м	29,45 мН/м	46,23 мН/м
2,5	54,34 мН/м	28,78 мН/м	44,45 мН/м
3	52,17 мН/м	27,23 мН/м	39,13 мН/м
3,5	51,45 мН/м	24,19 мН/м	38,67 мН/м
4	49,43 мН/м	23,25 мН/м	37,32 мН/м
4,5	48,23 мН/м	22,73 мН/м	34,16 мН/м
5	47,34 мН/м	21,23 мН/м	34,15 мН/м
5,5	46,28 мН/м	21,21 мН/м	34,14 мН/м
6	45,15 мН/м	21,20 мН/м	34,10 мН/м

Таблиця 5.5.

Залежність ПН розчині ПАР у газовому конденсаті
від концентрації ПАР при температурі розчину 60°C

Концентрація, %	Жиринокс	Ріпокс-6	Мирол-1
2	55 мН/м	29 мН/м	46 мН/м
2,5	52 мН/м	28 мН/м	44 мН/м
3	48 мН/м	25 мН/м	39 мН/м
3,5	48 мН/м	24 мН/м	38 мН/м
4	47 мН/м	23 мН/м	35 мН/м
4,5	46 мН/м	22 мН/м	34 мН/м
5	45 мН/м	21 мН/м	34 мН/м
5,5	45 мН/м	21 мН/м	34 мН/м
6	45 мН/м	21 мН/м	34 мН/м

Висновки до розділу

Наведені у даному розділі результати можна звести до таких основних висновків:

а) проведено експериментальну перевірку теоретично встановленого класу точності приладу ВПНО-1 шляхом здійснення багатократних вимірювань поверхневого натягу розчинів ПАР та дистильованої води. Результати свідчать, що похибка вимірювань зростає при зменшенні вимірюваних значень поверхневого натягу, але не перевищує 1,45%.

б) розроблено методику підбору ПАР і їхніх концентрацій у розчинах, суть якої полягає у проведенні вимірювання поверхневого натягу на межі розділу розчин – оточуюче повітря. Найбільш ефективним слід вважати таку поверхнево-активну речовину і її концентрацію у розчині, при якій значення поверхневого натягу розчину мінімальне і не зменшується при подальшому збільшенні концентрації ПАР у ньому;

в) описані результати використання приладу ВПНО-1 для приготування розчинів ПАР у газовому конденсаті з метою обробки ним привибійних зон нафтових експлуатаційних свердловин ГПУ “Полтавагазвидобування”. Отримано залежності зміни поверхневого натягу розчинів ПАР у газовому конденсаті від концентрації ПАР та визначено за розробленою методикою з використанням приладу ВПНО-1 тип ПАР з відповідною концентрацією, при якій за даних умов досягається мінімальне значення поверхневого натягу розчину на межі контакту з повітрям: це – 5% розчин Ріпокс-6 (поверхневий натяг розчину становить 22–28 мН/м).

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проаналізовано відомі методики (Н. Дорсі, Ю. М. Іващенко та В. Н. Єрьоменка, В. І. Мелік-Гайказяна та В. В. Ворончіної, К. Ліонса, І. Елбінга, І. Вільсона (Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R.) і прилади для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом лежачої краплі. У ході проведеного аналізу виявлено недоліки вказаних методик і приладів та визначено напрям досліджень.

2. Розроблено математичний опис процесу утворення лежачої краплі рідини на горизонтальній пластині з однорідним змочуванням або на верхньому торці вертикально встановленого ножового капіляра при вимірюванні поверхневого натягу, на основі якої можна розрахувати геометричні розміри лежачої краплі рідини у залежності від її фізико-хімічних параметрів;

3. Розроблено і теоретично обґрунтовано методику визначення поверхневого натягу рідини, яка базується на вимірюванні радіусів кривизни поверхні лежачої краплі у взаємно-перпендикулярних площинах для довільної точки, що належить профілю краплі, та у її вершині;

4. Розроблено і теоретично обґрунтовано методику вимірювання поверхневого натягу рідини, яке базується на вимірюванні екваторіального діаметра та площі профілю верхньої частини лежачої краплі, обмеженої цим діаметром і вершиною краплі;

5. Розроблено і теоретично обґрунтовано принцип оцінки методичних похибок відомих і розроблених методик вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі.

6. Розроблено прилад ВПНО-1 і відповідне програмне забезпечення для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом лежачої краплі згідно з удосконаленими методиками вимірювання;

7. Здійснена оцінка інструментальної і сумарної похибок приладу ВПНО-1. Показано, що сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу не перевищує 1,5%;

8. Розроблена методика звіряння (півірки) приладу ВПНО-1 з використанням еталонних рідин і атестованих твердих тіл з відповідною формою їхніх поверхонь;

9. Розроблено методику підбору ПАР і їхньої концентрації у розчинах за допомогою приладу ВПНО-1 у залежності від функціонального призначення цих розчинів;

10. Результати проведення вимірювань поверхневого натягу приладом ВПНО-1 впроваджені з метою вибору концентрації ПАР типу Ріпокс-6 у розчинах для обробки привибійних зон нафтових свердловин у ГПУ “Полтавагазвидобування”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей: Пер. с англ. / Под ред. З. М. Зорина, В. М. Муллера. — М.: Мир., 1979. — 568с.
2. Межфазная тензиометрия /А. И. Русанов, В. А. Прохоров. — СПб: Химия, 1994. — 400с.
3. Іващенко Ю. М., Єрьоменко В. Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів металів за методом лежачої краплі. — К.: Наукова думка, 1972., іл.
4. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. — М.: Химия, 1964.
5. Кондрат Р. М., Марчук Ю. В., Височанський З. М., Кондрат О. Р., Лилак М. М., Манюк С. В. Використання поверхнево-активних речовин для фізико-хімічних обробок привибиїних зон газоконденсатних свердловин // Матер. н/т конф. “Підвищення ефективності використання поверхнево-активних речовин в нафтогазовидобутку”. – Івано-Франківськ, ФІДТУНГ. – 2000. – С. 5 – 8.
6. Паддей. Дж. Ф., Питт А. Р. // Поверхностные силы в тонких пленках / Под ред. Дерягина Б. В. М.: Наука, 1979. С. 173 – 179.
7. Furlong D. N., Hartland S. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 1. 1980. V. 76, №3. P. 457–466.
8. Furlong D. N., Hartland S. // ibid. Ser. 1. 1980. V.76. №3. P. 467 – 472.
9. Huh C., Mason S. G. // Can. J. Chem. 1976. V. 54, №6. P. 969 – 978.
10. Bayramli E., Huh C., Mason S. G. // Can. J. Chem. 1978. V. 56, №6. P. 818 – 823.
11. Princen H. M. // Surface and colloid science. V. 2 / Ed. By Matijevich E., Eirich F. R. N. Y.: Wiley, 1969. P. 1 – 84.
12. Porter A. W. // Phil. Mag. Ser. 7. 1933. V. 15, №96. P. 163-170.
13. Dorsey N. E. // J. Washington Acad. Sci. 1928. V. 18, №19. P. 505-509.
14. Bashfort F., Adams J. C. An attempt to test the theories of capillary action. Cambridge: University Press, 1883. 140p.

15. Kozakevitch P., Schatel S., Urbain G., Sage M. // *Rev. Metallurg.* 1955. V. 52, №2. P. 139-160.
16. Иващенко Ю. Н., Богатыренко Б. Б., Ерёменко В. Н. // *Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии* / Под ред. Ерёменко В. Н. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. С. 391 — 417.
17. Мелик-Гайказян В. И., Ворончихина В. В. // *Изв. Томск. Политех. Ин-та.* 1966. Т. 151. С. 46-51.
18. Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 2.* 1985. V. 81, №3. P. 327 — 339. Turner T. // *J. Inst. Metals.* 1921. V. 26, №2. P. 5 — 43.
19. Anastasiadis S. H., Chen J.-K., Kobershtein J. T. Et al. // *J. Colloid Interface Sci.* 1987. V. 119, №1. P. 55 — 56.
20. Rotenberg Y., Boruvska L., Neumann A. W. // *Ibid.* 1983. V. 93, №1. P. 169—183.
21. Jennings J. W., Pallas N. R. // *Langmuir.* 1988. V. 4. P. 959 — 967.
22. Nguyen D. C., McKinnon I. R., Wilson I. R. // *ibid.* 1987. V. 119, №1. P. 275 — 276.
23. Patterson R. E., Ross S. // *Surface Sci.* 1979. V. 81. 1979, №2. P. 451 — 463.
24. Chivetwlu C. I., Hornof V., Neale G. H. // *J. Colloid Interface Sci.* 1988. V. 125, №2. P. 586 — 601. Babu S. R. // *J. Phys. Chem.* 1986. V. 90, №18. P. 4337 — 4340.
25. Ambwani D. S., Harrison Y. // *Surface and colloid science.* V. 11 / Ed. By Good R. J., Stromberg R. R. N. Y.: Plenum Press. 1979. P. 93 — 119.
26. Huh C., Reed R. L. // *Colloid Interface Sci.* 1983. V. 91, №2. P. 472 — 484. Andreas J. M., Hauser E. A., Tucker W. B. // *J. Phys. Chem.* 1938. V. 42, #8. P. 1001 — 1019.
27. Boyce J. F., Schurch S., Rotenberg Y., Neumann A. W. // *Colloids Surf.* 1984. V. 9, №4. P. 307 — 317.
28. Vos H., Los J. M. // *J. Colloid Interface Sci.* 1980. V. 74, №2. P. 360 — 369.
29. Муравський Л. І., Кулинич Я. П., Максименко О. П., Вороняк Т. І. Розробка телевізійної оптико-цифрової системи для визначення капілярних

- характеристик розплавів // *Методи та прилади контролю якості*. – 2001. – №7. – С. 36 – 42.
30. Pallas N. R., Harrisison Y. // *Colloids Surf.* 1990. V. 43, №2/4. P. 169 – 194.
31. Горелов В. О., Кісіль І. С. Вибір методу для вимірювання динамічного поверхневого натягу. – *Методи і прилади контролю якості*. – 2000. – №5. – С. 92-99.
32. Горелов В. О., Кісіль І. С. Використання відеотехніки для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі. – *Методи і прилади контролю якості*. – 2000. – №6. – С. 37-39.
33. Горелов В. О. Способи апроксимації меридіональних перерізів капілярних поверхонь при визначенні поверхневого натягу методом лежачої краплі. // *Методи і прилади контролю якості*. – 2001. – №7. – С. 43-46.
34. Горелов В. О. Шляхи підвищення точності визначення поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі. // *Методи і прилади контролю якості*. – 2002. – №8. – С. 47-50.
35. Горелов В. О., Кісіль І. С. Вибір методики сегментації капілярних поверхонь при визначенні поверхневого натягу на границях розділу фаз. // *Міжнародний н/т журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”*. – 2001. – №8. – С. 55-58.
36. Горелов В. О., Кісіль І. С. Процес утворення лежачої краплі та вимірювання поверхневого натягу рідин однойменним методом. // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2002. – №460. – С. 109-114.
37. Горелов В. О., Кісіль І. С. Застосування оптичної телевізійної системи для визначення поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі. // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. – 2002. – №24. – С. 53-56.
38. Горелов В. О. Спосіб визначення поверхневого натягу рідин на межі розділу рідина-повітря. // *“Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”*. Збірник наукових праць. – 2002. – №8. т. 1. – С.117-119.

39. Горелов В. О., Кісіль І. С. Вимірювання поверхневих властивостей на границях розділу фаз. // Матер. н/т конференції “Підвищення ефективності використання поверхнево-активних речовин в нафтогазовидобутку”. – Івано-Франківськ, ІФДТУНГ. – 2000. С. 119-122.
40. Горелов В. О., Кісіль І. С. Прилад для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів методом лежачої краплі. // Матер. н/т конференції “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання”. – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. – 2002. С. 98-100.
41. Методика вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі. // Матер. н/т конференції професорсько-викладацького складу. Івано-Франківськ, ІФДТУНГ. – 2000. – С.18-20.
42. Пат 48429А Україна, МКИ G01N12/02. Спосіб визначення поверхневого натягу і пристрій для його реалізації / Горелов В. О., Кісіль І. С. – №2001075192; заявл. 20.07.2001; опубл. 15.08.2002, Бюл. №8.
43. Chavepeyer G., Salajan M., Flatten J. K. Ph. Smet. Interfacial Tension and Surface Adsorption in i-Heptano/Water Systems // J. Colloid Interface Sci. - 1995. - Vol. 174.-№ 1.-P. 112-116. Пат. 4,886,120 США, МКИ E21B 043/22. Process for secondary oil recovery utilizing propoxylated ethoxylated surfactants in seawater / Shupe R. D. (США); Conoco Inc.-№ 305306; Заявл. 01.02.1989; Опубл. 12.12.1989. НКІ 166/273,275,305.1 252/8.554-5 с.
44. Пат. 4,569,226 США, МКИ GO IN 013/02. Automated Interfacial Tensiometer / Matteson M. J. (США); Georgia Tech. Research Institute. - № 606289; Заявл. 02.05.1984; Опубл. 11.02.1986. НКІ 73/64.4 324/71.1, 71.4, 452, 453, 457, 458,61 R 377/10.-7 с.
45. Пат. 4,697,451 США, МКИ GO IN 013/02. Automated Interfacial Tensiometer/ Matteson M. J. (США); Georgia Tech Research Corporation. - №779680; Заявл. 26.09.1985; Опубл. 06.10.1987. НКІ 73/64.4. - 9 с. 25.
46. Пат. 5,218,841 США, МКИ G01N 013/02. Apparatus and methods for determining liquid/liquid interfacial tension and dynamic interfacial tension

- reduction / Hool K. O. (США); The Dow Chemical Company. - №931887; Заявл.18.08.1992; Оpubл. 15.06.1993. НКИ 73/64.52. - 8 с. 27.
47. Пат. 5,542,289 США, МКИ G01N 013/02. Apparatus and method for the study of liquid-liquid interfacial rheology / Hool K. O. (США), Saunders R. C. (США); The Dow Chemical Company. - №354577; Заявл. 13.12.1994; Оpubл. 06.08.1996. НКИ 73/64.52; 73/64.55; 324/691; 324/697; 324/701. – 16 с.
48. Patterson H. T., Ни К. Н., Grindstaff T. H. Measurement Of Interfacial and Surface Tensions in Polymer Systems // J. Polymer Sci. -1971. - Part C. - № 35. - P. 31-43.
49. Ryden J., Albertson P.-A. Interfacial Tension Of Dextran-Polyethylene Glycol – Water Two-Phase Systems // J. Colloid and Interface Sci. - 1971. - Vol. 37. - №1. - P. 219- 222.
50. Wilkinson M. C., Kidwell R. L. A Mathematical Description of the Harkins and Brown Correction Curve for the Determination of Surface and Interface Tensions // J. Colloid and Interface Sci. - 1971. -Vol. 35. -№ 1.-P. 114-119.
51. Технология повышения нефтеотдачи пластов / Э. М. Халимов, Б. И. Леви, В. И. Дзюба, С. А. Пономарев. - М.: Недра, 1984. - 271 с.
52. 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.
53. Ліскевич Є. І., Михайлюк В. Д., Смуk Ю. М. Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України // Тези доповідей і повідомлень. Львів. - 1995. - С. 91.
54. Применение композиций ПАВ при эксплуатации скважин / Н. М. Шерстнёв, Л. М. Гурвич, И. Г. Булина и др. - М.: Недра, 1988. - 184 с.
55. Василевская Л. М., Костюков Е. В., Павлова З. В. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью типа K1200ЦЛ2 // Электронная промышленность. - 1982.-№7 (113).

56. Кашлаков И. Д., Кленов В. Т., Костюков Е. В. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью типа К1200ЦЛ1 // Электронная промышленность. - 1982.-№8 (114).
57. Костюков Е. В., Павлова З. В., Пресс Ф. П. Линейные фоточувствительные микросхемы с зарядовой связью К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6 // Электронная промышленность. - 1987. - № 3.
58. Лебедев О. Н. Микросхемы памяти и их применение. - М.: Радио и связь, 1990. - 160с.
59. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. - М.: Радио и Связь, 1991.-264 с.
60. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Кругер М. Я. и др. Л.: Машиностроение, 1967. - 760 с.
61. Чен Ш. К. Принципы проектирования систем визуальной информации. - М.: Мир, 1994. - 408 с.
62. Стенин В. Я. Применение микросхем с зарядовой связью. - М.: Радио и связь, 1989.-256 с.
63. Порев В. А. Контроль оптичних полів приладами з електронним розгортанням зображення // Методи та прилади контролю якості. - 1998. - № 2. - С. 40-44.
64. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение.- М.: Связь, 1973.
65. Большанин А. А., Слободян С. М., Яковлев А. Р. и др. Оптический двухканальный датчик для системы технического зрения // Измерительная техника. - 1987. - № 10. - С. 17-18.
66. Bowning R. W., Garton D. A., Kinneir J. N. Measurement of the surface tension of santowax 'R', para-, meta- and orthoterphenyl, diphenyl, diphenyl ether and dowtherm 'A'. - Winftith // Atomic energy establishment, 1961.-27p.
67. Сергеев А. А. Устройство ввода-вывода видеосигнала // Приборы и техника эксперимента. - 1997. - № 6. - С. 189

- 68.Бондарев В. П., Трёстер Г., Чернега В. С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. Учеб пособие для вузов. 2-е изд. - Х.: Конус, 2001. – 398 с.: ил.
- 69.Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 228 с.
- 70.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.
- 71.Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / Под ред. В. И. Ванника. – М. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 816с.
- 72.Айвазян С. А. И др. Прикладная статистика исследования зависимостей: Справ. изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин; Под. ред. С. А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 486с., ил.
- 73.Литтл Р., Дж. А., Рубин Д. Б. Статистический анализ данных с пропусками / Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 336: ил. – (Математико-статистические методы за рубежом)
- 74.А.В.Сибиряков, Методы автоматического построения трехмерных моделей искусственных пространственных объектов - элементов аэрофотосъемки, // Тезисы докладов XXXIX Юбилейной Научной Конференции МФТИ "Современные проблемы фундаментальной и прикладной физики и математики", Вып.1, Физика и электроника, г.Долгопрудный, 29-30 ноября 1996г., с.78.
- 75.Агапов С.В., Бирюков В.С., Желтов С.Ю., Скрябин С.В., Статья "О перспективах создания и внедрения отечественных цифровых стереофотограмметрических комплексов". печ. "Геодезия и картография", №10, 1994г.

76. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Теоретические основы метода потенциальных функций в задачах обучения автоматическому разделению входных ситуаций на классы. Автоматика и телемеханика. 1964. Т. XXII. № 6. С. 81-88.
77. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 295 с.
78. Горелик А.Г., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние и проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
79. Горелик А.Г., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1984. 208 с.
80. Желтов С.Ю., Папков С.Б. Статья "Применение полуавтоматических методов выделения сложных линейных структур на цифровых аэрофотосъемках на примере локализации дорожной сети". печ. Тезисы доклада. III Международная конференция "Методы дистанционного зондирования и ГИС-технологии для контроля и диагностики состояния окружающей среды". Москва, 20-23.10.1996 г.
81. Левшин В.Л. Биокибернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений. М.: Машиностроение. 1987. 175 с.
82. Рабиндер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигнала. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 379 с.
83. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 230 с.
84. Тихонов А.Н. Теория восстановления сигналов. М.: Наука, 1983. 225 с.
85. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир, 1977. 320 с.
86. Хуанг Т.С. Обработка изображения и цифровая фильтрация. М.: Мир, 1979. 274 с.
87. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 390 с.

88. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику. - М. "Радио и связь", 1987, 336с.
89. Грегори К. Использование Visual C++ 6.0. Специальное издание.: Пер. с англ. - М.; СПб.; К.: Издательский дом "Вильямс", 2001. - 864с.: ил. - Парал. тит. англ., уч. пос.
90. Лейнекер Р. Энциклопедия языка C++ - СПб: Издательство «Питер», 1999.- 1152с.: ил.
91. Дяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных IBM: Справочник. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 240с.
92. Личак О. В., Нечипорук С. А., Піджарий В. М. Похибки зображення лежачої краплі розплаву від неколімованості променів освітлення. // Фіз.-хім. Механіка матеріалів. - 2000. - №3. - С. 74 - 77.
93. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений.- Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 304с.
94. Порев В. А., Порев Г. В., Кісіль Р. І. Імовірнісний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю // Методи та прилади контролю якості. - 2002. - №8. - С.40 - 43.
95. Маслюков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-механическая промышленность. - 1990. - № 4. - С. 70-73.


```

    }
    case IDM_Point_value:
    {
        double R1,R2,b, xx=-0.000966;
        *c=*C(X_array,Y_array,2,3,4);
        *d=*D(X_array,Y_array,2,3,4);
        *a=*Gaus(c,d,2);

        R1=pow((1+pow(First_Der(a,2,xx),2)),3.0/2.0)/Second_Der(a,2,xx);
        if(R1<0) R1=-R1;

        R2=xx*pow((1+pow(First_Der(a,2,xx),2)),1.0/2.0)/First_Der(a,2,xx);
        *c1=*C(X_array,Y_array,2,3,7);
        *d1=*D(X_array,Y_array,2,3,7);
        *a1=*Gaus(c1,d1,2);

        b=pow((1+pow(First_Der(a1,2,0),2)),3.0/2.0)/Second_Der(a1,2,0);
        double s=(998.6*9.81*Surface(a,2,xx)/(1/R1+1/R2-2/b));
        sprintf(str,"%f",s);

        TextOut(memdc,10,20,str,strlen(str));

        InvalidateRect(hwnd,NULL,1);
        break;
    }

double function(double B,double x, double y, double y_)
{
    double f;
    f=(2.0+B*y)*pow((1.0+pow(y_,2.0)),3.0/2.0)-y_/x*(1.0+pow(y_,2.0));
    return(f);
}

double *K_function(double B,double x,double y,double y_)
{
    if(i!=1)
        K[0]=h*function(B,x,y,y_);
    else K[0]=h*y;
}

```

```

    K[1]=h*function(B,x+h/2.0,y+h/2.0*y_+h/8.0*K[0],y_+K[0]/2.0);
    K[2]=h*function(B,x+h/2.0,y+h/2.0*y_+h/8.0*K[0],y_+K[1]/2.0);
    K[3]=h*function(B,x+h,y+h*y_+h/2.0*K[2],y_+K[2]);

    return (K);
}
double *C(double x[],double y[], int m,int N,int Start_point)
{
    for(int j=0; j<=2*m; j++)
    {
        c[j]=0;

        for(int i=Start_point; i<=N+Start_point; i++)

            c[j]=c[j]+pow(x[i],j);
    }
    return(c);
}

double *D(double x[],double y[], int m,int N, int Start_point)
{
    for(int k=0; k<=m; k++)
    {
        d[k]=0;

        for(int i=Start_point; i<=N+Start_point; i++)

            d[k]=d[k]+pow(x[i],k)*y[i];
    }
    return(d);
}

double First_Der(double a[], int m, double X_Value)
{
    double Sum=a[1];

    for(int i=2; i<=m; i++)

        Sum=Sum+a[i]*pow(X_Value,i-1);

    return(Sum);
}

double Second_Der(double a[], int m, double X_Value)
{
    double Sum=a[2];

    for(int i=3; i<=m; i++)

        Sum=Sum+a[i]*pow(X_Value,i-1);

    return(Sum);}

```

Додаток Б

Таблиця 1

Розрахунок профілю лежачої краплі $\beta = 3$

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,0981	0,1379	0,0068	1,0211	0,9457	0,4523
0,0988	0,1389	0,0069	1,0247	0,9470	0,4544
0,0995	0,1399	0,0069	1,0282	0,9483	0,4566
0,1003	0,1408	0,0070	1,0318	0,9496	0,4587
0,1010	0,1418	0,0071	1,0354	0,9509	0,4609
0,1017	0,1428	0,0072	1,0389	0,9522	0,4630
0,1024	0,1438	0,0073	1,0425	0,9534	0,4652
0,1031	0,1448	0,0075	1,0461	0,9547	0,4673
0,1038	0,1458	0,0076	1,0498	0,9559	0,4695
0,1045	0,1468	0,0077	1,0534	0,9572	0,4717
0,1052	0,1478	0,0078	1,0570	0,9584	0,4738
0,1060	0,1487	0,0079	1,0606	0,9596	0,4760
0,1067	0,1497	0,0080	1,0643	0,9609	0,4782
0,1074	0,1507	0,0081	1,0679	0,9621	0,4804
0,1081	0,1517	0,0082	1,0716	0,9633	0,4826
0,1088	0,1527	0,0083	1,0753	0,9645	0,4848
0,1095	0,1537	0,0084	1,0790	0,9657	0,4870
0,1102	0,1547	0,0085	1,0827	0,9668	0,4892
0,1110	0,1556	0,0086	1,0864	0,9680	0,4914
0,1117	0,1566	0,0087	1,0901	0,9692	0,4936
0,1124	0,1576	0,0088	1,0938	0,9703	0,4958
0,1131	0,1586	0,0090	1,0975	0,9715	0,4981
0,1138	0,1596	0,0091	1,1013	0,9726	0,5003
0,1145	0,1606	0,0092	1,1050	0,9737	0,5025
0,1152	0,1616	0,0093	1,1088	0,9748	0,5048
0,1160	0,1626	0,0094	1,1125	0,9760	0,5070
0,1167	0,1635	0,0095	1,1163	0,9771	0,5092
0,1174	0,1645	0,0096	1,1201	0,9781	0,5115

Продовження табл.1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,1181	0,1655	0,0098	1,1239	0,9792	0,5137
0,1188	0,1665	0,0099	1,1277	0,9803	0,5160
0,1195	0,1675	0,0100	1,1315	0,9814	0,5183
0,1203	0,1685	0,0101	1,1353	0,9824	0,5205
0,1210	0,1695	0,0102	1,1392	0,9835	0,5228
0,1217	0,1704	0,0103	1,1430	0,9845	0,5251
0,1224	0,1714	0,0105	1,1469	0,9856	0,5273
0,1231	0,1724	0,0106	1,1507	0,9866	0,5296
0,1239	0,1734	0,0107	1,1546	0,9876	0,5319
0,1246	0,1744	0,0108	1,1585	0,9886	0,5342
0,1253	0,1754	0,0110	1,1624	0,9896	0,5365
0,1260	0,1763	0,0111	1,1663	0,9906	0,5388
0,1267	0,1773	0,0112	1,1702	0,9916	0,5411
0,1274	0,1783	0,0113	1,1741	0,9926	0,5434
0,1282	0,1793	0,0115	1,1781	0,9935	0,5457
0,1289	0,1803	0,0116	1,1820	0,9945	0,5480
0,1296	0,1813	0,0117	1,1860	0,9954	0,5503
0,1303	0,1823	0,0118	1,1899	0,9963	0,5526
0,1310	0,1832	0,0120	1,1939	0,9973	0,5549
0,1318	0,1842	0,0121	1,1979	0,9982	0,5573
0,1325	0,1852	0,0122	1,2019	0,9991	0,5596
0,1332	0,1862	0,0124	1,2059	1,0000	0,5619
0,1339	0,1872	0,0125	1,2099	1,0009	0,5643
0,1346	0,1882	0,0126	1,2139	1,0018	0,5666
0,1354	0,1891	0,0128	1,2180	1,0026	0,5690
0,1361	0,1901	0,0129	1,2220	1,0035	0,5713
0,1368	0,1911	0,0130	1,2261	1,0043	0,5737
0,1375	0,1921	0,0132	1,2301	1,0052	0,5760
0,1382	0,1931	0,0133	1,2342	1,0060	0,5784
0,1397	0,1950	0,0136	1,2424	1,0076	0,5831

Продовження табл.1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,1404	0,1960	0,0137	1,2465	1,0084	0,5855
0,1411	0,1970	0,0139	1,2506	1,0092	0,5878
0,1419	0,1980	0,0140	1,2548	1,0100	0,5902
0,1426	0,1990	0,0141	1,2589	1,0108	0,5926
0,1433	0,2000	0,0143	1,2630	1,0116	0,5950
0,1440	0,2009	0,0144	1,2672	1,0123	0,5973
0,1447	0,2019	0,0146	1,2714	1,0131	0,5997
0,1455	0,2029	0,0147	1,2756	1,0138	0,6021
0,1462	0,2039	0,0149	1,2797	1,0145	0,6045
0,1469	0,2049	0,0150	1,2840	1,0152	0,6069
0,1476	0,2058	0,0151	1,2882	1,0159	0,6093
0,1484	0,2068	0,0153	1,2924	1,0166	0,6117
0,1491	0,2078	0,0154	1,2966	1,0173	0,6141
0,1498	0,2088	0,0156	1,3009	1,0180	0,6165
0,1505	0,2098	0,0157	1,3051	1,0186	0,6189
0,1513	0,2108	0,0159	1,3094	1,0193	0,6213
0,1520	0,2117	0,0160	1,3137	1,0199	0,6238
0,1527	0,2127	0,0162	1,3180	1,0206	0,6262
0,1534	0,2137	0,0163	1,3223	1,0212	0,6286
0,1542	0,2147	0,0165	1,3266	1,0218	0,6310
0,1549	0,2157	0,0166	1,3309	1,0224	0,6335
0,1556	0,2166	0,0168	1,3352	1,0230	0,6359
0,1564	0,2176	0,0169	1,3396	1,0236	0,6383
0,1571	0,2186	0,0171	1,3439	1,0241	0,6408
0,1578	0,2196	0,0173	1,3483	1,0247	0,6432
0,1585	0,2206	0,0174	1,3527	1,0253	0,6456
0,1593	0,2215	0,0176	1,3571	1,0258	0,6481
0,1600	0,2225	0,0177	1,3615	1,0263	0,6505
0,1607	0,2235	0,0179	1,3659	1,0268	0,6530
0,1615	0,2245	0,0180	1,3703	1,0274	0,6554

Продовження табл. 1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,1622	0,2255	0,0182	1,3747	1,0278	0,6579
0,1629	0,2264	0,0184	1,3792	1,0283	0,6603
0,1636	0,2274	0,0185	1,3836	1,0288	0,6628
0,1644	0,2284	0,0187	1,3881	1,0293	0,6652
0,1651	0,2294	0,0189	1,3926	1,0297	0,6677
0,1658	0,2304	0,0190	1,3971	1,0302	0,6701
0,1666	0,2313	0,0192	1,4016	1,0306	0,6726
0,1673	0,2323	0,0193	1,4061	1,0310	0,6751
0,1680	0,2333	0,0195	1,4106	1,0314	0,6775
0,1688	0,2343	0,0197	1,4152	1,0318	0,6800
0,1695	0,2353	0,0198	1,4197	1,0322	0,6825
0,1702	0,2362	0,0200	1,4243	1,0326	0,6850
0,1709	0,2372	0,0202	1,4288	1,0329	0,6874
0,1717	0,2382	0,0203	1,4334	1,0333	0,6899
0,1724	0,2392	0,0205	1,4380	1,0336	0,6924
0,1731	0,2401	0,0207	1,4426	1,0340	0,6949
0,1739	0,2411	0,0209	1,4472	1,0343	0,6973
0,1746	0,2421	0,0210	1,4519	1,0346	0,6998
0,1753	0,2431	0,0212	1,4565	1,0349	0,7023
0,1761	0,2441	0,0214	1,4612	1,0352	0,7048
0,1768	0,2450	0,0216	1,4658	1,0354	0,7073
0,1775	0,2460	0,0217	1,4705	1,0357	0,7098
0,1783	0,2470	0,0219	1,4752	1,0359	0,7122
0,1790	0,2480	0,0221	1,4799	1,0362	0,7147
0,1797	0,2489	0,0223	1,4846	1,0364	0,7172
0,1805	0,2499	0,0224	1,4893	1,0366	0,7197
0,1812	0,2509	0,0226	1,4941	1,0368	0,7222
0,1820	0,2519	0,0228	1,4988	1,0370	0,7247
0,1827	0,2528	0,0230	1,5036	1,0372	0,7272
0,1834	0,2538	0,0232	1,5083	1,0373	0,7297

Продовження табл. 1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,1842	0,2548	0,0233	1,5131	1,0375	0,7322
0,1849	0,2558	0,0235	1,5179	1,0376	0,7347
0,1856	0,2567	0,0237	1,5227	1,0378	0,7372
0,1864	0,2577	0,0239	1,5275	1,0379	0,7397
0,1871	0,2587	0,0241	1,5324	1,0380	0,7422
0,1879	0,2597	0,0243	1,5372	1,0381	0,7447
0,1886	0,2606	0,0244	1,5421	1,0382	0,7472
0,1893	0,2616	0,0246	1,5469	1,0382	0,7497
0,1901	0,2626	0,0248	1,5518	1,0383	0,7522
0,1908	0,2636	0,0250	1,5567	1,0383	0,7547
0,1915	0,2645	0,0252	1,5616	1,0383	0,7572
0,1923	0,2655	0,0254	1,5665	1,0384	0,7597
0,1930	0,2665	0,0256	1,5715	1,0384	0,7622
0,1938	0,2675	0,0258	1,5764	1,0384	0,7647
0,1945	0,2684	0,0260	1,5814	1,0383	0,7672
0,1952	0,2694	0,0261	1,5863	1,0383	0,7697
0,1960	0,2704	0,0263	1,5913	1,0383	0,7722
0,1967	0,2714	0,0265	1,5963	1,0382	0,7747
0,1975	0,2723	0,0267	1,6013	1,0381	0,7772
0,1982	0,2733	0,0269	1,6063	1,0380	0,7797
0,1990	0,2743	0,0271	1,6114	1,0379	0,7822
0,1997	0,2753	0,0273	1,6164	1,0378	0,7847
0,2004	0,2762	0,0275	1,6215	1,0377	0,7872
0,2012	0,2772	0,0277	1,6266	1,0376	0,7897
0,2019	0,2782	0,0279	1,6316	1,0374	0,7921
0,2027	0,2791	0,0281	1,6367	1,0373	0,7946
0,2034	0,2801	0,0283	1,6418	1,0371	0,7971
0,2042	0,2811	0,0285	1,6470	1,0369	0,7996
0,2049	0,2821	0,0287	1,6521	1,0367	0,8021
0,2056	0,2830	0,0289	1,6572	1,0365	0,8046

Продовження табл.1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,2064	0,2840	0,0291	1,6624	1,0363	0,8071
0,2071	0,2850	0,0293	1,6676	1,0360	0,8096
0,2079	0,2860	0,0295	1,6728	1,0358	0,8121
0,2086	0,2869	0,0297	1,6780	1,0355	0,8146
0,2094	0,2879	0,0299	1,6832	1,0352	0,8171
0,2101	0,2889	0,0301	1,6884	1,0349	0,8195
0,2109	0,2898	0,0303	1,6936	1,0346	0,8220
0,2116	0,2908	0,0306	1,6989	1,0343	0,8245
0,2124	0,2918	0,0308	1,7042	1,0340	0,8270
0,2131	0,2927	0,0310	1,7094	1,0337	0,8295
0,2139	0,2937	0,0312	1,7147	1,0333	0,8319
0,2146	0,2947	0,0314	1,7200	1,0329	0,8344
0,2154	0,2957	0,0316	1,7254	1,0325	0,8369
0,2161	0,2966	0,0318	1,7307	1,0321	0,8393
0,2169	0,2976	0,0320	1,7360	1,0317	0,8418
0,2176	0,2986	0,0322	1,7414	1,0313	0,8443
0,2184	0,2995	0,0325	1,7468	1,0309	0,8467
0,2191	0,3005	0,0327	1,7522	1,0304	0,8492
0,2199	0,3015	0,0329	1,7576	1,0300	0,8517
0,2216	0,3037	0,0334	1,7630	1,0295	0,8541
0,2233	0,3060	0,0339	1,7684	1,0290	0,8566
0,2251	0,3082	0,0344	1,7739	1,0285	0,8590
0,2268	0,3104	0,0349	1,7793	1,0280	0,8615
0,2286	0,3127	0,0354	1,7848	1,0275	0,8639
0,2303	0,3149	0,0360	1,7903	1,0269	0,8663
0,2321	0,3171	0,0365	1,7958	1,0264	0,8688
0,2338	0,3194	0,0370	1,8013	1,0258	0,8712
0,2356	0,3216	0,0376	1,8068	1,0252	0,8736
0,2373	0,3238	0,0381	1,8123	1,0246	0,8761
0,2391	0,3261	0,0386	1,8179	1,0240	0,8785

Продовження табл.1

φ	x/a	z/a	φ	x/a	z/a
0,2408	0,3283	0,0392	1,8235	1,0234	0,8809
0,2426	0,3305	0,0397	1,8291	1,0227	0,8833
0,2444	0,3328	0,0403	1,8347	1,0221	0,8858
0,2461	0,3350	0,0408	1,8403	1,0214	0,8882
0,2479	0,3372	0,0414	1,8459	1,0207	0,8906
0,2497	0,3394	0,0420	1,8515	1,0201	0,8930
0,2514	0,3417	0,0425	1,8572	1,0194	0,8954
0,2532	0,3439	0,0431	1,8629	1,0186	0,8978
0,2550	0,3461	0,0437	1,8685	1,0179	0,9002
0,2567	0,3483	0,0443	1,8742	1,0172	0,9026
0,2585	0,3505	0,0449	1,8799	1,0164	0,9049
0,2603	0,3528	0,0454	1,8857	1,0156	0,9073
0,2621	0,3550	0,0460	1,8914	1,0148	0,9097
0,2639	0,3572	0,0466	1,8972	1,0140	0,9121
0,2657	0,3594	0,0472	1,9029	1,0132	0,9144
0,2674	0,3616	0,0478	1,9087	1,0124	0,9168
0,2692	0,3638	0,0484	1,9145	1,0116	0,9191
0,2710	0,3661	0,0491	1,9203	1,0107	0,9215
0,2728	0,3683	0,0497	1,9262	1,0098	0,9238
0,2746	0,3705	0,0503	1,9320	1,0090	0,9262
0,2764	0,3727	0,0509	1,9379	1,0081	0,9285
0,2782	0,3749	0,0516	1,9437	1,0072	0,9309
0,2800	0,3771	0,0522	1,9496	1,0062	0,9332
0,2818	0,3793	0,0528	1,9555	1,0053	0,9355
0,2836	0,3815	0,0535	1,9615	1,0044	0,9378
0,2854	0,3837	0,0541	1,9674	1,0034	0,9401
0,2873	0,3859	0,0548	1,9733	1,0024	0,9424
0,2891	0,3881	0,0554	1,9793	1,0014	0,9447
0,2909	0,3903	0,0561	1,9853	1,0004	0,9470
0,2927	0,3925	0,0567	1,9913	0,9994	0,9493

Додаток В

Розрахунок параметрів лежачої краплі

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>

double coefficients[5]; // коефіцієнти поліноміальної регресії

void Gaus(double, double, double, int); // прототип

// *****
//
//     РОЗВ'ЯЗОК СИСТЕМИ ЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ ЗА МЕТОДОМ ГАУСА
//
//           з вибором головного елемента за стовпчиками
//
// *****

void Gaus(double *arr, double *d, double *coeff, int m)

// *ar - вказує на матрицю, що містить коефіцієнти системи лінійних
//           рівнянь
// *d - вказує на стовпчик, що містить коефіцієнти правої частини
//           системи
// *coeff - вказує на стовпчик результатів

{
    double h;

    int number_of_max_element;

    for(int i=0; i<=m-1; i++)
    {
        // визначення номера максимального елемента у стовпчику

        number_of_max_element=i;

        for(int l=i+1; l<=m; l++)

            if(fabs(*(arr+number_of_max_element*(m+1)+i))<
                fabs(*(arr+l*(m+1)+i))) number_of_max_element=l;

        // переставлення рядків

        double temporal_variable; double *temp=&temporal_variable;

        for(l=i; l<=m; l++)

            {
                *temp=*(arr+i*(m+1)+l);
                *(arr+i*(m+1)+l)=*(arr+number_of_max_element*(m+1)+l);
                *(arr+number_of_max_element*(m+1)+l)=*temp;
            }
    }
}

```

```

*temp=*(d+i);
*(d+i)=*(d+number_of_max_element);
*(d+number_of_max_element)=*temp;

// продовження прямого ходу

for(int j=i+1; j<=m; j++)

{
    *(arr+j*(m+1)+i)=-(*(arr+j*(m+1)+i))/(*(arr+(m+1)*i+i));

    for(int k=i+1; k<=m; k++)

        *(arr+j*(m+1)+k)=*(arr+j*(m+1)+k)+
        (*(arr+j*(m+1)+i))*(*(arr+i*(m+1)+k));

    *(d+j)=*(d+j)+(*(arr+j*(m+1)+i))*(*(d+i));
}
}

// кінець прямого ходу

// зворотній хід

koeff[m]=*(d+m)/(*(arr+m*(m+1)+m));

for(i=m-1; i>=0; i--)

{
    h=*(d+i);

    for(int j=i+1; j<=m; j++)

        h=h-koeff[j]*(*(arr+i*(m+1)+j));

    koeff[i]=h/(*(arr+i*(m+1)+i));
}
}

//*****
//
//      АПРОКСИМАЦІЯ ВХІДНОГО НАБОРУ ДАНИХ
//
//*****

void Regression(double *x, double *y, double *koefficients,
                int m, int start, int points)

/*x    -    вказує на вектор елементів x
*y    -    вказує на вектор елементів y
*koefficients -
//            повертає вектор коефіцієнтів апроксимаційного полінома
//m    -    порядок полінома
//start -    елемент масива, який приймається за початковий при
//            кусковій апроксимації
//points -    кількість точок, що аналізуються

{

```

```

double C[10], c[25], d[5];

for(int j=0; j<=2*m; j++)
{
    C[j]=0;

    for(int i=0; i<=points-1; i++)
        C[j]=C[j]+pow(*(x+start+i),j);
}

for (int i=0; i<=m; i++)
for( int j=0; j<=m; j++)
    c[i*(m+1)+j]=C[i+j];

c[0]=points;

for(int k=0; k<=m; k++)
{
    d[k]=0;

    for(int i=0; i<=points-1; i++)
        d[k]=d[k]+pow(*(x+start+i),k)*(*(y+start+i));
}

Gaus(&c[0], &d[0], &koefficients[0],m);
}

//*****
//
//    ФУНКЦІЯ, ЩО ОБЧИСЛЮЄ ЗНАЧЕННЯ ОРДИНАТИ ТОЧКИ ПРОФІЛЮ
//
//*****

double Y(double *koeff,int m, double X_Value)
{
    double Sum=*koeff;

    for(int i=1; i<=m; i++)
        Sum=Sum+*(koeff+i)*pow(X_Value,i);

    return(Sum);
}

//*****
//
//    ПЕРША ПОХІДНА
//
//*****
double First_Der(double *koeff, int m, double X_Value)

```

```

{
    double Sum=*(coeff+1);

    for(int i=2; i<=m; i++)

        Sum=Sum+*(coeff+i)*pow(X_Value,i-1)*i;

    return(Sum);
}

//*****
//
//          ДРУГА ПОХІДНА
//
//*****

double Second_Der(double *coeff, int m, double X_Value)
{
    double Sum=*(coeff+2)*2;

    for(int i=3; i<=m; i++)

        Sum=Sum+*(coeff+i)*pow(X_Value,i-1);

    return(Sum);
}

//*****

void main(void)
{

    double xx=-0.0009663, R1, R2, b;

    Regression(&X_array[0], &Y_array[0], &koefficients[0], 2, 4, 3);

    R1=pow((1+pow(First_Der(&koefficients[0],2,xx),2)),3.0/2.0)/

        Second_Der(&koefficients[0],2,xx);

    if(R1<0) R1=-R1;

    R2=xx*pow((1+pow(First_Der(&koefficients[0],2,xx),2)),1.0/2.0)/

        First_Der(&koefficients[0],2,xx);

    if(R2<0) R2=-R2;

    printf("%f\n",koefficients[0]);

    printf("%f\n",koefficients[1]);

    printf("%f\n",koefficients[2]);

    Regression(&X_array[0], &Y_array[0], &koefficients[0], 2, 7, 3);

    b=pow((1+pow(First_Der(&koefficients[0],2,0),2)),3.0/2.0)/

```



```
Second_Der(&koefficients[0],2,0);  
  
if(b<0) b=-b;  
  
printf("R1=%f\n",R1);  
printf("R2=%f\n",R2);  
printf("b=%f\n",b);  
Regression(&X_array[0], &Y_array[0], &koefficients[0], 2, 4, 3);  
  
double s=(998.6*9.81*Y(&koefficients[0],2,xx))/(1.0/R1+1.0/R2-2.0/b);  
  
printf("%f\n",s);
```

Додаток Г

Обчислення значень площі та екваторіального діаметра лежачої краплі у
безрозмірних координатах

```
% calculating the sessile drops' profiles of liquids
global B

hold on

grid on

theta=0; slim=5; x0=0.00000001; z0=0;

d_index=1; s_index=1;

clear Result
clear Radius

for B=3.1:0.1:3;

options=odeset('Refine',200);
[t,y]=ode45('mnsk_setb',[0 slim],[theta;x0;z0],options);
[w,v]=size(y);

kk=find(y(:,1)>3*pi/2);
y(kk,:)=[];
t(kk)=[];
[n,m]=size(y);

%for j=1:n
% plot(y(j,2),y(j,3),'k-');
%end

%finding Xecv
Xecv=y(1,2);
for i=2:n
    if(Xecv<y(i,2))
        Xecv=y(i,2);
        ekvator=i;
    end
end

if(ekvator==n)continue;
end

Decv=2*Xecv;

%calculating the square of the sessile drop
```

```
S=0.0;
for i=1:ekvator-1
    S=S+(y(i,2)+y(i+1,2))*(y(i+1,3)-y(i,3));
end
Result(d_index,1)=B;
Result(d_index,2)=Decv;
Result(s_index,3)=S;

d_index=d_index+1;
s_index=s_index+1;

end

%plot(Result(:,1),Result(:,2),'-k');

save Result.out y -ASCII
```

Додаток Д

Таблиця 1

Залежність площі верхньої частини перерізу
лежачої краплі від її екваторіального діаметра

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,0894	0,0031	0,937	0,316
0,109	0,0047	0,938	0,317
0,126	0,0063	0,94	0,318
0,141	0,0078	0,941	0,319
0,155	0,0094	0,943	0,32
0,167	0,0109	0,945	0,321
0,178	0,0125	0,946	0,322
0,189	0,014	0,948	0,323
0,199	0,0155	0,949	0,324
0,209	0,0171	0,951	0,325
0,218	0,0186	0,953	0,326
0,227	0,0201	0,954	0,327
0,236	0,0217	0,956	0,328
0,244	0,0232	0,957	0,329
0,252	0,0247	0,959	0,33
0,259	0,0262	0,961	0,331
0,267	0,0277	0,962	0,332
0,274	0,0292	0,964	0,333
0,281	0,0307	0,965	0,334
0,288	0,0322	0,967	0,335
0,295	0,0337	0,968	0,336
0,301	0,0352	0,97	0,337
0,308	0,0367	0,971	0,338
0,314	0,0382	0,973	0,339
0,32	0,0397	0,975	0,34
0,326	0,0412	0,976	0,341
0,332	0,0427	0,978	0,342
0,338	0,0441	0,979	0,343
0,343	0,0456	0,981	0,344
0,349	0,0471	0,982	0,345
0,354	0,0485	0,984	0,346
0,36	0,05	0,985	0,347
0,365	0,0515	0,987	0,348

Продовження табл. 1

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,37	0,0529	0,988	0,349
0,375	0,0544	0,99	0,35
0,38	0,0558	0,991	0,351
0,385	0,0573	0,993	0,352
0,39	0,0587	0,994	0,352
0,395	0,0602	0,996	0,353
0,4	0,0616	0,997	0,354
0,405	0,063	0,999	0,355
0,409	0,0645	1	0,356
0,414	0,0659	1	0,357
0,418	0,0673	1	0,358
0,423	0,0687	1	0,359
0,427	0,0702	1,01	0,36
0,432	0,0716	1,01	0,361
0,436	0,073	1,01	0,362
0,44	0,0744	1,01	0,363
0,445	0,0758	1,01	0,364
0,449	0,0772	1,14	0,452
0,453	0,0787	1,25	0,532
0,457	0,0801	1,35	0,604
0,461	0,0814	1,43	0,669
0,465	0,0828	1,51	0,731
0,469	0,0842	1,57	0,788
0,473	0,0856	1,64	0,842
0,477	0,087	1,69	0,892
0,481	0,0884	1,75	0,939
0,485	0,0898	1,8	0,983
0,489	0,0912	1,84	1,03
0,492	0,0925	1,89	1,07
0,496	0,0939	1,93	1,11
0,5	0,0953	1,97	1,14
0,503	0,0967	2,01	1,18
0,507	0,098	2,04	1,21
0,511	0,0994	2,08	1,24
0,514	0,101	2,11	1,27
0,518	0,102	2,14	1,3
0,521	0,103	2,17	1,33

Продовження табл. 1

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,528	0,106	2,23	1,38
0,532	0,108	2,25	1,41
0,535	0,109	2,28	1,43
0,539	0,11	2,31	1,46
0,542	0,112	2,33	1,48
0,545	0,113	2,35	1,51
0,549	0,114	2,38	1,53
0,552	0,116	2,4	1,55
0,555	0,117	2,42	1,57
0,559	0,118	2,44	1,59
0,562	0,12	2,46	1,61
0,565	0,121	2,48	1,63
0,568	0,122	2,5	1,65
0,571	0,124	2,52	1,67
0,574	0,125	2,54	1,69
0,578	0,126	2,56	1,71
0,581	0,127	2,58	1,73
0,584	0,129	2,59	1,75
0,587	0,13	2,61	1,76
0,59	0,131	2,63	1,78
0,593	0,133	2,64	1,8
0,596	0,134	2,66	1,81
0,599	0,135	2,67	1,83
0,602	0,137	2,69	1,84
0,605	0,138	2,7	1,86
0,608	0,139	2,72	1,87
0,611	0,14	2,73	1,89
0,614	0,142	2,75	1,9
0,617	0,143	2,76	1,92
0,619	0,144	2,78	1,93
0,622	0,146	2,79	1,95
0,625	0,147	2,8	1,96
0,628	0,148	2,82	1,97
0,631	0,149	2,83	1,99
0,633	0,151	2,84	2
0,636	0,152	2,85	2,01
0,639	0,153	2,87	2,02

Продовження табл. 1

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,647	0,157	2,9	2,06
0,65	0,158	2,91	2,07
0,653	0,16	2,92	2,08
0,655	0,161	2,94	2,1
0,658	0,162	2,95	2,11
0,661	0,163	2,96	2,12
0,663	0,165	2,97	2,13
0,666	0,166	2,98	2,14
0,668	0,167	2,99	2,15
0,671	0,168	3	2,16
0,674	0,17	3,01	2,17
0,676	0,171	3,02	2,18
0,679	0,172	3,03	2,19
0,681	0,173	3,04	2,2
0,684	0,174	3,05	2,21
0,686	0,176	3,06	2,22
0,689	0,177	3,07	2,23
0,691	0,178	3,08	2,24
0,694	0,179	3,09	2,25
0,696	0,181	3,1	2,26
0,699	0,182	3,1	2,27
0,701	0,183	3,11	2,28
0,704	0,184	3,12	2,29
0,706	0,185	3,13	2,3
0,709	0,187	3,14	2,31
0,711	0,188	3,15	2,31
0,713	0,189	3,16	2,32
0,716	0,19	3,16	2,33
0,718	0,191	3,17	2,34
0,72	0,193	3,18	2,35
0,723	0,194	3,19	2,36
0,725	0,195	3,2	2,37
0,727	0,196	3,2	2,37
0,73	0,198	3,21	2,38
0,732	0,199	3,22	2,39
0,734	0,2	3,23	2,4
0,737	0,201	3,24	2,4

Продовження табл. 1

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,741	0,203	3,25	2,42
0,744	0,205	3,26	2,43
0,746	0,206	3,27	2,44
0,748	0,207	3,27	2,44
0,75	0,208	3,28	2,45
0,753	0,209	3,29	2,46
0,755	0,211	3,29	2,47
0,757	0,212	3,3	2,47
0,759	0,213	3,31	2,48
0,761	0,214	3,31	2,49
0,764	0,215	3,32	2,49
0,766	0,216	3,33	2,5
0,768	0,218	3,33	2,51
0,77	0,219	3,34	2,52
0,772	0,22	3,35	2,52
0,774	0,221	3,35	2,53
0,777	0,222	3,36	2,54
0,779	0,223	3,37	2,54
0,781	0,225	3,37	2,55
0,783	0,226	3,38	2,56
0,785	0,227	3,39	2,56
0,787	0,228	3,39	2,57
0,789	0,229	3,4	2,58
0,791	0,23	3,4	2,58
0,793	0,231	3,41	2,59
0,795	0,233	3,42	2,59
0,798	0,234	3,42	2,6
0,8	0,235	3,43	2,61
0,802	0,236	3,43	2,61
0,804	0,237	3,44	2,62
0,806	0,238	3,45	2,63
0,808	0,239	3,45	2,63
0,81	0,241	3,46	2,64
0,812	0,242	3,46	2,64
0,814	0,243	3,47	2,65
0,816	0,244	3,47	2,66
0,818	0,245	3,48	2,66

Продовження табл. 1

S/a^2	d/a	S/a^2	d/a
0,824	0,248	3,5	2,68
0,826	0,249	3,5	2,69
0,828	0,251	3,51	2,69
0,83	0,252	3,51	2,7
0,832	0,253	3,52	2,7
0,833	0,254	3,52	2,71
0,835	0,255	3,53	2,71
0,837	0,256	3,53	2,72
0,839	0,257	3,54	2,72
0,841	0,258	3,54	2,73
0,843	0,259	3,55	2,74
0,845	0,261	3,55	2,74
0,847	0,262	3,56	2,75
0,849	0,263	3,56	2,75
0,851	0,264	3,57	2,76
0,853	0,265	3,57	2,76
0,854	0,266	3,58	2,77
0,856	0,267	3,58	2,77
0,858	0,268	3,59	2,78
0,86	0,269	3,59	2,78
0,862	0,27	3,6	2,79
0,864	0,271	3,6	2,79
0,866	0,273	3,61	2,8
0,867	0,274	3,61	2,8
0,869	0,275	3,62	2,81
0,871	0,276	3,62	2,81
0,873	0,277	3,63	2,82
0,875	0,278	3,63	2,82
0,876	0,279	3,64	2,83
0,878	0,28	3,64	2,83
0,88	0,281	3,64	2,84

Додаток Е

Процедура відкриття файлу із зображенням лежачої краплі

```

#include <afxwin.h>
#include <afxdlgs.h>
#include <iostream.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

void main( void )
{
    if ( !AfxWinInit( ::GetModuleHandle( NULL ), NULL, ::GetCommandLine( ), 0 ) )
    {
        cerr << _T( "MFC Failed to initialize.\n" );
    }

    CString m_Text;

    // створення стандартної панелі вибору файлу OPEN
    CFileDialog DlgOpen(TRUE,NULL,NULL,
        OFN_HIDEREADONLY,(LPCSTR)" Bitmap Files (*.bmp) |*.bmp| NULL");

    // відображення стандартної панелі вибору файлу OPEN
    if(DlgOpen.DoModal()==IDOK)
    {
        // створення об'єкта і відкриття файлу для читання
        CStdioFile File(DlgOpen.GetPathName(),CFile::modeRead | CFile::typeBinary);

        // читання з файлу рядка
        char buffer[14],b;

        File.Seek(0,CFile::begin);

        File.Read(buffer,14); // передається посилання на рядок m_Text

        for(int i=0; i<=13; i++)
        {
            b=buffer[i];
            if(b<0) printf("#%d code %d\n",i,b+256);
            else printf("#%d code %d\n",i,b);

        }
    }
}

```

Додаток Є

Процедура розрахунку поверхневого натягу з значеннями площі та екваторіального діаметра

```

LRESULT CALLBACK WndProc(HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{

    int wmId, wmEvent;

    TCHAR szHello[MAX_LOADSTRING];
    LoadString(hInst, IDS_HELLO, szHello, MAX_LOADSTRING);

    switch (message)
    {

    case WM_CREATE:

        // отримуємо розміри екрана

        maxX=GetSystemMetrics(SM_CXSCREEN);
        maxY=GetSystemMetrics(SM_CYSCREEN);

        // будуємо растр, сумісний з вікном

        hdc=GetDC(hWnd);
        memdc=CreateCompatibleDC(hdc);
        hbit=CreateCompatibleBitmap(hdc,maxX,maxY);
        SelectObject(memdc,hbit);
        //hbrush=GetStockObject(WHITE_BRUSH);
        SelectObject(memdc,hbrush);
        PatBlt(memdc,0,0,maxX,maxY,PATCOPY);
        ReleaseDC(hWnd,hdc);
        break;

    case WM_COMMAND:
        wmId  = LOWORD(wParam);
        wmEvent = HIWORD(wParam);
        // Parse the menu selections:
        switch (wmId)
        {

            case IDM_ABOUT:

                DialogBox(hInst, (LPCTSTR)IDD_ABOUTBOX, hWnd, (DLGPROC)About);

                break;

            case IDM_FILE_OPEN:
                {
                    // створення стандартної панелі вибору файла OPEN
                    CFileDialog DlgOpen(TRUE,NULL,NULL,
                    OFN_HIDEREADONLY,(LPCSTR)" Bitmap Files (*.bmp)|*.bmp| NULL");

                    // відображення стандартної панелі вибору файла OPEN
                    if(DlgOpen.DoModal()!=IDOK)

                }

                // створення об'єкта і відкриття файла для читання

```

```

CStdioFile File(DlgOpen.GetPathName(),CFile::modeRead | CFile::typeBinary);

a=1;

File.Seek(54,CFile::begin);
File.Read(cBuffer,921600);
File.Close();

if(a)

{
hdc = BeginPaint(hWnd, &ps);
for(int j=0; j<=479; j++)

for(int i=0; i<=639; i++)

{
Pixel=cBuffer[j*640*3+i*3];
if(Pixel<0) Pixel+=256;

if(Pixel<Maximum && Pixel>Minimum)
SetPixel(memdc,i,479-j,RGB(70,255,255));
else

SetPixel(memdc,i,479-j,RGB(cBuffer[j*640*3+i*3], cBuffer[j*640*3+i*3+1], cBuffer[j*640*3+i*3+2]));
}

}

InvalidateRect(hWnd,NULL,0);
}

}

break;

case IDM_Edge:
{

DialogBox(hInst,(LPCTSTR)IDD_DIALOG1,hWnd,(DLGPROC)DialogFunc);
if(a)

{
hdc = BeginPaint(hWnd, &ps);

for(int j=0; j<=479; j++)

for(int i=0; i<=639; i++)

{
Pixel=cBuffer[j*640*3+i*3];
if(Pixel<0) Pixel+=255;

if(Pixel<Maximum && Pixel>0)

SetPixel(memdc,i,479-j,RGB(0,0,0));

else

```

```

        SetPixel(memdc,i,479-j,RGB(cBuffer[j*640*3+i*3], cBuffer[j*640*3+i*3], cBuffer[j*640*3+i*3]));
    }

    }
    InvalidateRect(hWnd,NULL,0);
    break;
    }

    case IDM_EXIT:
    DestroyWindow(hWnd);
    break;
    default:
    return DefWindowProc(hWnd, message, wParam, lParam);

    break;

    case WM_PAINT:

    hdc = BeginPaint(hWnd, &ps);

    SetMapMode(hdc,MM_ISOTROPIC);

    SetWindowExtEx(hdc,640,480,NULL);

    SetViewportOrgEx(hdc,0,0,NULL);

    SetViewportExtEx(hdc,640,480,NULL);

    BitBlt(hdc,0,0,maxX,maxY,memdc,0,0,SRCCOPY);

    EndPaint(hWnd, &ps);

    break;

    case WM_DESTROY:
    PostQuitMessage(0);
    break;
    default:
    return DefWindowProc(hWnd, message, wParam, lParam);
}
return 0;
}

// Message handler for about box.
LRESULT CALLBACK About(HWND hDlg, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{
    switch (message)
    {
        case WM_INITDIALOG:
            return TRUE;

        case WM_COMMAND:
            if (LOWORD(wParam) == IDOK || LOWORD(wParam) == IDCANCEL)
            {
                EndDialog(hDlg, LOWORD(wParam));
                return TRUE;
            }
            break;
    }
    return FALSE;
}

```

```
}  
  
LRESULT CALLBACK DialogFunc(HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam)  
{  
    switch(message)  
    {  
        case WM_INITDIALOG:  
            return TRUE;  
  
        case WM_COMMAND:  
            switch (LOWORD(wParam))  
            {  
                case IDCANCEL:  
                    EndDialog(hWnd, LOWORD(wParam));  
                    return TRUE;  
  
                case IDOK:  
                    {  
                        GetDlgItemText(hWnd, IDC_Minimum, min, 4);  
                        Minimum=atoi(min);  
                        GetDlgItemText(hWnd, IDC_Maximum, max, 4);  
                        Maximum=atoi(max);  
                        EndDialog(hWnd, LOWORD(wParam));  
                        InvalidateRect(hWnd, NULL, 0);  
                        return TRUE;  
                    }  
            }  
        return FALSE;  
    }  
    return FALSE;  
}
```

Додаток Ж

Розрахунок поверхневого натягу на основі радіусів кривизни

```

global K A R0

hold on

grid on

axis([0 3.5 0 3.5]);

A2=9; %A in power of 2 capillar constant

A=2/A2; theta=0; slim=5; x0=0.00000001; z0=0;

d_index=1; s_index=1;

clear Result
clear Radius

for R0=0.1:0.1:4;

options=odeset('Refine',100);
[t,y]=ode45('mnsk_set',[0 slim],[theta;x0;z0],options);
[w,v]=size(y);

kk=find(y(:,1)>3*pi/2);
y(kk,:)=[];
t(kk)=[];
[n,m]=size(y);

%for j=1:n
% plot(y(j,2),y(j,3),'k-');
%end

%finding Xecv
Xecv=y(1,2);
for i=2:n
    if(Xecv<y(i,2))
        Xecv=y(i,2);
        ekvator=i;
    end
end

if(ekvator==n)continue;
end

Decv=2*Xecv;

```

```

%calculating the square of the sessile drop

S=0.0;
for i=1:ekvator-1
    S=S+(y(i,2)+y(i+1,2))*(y(i+1,3)-y(i,3));
end

Result(d_index,1)=A2;
Result(d_index,2)=R0;
Result(d_index,3)=Decv;
Result(s_index,4)=S;

d_index=d_index+1;
s_index=s_index+1;

end

for i=2:ekvator
    Radius(i,1)=t(i);
    Radius(i,2)=y(i,1);
    Radius(i,3)=y(i,2);
    Radius(i,4)=y(i,3);
    Radius(i,5)=(t(i)-t(i-1))/(y(i,1)-y(i-1,1));
    Radius(i,6)=y(i,2)/sin(y(i,1));
    Radius(i,7)=y(i,3)/(1/Radius(i,5)+1/Radius(i,6)-2/R0);
end
%save Radiusa210R01.out Radius -ASCII
save Result3.out Result -ASCII

```


Додаток 3
Процедура взаємодії ПК із приладом ВПНО-1

```

// комунікаційний потік
UINT ThreadProc(LPVOID param)
{
    for(;;)
    {
        dwResult::WaitForMultipleObjects(
            3,hEvents, false,INFINITE);
        switch(dwResult)
        {
            case WAIT_OBJECT_0: // встановлення зв'язку
            {
                int cycle=0;
                for(;;)
                {
                    cycle++;
                    if(cycle>10) cycle=0;
                    if(cycle<5) m_progressBar.SetPos(255);
                    else m_progressBar.SetPos(0);

                    Port.ClearBuffer();

                    buffer[0]=1;
                    buffer[1]=3;
                    buffer[2]=7;
                    buffer[3]=15;
                    buffer[4]=31;
                    buffer[5]=63;
                    buffer[6]=127;
                    buffer[7]=255;
                    Port.SetBuffer(&buffer[0]);
                    Port.fnWritePort();

                    Delay(100);

                    Port.fnReadPort();
                    Port.GetBuffer(&buffer[0]);

                    if(buffer[0]==255 &&
                        buffer[1]==127 &&
                        buffer[2]==63 &&
                        buffer[3]==31 &&
                        buffer[4]==15 &&
                        buffer[5]==7 &&
                        buffer[6]==3 &&
                        buffer[7]==1)
                    {
                        ::PostMessage((HWND)param,

```

```
        WM_CONNECTION_ESTABLISHED,0,0);
        break;
    }
}

break;
}

case WAIT_OBJECT_0 + 1: // приеманья даних
{

    Port.ClearBuffer();

    buffer[0]=1;
    Port.SetBuffer(&buffer[0]);
    Port.fnWritePort();

    Delay(50);

    for(int i=0;i<=255;i++)
    {

        Port.fnWritePort();

        Delay(30);

        Port.fnReadPort();
        Port.GetBuffer(&buffer[0]);
        for(int j=0;j<=31;j++)
        Buf[i*32+j]=buffer[j];
        m_progressBar.SetPos(i);

    }

    ::PostMessage((HWND)param,
        WM_READ_COMPLETED,0,0);

    break;
}

case WAIT_OBJECT_0 + 2: // передача даних
{

    Port.ClearBuffer();
```

```

        buffer[0]=2;
        Port.SetBuffer(&buffer[0]);
        Port.fnWritePort();

        Delay(50);

        for(int i=0;i<=255;i++)
        {
            for(int j=0;j<=31;j++)
            {
                buffer[j]=Buf[i*32+j];
            }
            Port.SetBuffer(&buffer[0]);
            Port.fnWritePort();
            Delay(50);
            m_progressBar.SetPos(i);
        }

        ::PostMessage((HWND)param,
            WM_WRITE_COMPLETED,0,0);

        break;
    }
}

return 0;
}
void CDrop::OnPort()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    CWinApp *App;
    App=::AfxGetApp();

    if(Port.m_pComName=="COM1")
        Select_port.m_port=0; else Select_port.m_port=1;
    if(Select_port.DoModal()==IDOK)
    {
        App->WriteProfileInt("Settings","port",
            Select_port.m_port);
        ::AfxMessageBox("Зміни набудуть чинності після перезапуску
        програми",ERROR);
    }
}

LONG CPort::OnConnection_Established(WPARAM wParam,LPARAM lParam)
{

```

```
m_progressBar.SetPos(0);
Read_Enable=true;
Write_Enable=true;
ConnectionEstablished=true;

return 0;
}

LONG CDrop::OnReadCompleted(WPARAM wParam,LPARAM lParam)
{
    Read_Enable=true;
    Write_Enable=true;

    m_progressBar.SetPos(0);
    CString text;
    text.Format("%s",Buf);
    int length=text.GetLength();
    text.Delete(8192,length-8192);
    m_rich_edit.SetWindowText(text);

    return 0;
}

LONG CDrop::OnWriteCompleted(WPARAM wParam,LPARAM lParam)
{
    m_progressBar.SetPos(0);
    Read_Enable=true;
    Write_Enable=true;
    return 0;
}
```



ДОДАТОК І ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний геолог

ГПУ "Полтавагазвидобування"

А. Й. Куль

2003р.

АКТ

впровадження результатів науково-дослідних робіт по темі №243/01

Ми, що нижче підписалися, нач. геологічного відділу ГПУ "Полтавагазвидобування" Гаракевич О. І. з одного боку і відповідальний виконавець г/д №243/01 Кісіль Р. І. і виконавець г/д №243/01 Горелов В. О. з другого боку склали даний акт в тому, що протягом з 02.01.2002р. по 30.04.2003р. були проведені науково-дослідні роботи по вибору типу поверхнево-активних речовин і їх концентрацій у розчинах для проведення обробок привибійних зон нафтових експлуатаційних свердловин №111 і №500 Яблунівського нафтогазо-конденсатного родовища (НГКР), №209 Більського НГКР і №57 Чутівського НГКР. В процесі проведення експериментальних досліджень використовувалися газовий конденсат як основа розчину для проведення обробок, а також проби таких ПАР: Мірол-1, Жирінокс і Ріпокс-6. Вибір типу ПАР і його концентрації у розчинах газового конденсату здійснювався за допомогою приладу для вимірювання поверхневого натягу ВПНО-1. В процесі проведення досліджень готовилися такі концентрації вказаних вище ПАР у газовому конденсаті: 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%. На основі отриманих залежностей вимірюного за допомогою приладу ВПНО-1 поверхневого натягу від концентрації вказаних ПАР у газовому конденсаті для проведення обробок найбільш оптимальним є ПАР типу Ріпокс-6, так як розчини з ним при відповідних концентраціях мають найнижчий поверхневий натяг на границі розділу з повітрям (22-28мН/м), який майже у 2 рази є меншим, ніж для інших вказаних ПАР.

За оптимальну концентрацію Ріпоксу-6 у газовому конденсаті для проведення обробок привибійних зон свердловин № 111, 57, 209, 500 вибрано концентрацію 5%, так як при подальшому збільшенні концентрації Ріпоксу-6 у газовому конденсаті поверхневий натяг такого розчину практично не зменшується і подальша добавка Ріпоксу-6 у розчин газового конденсату вже не приводе до одержання кращого результату від проведення обробки ним привибійних зон нафтових свердловин.

Нач. геологічного відділу ГПУ
"Полтавагазвидобування"

Відповідальний виконавець
г/д №243/01

Виконавець г/д №243/01

Гаракевич О. І.

Кісіль Р. І.

Горелов В. О.