

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Чуйко Михайло Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.2.08
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Дослідження процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл
ємнісним методом**
(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка
(назва освітньої програми)

175 – «Інформаційно-вимірювальні технології»
(шифр і назва спеціальності)

М.Г. Чуйко

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Кононенко Марина Андріївна, к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

О. Є. Середюк

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

Рецензент

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

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

Івано-Франківськ, 2024 р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 175- Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

О.Є. Середюк

« » 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Чуйку Михайлу Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл ємнісним методом

керівник роботи Кононенко Марина Андріївна, к.т.н, доц.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “03” 12.2024 року № 787/7

2. Строк подання студентом роботи 25.12.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Крайовий кут змочування в діапазоні 0-180°C, поверхневий натяг рідин в діапазоні 20-100мН/м

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ТА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

3. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

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

1. Моделювання змочувальних властивостей параметрів системи “тверде тіло – рідина - газ”;

2. Розподіл шарів системи та еквівалентні схеми ємнісної комірки;

3. Структурна схема пристрою контролю процесу змочування;

4. Інтерпретація результатів вимірювання в середовищі MatLab з зазначенням кутів нахилу

5. Оцінка процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл у бальній шкалі;

6. Схема нагромадження сумарної невизначеності.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
нормоконтроль	Білішук В.Б., доц каф. ІВТ		

7. Дата видачі завдання 02.12.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз методів контролю змочування рідинами поверхонь твердих тіл</i>	06.12.2024	
2.	<i>Розроблення методу та пристрою контролю процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл</i>	11.12.2024	
3.	<i>Метрологічний аналіз пристрою процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл</i>	16.12.2024	
4.	<i>Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи</i>	20.12.2024	
5.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу магістерської роботи</i>	23.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Чуйко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Кононенко М.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

В магістерській роботі на тему «Дослідження процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл ємнісним методом»: 67 с., 23 рис., 1 табл., 41 джерело, 6 аркушів креслень.

Об'єктом дослідження є процес контролю ступеня змочування та розтікання рідин поверхнями твердих тіл.

Предметом дослідження є методи і засоби контролю процесу змочування та розтікання рідини поверхнею твердого тіла.

Мета роботи – розроблення методу і пристрою експрес-контролю змочувальних властивостей різноманітних рідин при розтіканні їх досліджуваною твердою поверхнею.

РІДИНА, ТВЕРДЕ ТІЛО, КРАЙОВИЙ КУТ ЗМОЧУВАННЯ,
РОЗТІКАННЯ, ЄМНІСНИЙ МЕТОД, ІМПЕДАНС

ABSTRACT

In the master's thesis on the topic "Study of the wetting process of solid surfaces by liquids using the capacitive method": 67 p., 23 fig., 1 table, 41 sources, 6 sheets of drawings.

The object of the study is the process of controlling the degree of wetting and spreading of liquids on the surfaces of solid bodies.

The subject of the study is the methods and means of controlling the process of wetting and spreading of liquids on the surface of a solid body.

The purpose of the work is to develop a method and device for express control of the wetting properties of various liquids when they spread on the studied solid surface.

LIQUID, SOLID, CONTACT ANGLE, SPREADING, CAPACITIVE
METHOD, IMPEDANCE

ЗМІСТ

	Ст.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ.....	10
1.1 Фізичні основи змочування рідинами поверхонь твердих тіл	10
1.2 Аналіз методів визначення крайового кута змочування	14
1.3 Постановка задачі на магістерську роботу	19
2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ТА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ.....	21
2.1 Математичне моделювання процесу змочування і розтікання.....	21
2.2 Взаємозв'язок поверхневих натягів твердого тіла і рідини та їх діелектричними проникностями.....	28
2.3 Дослідження зміни електричних параметрів системи в процесі розтікання рідини поверхнею твердого тіла.....	31
2.4 Дослідження стану поверхні твердого тіла на процес розтікання рідини.....	34
2.4.1 Дослідження впливу шорсткості твердої поверхні на процес розтікання рідини.....	34
2.4.2 Дослідження впливу неоднорідності твердих поверхонь на процеси змочування	35
2.4.3 Дослідження впливу нерівності твердої поверхні на параметри ємнісної комірки	39
2.5 Динаміка форми краплі при нанесенні на поверхнею твердого тіла.....	39
2.6 Розроблення структурної схеми пристрою контролю ступеня змочуваності рідинами поверхонь твердих тіл.....	42
2.7 Розроблення програмного забезпечення пристрою для визначення ступеня змочуваності рідинами твердих поверхонь	45
2.8 Розроблення методики проведення вимірювання та оцінки	48

результатів контролю.....	
2.9 Експериментальні дослідження процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл ємнісним методом.....	50
3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ.....	55
3.1 Схема нагромадження сумарної невизначеності розробленого пристрою змочування рідинами твердих поверхонь	55
3.2 Складові інструментальної невизначеності пристрою	57
3.3 Методичні складові невизначеності	61
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	64

ВСТУП

Актуальність

Особливості взаємодії дотичних фаз грає вагому роль у багатьох сферах промисловості та діяльності людини: у нафтогазовидобуванні впливає на інтенсифікацію видобутку; при капілярній дефектоскопії у неруйнівному контролі чи технічній діагностиці; у хімічній промисловості, коли мова йде про виготовлення пестицидів та гербіцидів; при фарбуванні тканин чи створенні непромокаючих матеріалів у текстильній промисловості; у сфері друкарства для забезпечення якісного друку; при створенні захисних покриттів та у медичній сфері при виготовленні імплантів.

При дослідженні змочування поверхні твердого тіла рідиною, в більшій мірі, до уваги беруть саме параметри рідин, при цьому ідеалізуючи тверде тіло, тобто не враховують певні характеристики твердого тіла, тобто (поверхневу неоднорідність, його шорсткість) і характер взаємодії системи "тверде тіло-рідина-газ", що залежить від того середовища, що володіє значнішою поверхневою енергією.

Вимірювання крайового кута змочування за існуючими методами проводиться у статичному режимі, що не дає можливість контролювати динаміку розтікання рідини поверхнею твердого тіла, тобто проводити експрес-контроль процесу розтікання, що і є основною характеристикою змочування.

Тому є актуальним розроблення методу експрес-контролю ступеня змочування та процесу розтікання рідини поверхнею твердого тіла.

Мета і завдання роботи

Метою магістерської роботи є розроблення методу і пристрою експрес-контролю змочувальних властивостей різноманітних рідин при розтіканні їх досліджуваною твердою поверхнею.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- на основі аналізу методів визначення крайового кута змочування визначити основні підходи для можливості визначення кількісної

оцінки параметрів, що відображають поведінку поверхонь при змочуванні та розтіканні рідиною поверхнею твердого тіла;

- здійснити математичне моделювання процесу змочування рідиною твердої поверхні на основі дослідження швидкості розтікання, яка реєструватиметься у ємнісній комірці за рахунок зміни діелектричних властивостей рідини і твердого тіла;
- здійснити дослідження зміни електричних параметрів системи в процесі розтікання рідини поверхнею твердого тіла;
- розробити конструкцію пристрою, що реалізовує розроблений метод контролю;
- розробити систему оцінювання ступеня змочування рідинами твердої поверхні за кутом нахилу прямої розтікання
- здійснити метрологічний аналіз розробленого пристрою.

Об'єктом дослідження є процес контролю ступеня змочування та розтікання рідин поверхнями твердих тіл.

Предметом дослідження є методи і засоби контролю процесу змочування та розтікання рідини поверхнею твердого тіла.

Методи дослідження. Математичне та фізичне моделювання процесів змочування та розтікання рідин на поверхні твердих тіл проводилося з використанням теорії капілярних явищ Лапласа, молекулярної теорії провідників та діелектриків, теорії електричних полів та теорії гідродинаміки. Математичне моделювання сумарної невизначеності при контролі процесу розтікання базувалося на основних положеннях концепції невизначеності та застосуванні методу структурного аналізу сумарної невизначеності.

Наукова новизна магістерської роботи полягає у визначенні залежності між крайовим кутом змочування, поверхневим натягом та діелектричними властивостями рідини при розтіканні поверхнею досліджуваного зразка твердого тіла за зміною електричних характеристик контрольованої системи, що забезпечує експресний режим контролю властивостей змочування контактуючих фаз.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розроблені пристрою проведення експрес-контролю ступеня змочування досліджуваною рідиною поверхні твердого тіла із застосуванням ємнісного методу та градацію якості рідин за їх змочувальними властивостями згідно розробленої шкали оцінювання.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

1.1 Фізичні основи змочування рідинами поверхонь твердих тіл

Переважаючою властивістю рідин по відношенню до твердих тіл є їх здатність до змочування. Коли крапля рідини наноситься на тверду поверхню, одна рідина розтікається по поверхні твердого тіла, якщо вона змочується, тоді як інша зменшує площу контакту, якщо вона не змочується (рис. 1.1) [1-4]:

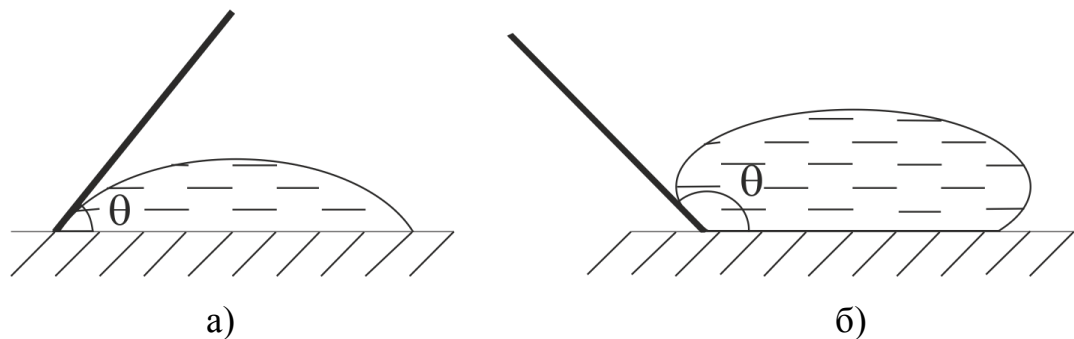


Рисунок 1.1 – Крапля рідини на змочуючій (а) та незмочуючій (б) поверхнях

Різна поведінка цих рідин пояснюється різною фізико-хімічних природою факторів у рідинах і твердих тілах. Якщо взаємодія між молекулами в рідині менша, ніж взаємодія, що відбувається на лінії контакту з твердим тілом, рідина може змочувати тверду фазу, і тверде тіло можна назвати тіло з високоенергетичною поверхнею. І навпаки, якщо взаємне притягання між молекулами рідини перевищує взаємодію на межі розділу рідина-тверде тіло, крапля не змочує поверхню, і тверде тіло класифікується як тіло з низькоенергетичною поверхнею. Низькоенергетична поверхня –це матеріал, поверхнева енергія якого не перевищує 100 мН/м [4, 5], тоді як поверхні, поверхнева енергія яких перевищує це значення, називаються високоенергетичними поверхнями. Згідно з цією класифікацією, часто вважають, що низький поверхневий натяг рідини є достатнім для змочування

твердого тіла. Однак це твердження не зовсім коректне. Змочування твердих тіл відбувається тоді, коли робота адгезії більша за поверхневий натяг рідини. Змочуваність кількісно вимірюється крайовим кутом змочування, який залежить від поверхневого натягу контактуючих фаз [1-4, 6-8].

Зазвичай краєвий кут змочування вимірюють між лінією контакту рідина-тверде тіло і дотичною до поверхні рідини в точці трифазного контакту «тверде тіло-рідина-газ» через об'єм рідини (рис. 1.1). Залежно від величини крайового кута розрізняють такі типи змочування [7]:

- повне змочування, при якому крайовий кут близький до нуля і рідина розтікається тонкою плівкою твердою поверхнею;

- змочування: крайовий кут знаходиться в межах $0^\circ < \theta < 90^\circ$ і відповідно є гострим;

- незмочування: крайовий кут знаходиться в межах $90^\circ < \theta < 180^\circ$ і відповідно є тупим;

Так як на лінії контактуючих фаз будь-якої природи завжди відбувається взаємодія, то крайовий кут завжди буде $< 180^\circ$, що заперечує існування явища повного незмочування.

Поверхневий натяг γ як механічна величина описує роботу по утворенню нових одиничних поверхонь за рахунок розтягування попередньої поверхні. З термодинамічної точки зору, поверхневий натяг σ - це сумарний залишковий термодинамічна енергія поверхні, яка описує роботу по утворенню нових одиниць поверхні шляхом розділення двох контактуючих, або вільну поверхневу енергію, утворену одним і тим же матеріалом [6, 7]. У рівноважних рідинах ці величини і потенціали еквівалентні. Однак при дослідженні нерівноважних рідин і твердих тіл існують певні відмінності у значеннях.

У рівноважних рідинах γ і σ величини еквівалентні. Однак при дослідженні нерівноважних рідин та твердих тіл існують певні відмінності у значеннях γ і σ , тому при визначенні поверхневого натягу даних матеріалів необхідно точно розділяти і розрізняти, яке значення (γ чи σ) необхідно визначити для конкретного методу контролю [6].

Найпростішим прикладом, що відображає зміст терміну «поверхневий натяг», є метод розтягування мильної плівки на рамі з однією рухомою стороною l , шляхом прикладання постійної сили до рухомої ланки [6]. Після того, як відома кількість роботи, виконаної при переміщенні рухомої сторони на певну відстань dx , поверхневий натяг можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$\gamma = \frac{A}{ldx} . \quad (1.1)$$

Поняття «вільної поверхневої енергії» можна також проілюструвати за допомогою методу здування мильної бульбашки (зменшення її площі) і, таким чином, відбувається зменшення тиску всередині. Зв'язок між зміною тиску ΔP , поверхневої енергії γ та радіусом мильної бульбашки r виражається наступним співвідношенням [7]:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} . \quad (1.2)$$

Як змочування, так і адгезія описують процес взаємодії між двома фазами, що контактують. Різниця між даними термінами є в тому, що адгезія виявляє характер взаємодії між рідиною і твердим тілом, тоді як змочування є результатом цієї взаємодії.

Термін адгезія відноситься до взаємодії поверхневих шарів на межі розділу між контактуючими фазами [1, 8]. Адгезія зумовлюється природою контактуючих фаз, властивостями поверхонь та площею контакту. Вона визначається міжмолекулярними силами притягання і посилюється в результаті капілярної конденсації пари, коли один або два об'єкти заряджаються, а при контакті об'єктів утворюються донорно-акцепторні зв'язки [9]. Між молекулами адгезиву (рідини) і субстрату (твердого тіла) можуть виникати найрізноманітніші сили, починаючи від найслабших дисперсійних сил і закінчуючи силами хімічної природи. Таким чином, міжмолекулярні або хімічні сили відповідають за адгезійне з'єднання шарів. Хімічні властивості та

здатність адгезиву і субстрату до взаємодії відіграють вирішальну роль в адгезії [9, 10].

Багато видатних вчених вивчали змочувальні властивості рідин. Одним з перших, хто вивчив це явище і описав специфічні капілярні явища, був Гук (кінець 17 ст.); на початку 17ст. Жуен вивів перший кількісний закон капілярних явищ, якийс тверджує, що між висотою стовпа рідини в капілярі і його діаметром існує обернена залежність і що відношення цих величин є постійним і називається капілярною сталою виведено Також в середині цього століття Зейнер описав форму крапель на незмочених поверхнях, а в 1804 році Юнг ввів поняття рівноважного кураєвого кута змочування і встановив, що цей кут фундаментально залежить від співвідношення міжмолекулярним притяганням молекул рідини і твердого тіла домолекул рідини. Паралельно з Юнгом Лаплас розробив загальну теорію капілярів, довівши, що вигнута форма меніска в капілярі зумовлена змочуванням, яке викликає додатковий тиск, що піднімає стовпчик рідини в капілярі до стану рівноваги. Більш ніж через півстоліття Гіббс вивів таку ж формулу для крайового кута змочування на основі термодинамічних законів. Крім того, термодинамічний підхід дав поштовх розвитку адсорбційних властивостей деяких рідині, враховуючи роботу Ребіндера про вплив полярностіна змочуваність, привів до розвитку таких областей, як поверхнево-активні речовини і майбутніх промислових застосувань. Наступний етап дослідження змочуваності характеризується контролем змочувальних властивостейрізних систем за різних зовнішніх умов (варіюванням як фізичних параметрів, так і хімічних реакцій або під час розчинення). Видатні вчені, так і як Фрумкін, Делугін, Зісман, Фоуксі Нейман, займалися і продовжують займатися питаннями змочуваності.

На сьогодні найбільш вивченими є поверхні розділу фаз твердетіло-рідина-газ та рідина-рідина. Існує ряд методів і методик вимірювання поверхневого і міжфазного натягу цих середовищ, які експериментально вивчалися і розвивалися, починаючи з 18 століття. Дослідження меж поділу фаз твердетіло-газ і твердетіло-рідина почалися значно пізніше. Це пов'язано з тим,

що в твердих тілах присутні багато факторів, які відсутні в більшості рідин, що робить самі методи вимірювання і встановлення достовірності отриманих результатів дуже складними. Наприклад, при вимірюванні поверхневого натягу твердого тіла необхідно враховувати шорсткість поверхні досліджуваного зразка матеріалу. Але з іншого боку, шліфування або полірування поверхні не тільки підвищує гладкість поверхні, але і призводить до зміни властивостей поверхневого шару, тобто до зміни величини поверхневого натягу. Неоднорідна структура твердих тіл також має значний вплив на величину поверхневого натягу. Наявність різних домішок, вакансій і дислокацій призводить до порушення нормальної структури кристалічної решітки твердого тіла. А притаманні їй нерівності призводять до того, що ви отримуєте значення для одного конкретного зразка, а не для конкретного типу матеріалу.

Поряд зі змочуваністю останнім часом стрімко розвиваються дослідження швидкості розтікання як характеристики кінетичного закону змочування [11-13]. Цей інтерес пов'язаний з тим, що швидкість взаємодії між твердими тілами і рідинами дуже часто залежить від швидкості розтікання.

1.2 Аналіз методів визначення крайового кута змочування

Загалом, всі методи визначення крайового кута змочування (ККЗ) можна розділити на дві групи: прямі та непрямі методи (опосередковані) [34]. Прямі методи безпосередньо вимірюють величину ККЗ. Непрямі методи використовують рівняння або закони, які описують взаємозв'язок крайового кута з іншими величинами, що визначаються під час експерименту.

Прямі методи визначення крайового кута змочування - це методи, які здійснюються шляхом безпосереднього вимірювання крайового кута форми краплі на кутовій шкалі [1,6]. Ці вимірювання можна проводити в реальному часі за допомогою оптичних систем, фотографуючи форму краплі або проектуючи її на екран [8,14-15].

При цьому методі похибка знаходиться в межах $0,1^\circ$. При використанні невеликих кількостей рідини об'єкт контролю поміщають всередину термостата, щоб обмежити процес вимірювання в часі через випаровування і уникнути зовнішніх впливів. Для в'язких рідин слід вимірювати кут, утворений на пластині або циліндрі, частково зануреному в рідину. Використання цього методу пов'язано з тим, що час, необхідний для досягнення рівноваги краплі, що лежить, набагато більший, ніж час рівноваги пластини (циліндра).

Іншим прямим методом вимірювання кута змочування є нахил пластинки, зануреної в рідину [2,16]. Суть цього методу полягає в наступному. Пластинку поміщають у рідину і нахиляють під певним кутом. Після цього рідина контактує з твердим тілом строго горизонтально (рис. 1.2). Для гідрофобних поверхонь пластин сума крайового кута змочування і кута нахилу становить 180° (рис. 1.2 а), а при змочуванні твердого тіла рідиною критичний кут збігається з кутом нахилу (рис. 1.2 б). Після визначення кута нахилу пластини визначається відповідний крайовий кут:

$$\theta_1 = 180^\circ - \alpha_1 \text{ при } \theta > 90^\circ, \quad (1.3)$$

$$\theta_2 = \alpha_2 \text{ при } \theta < 90^\circ. \quad (1.4)$$

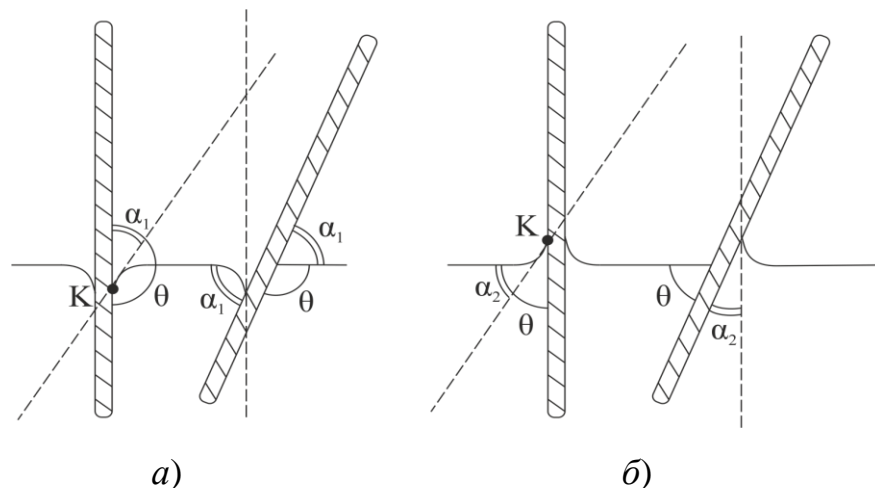


Рисунок 1.2 – Вимірювання крайового кута змочування методом нахилених пластин: а) для гідрофобних пластин; б) для гідрофільних пластин

Іншим методом прямого вимірювання є стікання краплі по пластині для визначення кутів натікання і відтікання [8,16]. Цей метод здійснюється

наступним чином: крапля наноситься на пластину, яка поступово нахилиється до тих пір, поки крапля не почне рухатися вздовж досліджуваної поверхні. Крайовий кут, що утворюється перед краплею, називається кутом натікання, а кут, що утворюється за краплею, називається кутом відтікання (рис. 1.3). Ці кути використовуються для опису гістерезису явищ змочування твердого тіла.

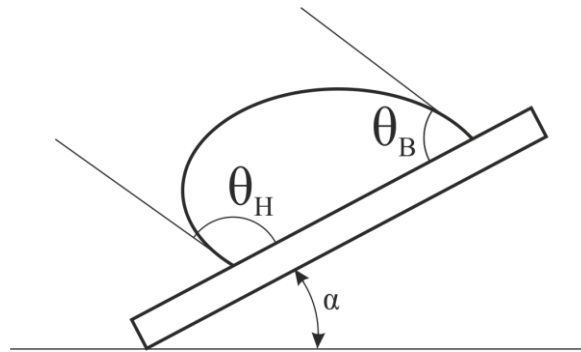


Рисунок 1.3 – Кути натікання θ_H і відтікання θ_B

Перший опосередкований метод визначення кута змочування ґрунтується на рівнянні Юнга, яке є фундаментальним законом змочування для рівноважних систем. Значення поверхневого натягу σ_{mz} , σ_{mp} , σ_{pz} підставляють у співвідношення та визначають значення θ . Недоліком цього методу є те, що дуже часто не усі значення поверхневого натягу контактуючих фаз відомі через складність його визначення. Також можна визначити ККЗ, використовуючи як інформативний параметр висоту піднесення поверхневого шару рідини, що прилягає до стінки пластини або посудини (рис. 1.4).

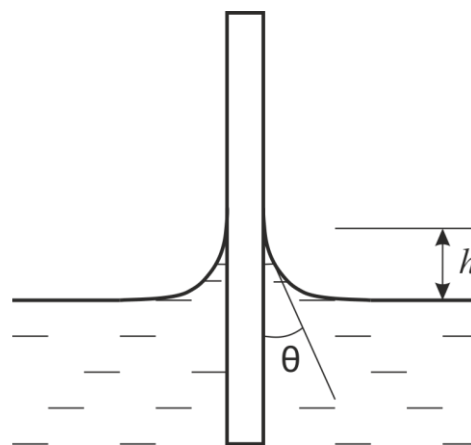


Рисунок 1.4 – Висота підняття рідини, яка прилягає до пластини

Розрахункова формула є наступною [6, 16]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\rho g h^2}{2\sigma}, \quad (1.3)$$

де ρ - густина рідини, σ - поверхневий натяг рідини, g - прискорення вільного падіння.

Точність вимірювання цим методом за умов, коли можна точно виміряти висоту підйому ($\sim 10^{-4}$ см), становить $0,1^\circ$ [16], і його відносять до високоточних методів вимірювання. Недоліком цього методу є те, що для занурення пластини потрібна достатня кількість рідини. Значення крайового кута можна також розрахувати, використовуючи основні параметри лежачих крапель [2, 17, 18] (рис. 1.5).

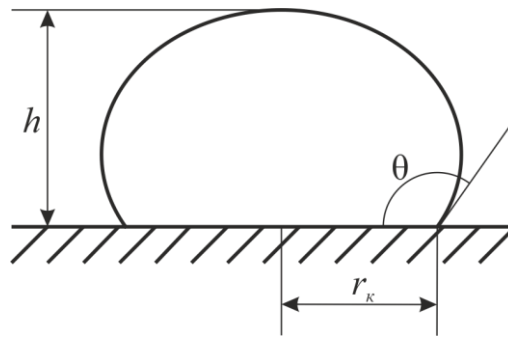


Рисунок 1.5 – Параметри лежачих крапель

Для визначення кута θ використовують такі залежності [2, 18]:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2hr_k}{r_k^2 - h^2}, \quad \text{при } \theta < 90^\circ, \quad (1.4)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sqrt{2hr_k - h^2}}{r_k - h}, \quad \text{при } \theta > 90^\circ, \quad (1.5)$$

де h - висота краплі, r_k - радіус лінії контакту «тверде тіло – рідина».

При дослідженні крапель малих розмірів нехтують силою тяжіння і вважають, що крапля має напівсферичну форму, а формула має вигляд [19]:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h}{r_k}. \quad (1.6)$$

Похибка цього методу зумовлена неточністю вимірювання параметрів краплі та асиметрією її форми.

Метод занурення (метод Вільгельмі) базується на зміні ваги пластинки, зануреної в досліджувану рідину [6, 7]. За рахунок впливу властивостей поверхні пластинка втягується (у випадку гідрофільних поверхонь) або виштовхується (у випадку гідрофобних поверхонь) по периметру змочування, збільшуючи або зменшуючи загальну вагу пластинки. Крім того, на пластину діють архімедові сили виштовхування. У випадку гідрофільних поверхонь, прирівнюючи вплив сили тяжіння і змочувальних властивостей, з одного боку, і сил виштовхування, з іншого, отримуємо наступну залежність [7]:

$$L\sigma_{pe} \cos \theta = \rho Shg - \Delta mg, \quad (1.7)$$

де L - периметр змочування, ρ - густина рідини, S - площа поперечного перерізу, h - глибина занурення, Δm - різниця маси сухої та частково зануреної пластини.

Звідки визначаємо значення θ :

$$\cos \theta = \frac{g(\rho Sh - \Delta m)}{L\sigma_{pe}}. \quad (1.8)$$

Глибину занурення можна виміряти за допомогою катетера.

Середня точність вимірювання цим методом становить $0,5^\circ$. Залежно від величини крайового кута, точність вимірювання може становити $0,1^\circ$, якщо використовується порожнистий циліндр.

Крайовий кут також можна виміряти, використовуючи підйом рідини в капілярі. Особливістю цього методу є те, що капіляр повинен бути виготовлений з твердого матеріалу, який може встановити висоту рідини в капілярі h відносно рівня рідини в посудині [2,6-8]. У цьому випадку величина ККЗ визначається за допомогою наступного рівняння:

$$\cos \theta = \frac{h \cdot r \cdot \Delta \rho \cdot g}{2\sigma}, \quad (1.9)$$

де r — внутрішній радіус капіляра.

1.3 Постановка задачі на магістерську роботу

В результаті аналізу наведених вище методів визначення ККЗ, який характеризує змочувальні властивості рідини відносно твердого тіла, можна зазначити, що: метод визначення величини ККЗ прямим вимірюванням, незважаючи на простоту його реалізації, є високоточним лише за наявності якісної оптики. Основним недоліком цього методу є те, що ККЗ змінюється внаслідок випаровування рідини при тривалих вимірюваннях; основною перевагою фізико-механічних методів вимірювання ККЗ є те, що, незважаючи на їх складність, процес вимірювання може бути автоматизований, але завжди існує методична невизначеність.

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити такий висновок, що під час досліджень рідина контактує з твердим тілом і стан її поверхні значною мірою визначає характер цієї взаємодії. Тому при контролі характеристик змочування доцільно не тільки враховувати параметри рідкої фази, але й звертати особливу увагу на властивості твердої поверхні, що контролюється. Це дає можливість оцінити саме загальну якість змочування, а не кількісні показники.

Виходячи з даної ситуації, запропоновано застосовувати комплексну оцінку ступеня змочування на основі такого параметра як швидкість розтікання рідини твердою поверхнею контрольованого тіла, оскільки ця фізична величина залежить від таких величин як: змочуваність рідиною твердої поверхні контрольованого тіла, поверхневих натягів твердого тіла та рідини, в'язкості рідини, шорсткості твердої поверхні.

Тому для вирішення поставленої задачі необхідно вирішити наступні завдання:

- здійснити математичне моделювання процесу змочування рідиною твердої поверхні на основі дослідження швидкості розтікання, яка реєструватиметься у ємнісній комірці за рахунок зміни діелектричних властивостей рідини і твердого тіла;

- здійснити дослідження зміни електричних параметрів системи в процесі розтікання рідини поверхнею твердого тіла;
- розробити структурну схему пристрою, що реалізовує розроблений метод контролю;
- розробити систему оцінювання ступеня змочування рідинами твердої поверхні за кутом нахилу прямої розтікання
- здійснити метрологічний аналіз розробленого пристрою.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ТА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

Для того, щоб змоделювати процес змочування, необхідно розглянути і об'єднати процеси змочування і розтікання беручи до уваги фізичну взаємодію контактуючих фаз і зміну механічних, енергетичних і електричних параметрів контактуючих фаз.

2.1 Математичне моделювання процесу змочування і розтікання

Величина адгезії визначається відокремленням однієї фази від іншої фази, тобто поверненням їх у початковий стан до контакту (рис. 2.1 а) [1, 4]. Якщо контактуючими фазами є два твердих тіла (адгезія частинок), то величина їх взаємодії (W_a) може бути визначена шляхом визначення зовнішньої сили (F_e), прикладеної для їх розділення.

$$W_a = \frac{F_e}{S}, \quad (2.1)$$

де S - площа розриву.

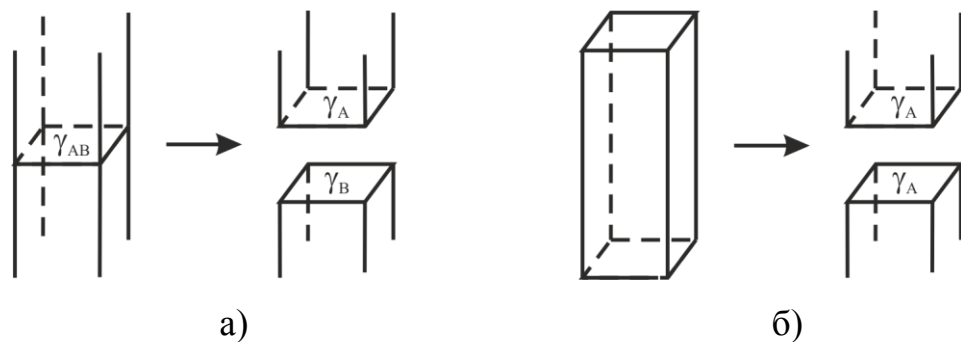


Рисунок 2.1 – а) робота адгезії (для різних фаз); б) робота когезії (для однакових фаз)

На межі поділу фаз тверде тіло-рідина сили адгезії визначаються роботою, що виконується для розділення контактуючих фаз (робота адгезії), оскільки до рідини не можна прикласти силу, яка б не деформувала краплю або не змінила площу контакту. Оскільки площа контакту S рідин і твердих тіл

можуть відрізнятись, робота визначається множенням роботи адгезії на площу контакту [1-4].

$$W_a = \frac{W}{S}. \quad (2.2)$$

З термодинамічної точки зору рівноважний стан краплі на твердій поверхні (рис. 2.2 - крапля на твердій поверхні) описується рівнянням Юнга [1-4]:

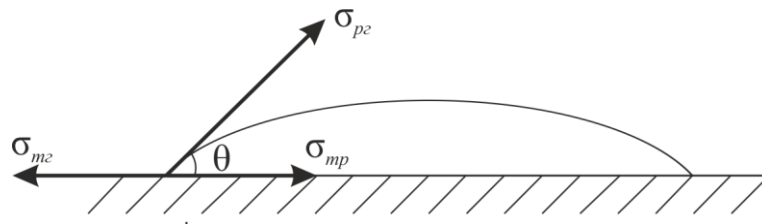


Рисунок 2.2 – Крапля рідини на поверхні твердого тіла

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{mg} - \sigma_{mr}}{\sigma_{rg}}, \quad (2.3)$$

де θ - крайовий кут змочування, σ_{mg} , σ_{mr} , σ_{rg} – поверхневі натяги відповідно на межі розділу фаз «тверде тіло – газ», «тверде тіло – рідина» та «рідина-газ» (Н/м).

Адгезія рідини щодо твердого тіла може бути описана рівнянням Дюпре, яке визначає роботу заміни поверхонь тверде тіло-рідина на поверхні тверде тіло-пара і рідина-пара[1, 6]:

$$W_a = \sigma_{mg} + \sigma_{rg} - \sigma_{mr}. \quad (2.4)$$

Рівняння Дюпре (2.4) у сукупності із рівнянням Юнга (2.3) дає:

$$W_a = \sigma_{rg}(1 + \cos \theta). \quad (2.5)$$

Віддаляючись на невелику відстань від межі поділу фаз (на відстань, що трохи перевищує діаметр молекули) в глибину рідини, адгезійні зв'язки замінюються когезійними зв'язками. Іншими словами, взаємодія тут відбувається не між зовнішніми молекулами контактуючих фаз, а в об'ємі рідини між частинками з однаковими властивостями. У цьому випадку мова

йде не про роботу адгезії, а про роботу когезії, тобто роботу з утворення двох нових однакових поверхонь рідина-газ (рис.2.1 б), яка визначається рівнянням:

$$W_k = 2\sigma_{pc}. \quad (2.6)$$

Робота адгезії - це не тільки параметр властивостей поверхні (поверхневий натяг, крайовий кут змочування), але і з точки зору розриву молекулярних зв'язків [2]. Для випадку роз'єднання двох твердих поверхонь, існує така залежність:

$$W_a = -\frac{A}{12\pi H^2}, \quad (2.7)$$

де A - константа молекулярної взаємодії, або константа Ван-дер-Ваальса, H - відстань між контактуючими фазами.

При дослідженні роботи адгезії рідини щодо твердої поверхні, на відміну від обох твердих поверхонь, варто враховувати взаємодію між поверхневими молекулами і вплив молекул, що є в об'ємі контактуючих середовищ поблизу зони контакту:

$$W_a = -\frac{0,6A}{\pi H^2}. \quad (2.8)$$

Через різну природу молекулярних зв'язків адгезійна робота може складатися з декількох складових, залежно від ваги впливу:

$$W_a = W_a^d + W_a^h + W_a^p + W_a^i + W_a^\pi + W_a^{da} + W_a^e, \quad (2.9)$$

де степеневі індекси вказують на певні зв'язки: d - взаємодія дисперсійна Лондона, h - зв'язок водневий, p - диполь-дипольна взаємодія, i - взаємодія індукційна, π - π -зв'язок, da - зв'язок донорно-акцепторний, e - взаємодія електростатична.

Розтікання можна вивчати за його швидкістю, тобто за зміною в часі радіуса площі контакту краплі з твердим тілом. Якщо не враховувати силу тяжіння, що діє на краплю в процесі розтікання (при дослідженні дуже малих об'ємів рідини), то рівняння для швидкості розтікання має вигляд [1]:

$$\frac{dr_k}{d\tau} = \frac{2\Delta E m}{\pi r \eta r_k^3}, \quad (2.10)$$

де ΔE - зменшення вільної енергії при розтіканні, m - маса краплі, ρ - густина рідини, η - в'язкість.

Якщо врахувати гравітаційний ефект, то це рівняння можна записати як:

$$\frac{dr_k}{d\tau} = \frac{2\Delta E m}{\pi r \eta r_k^3 \chi} + \frac{m^2 g}{\pi r \eta r_k^4 \chi}, \quad (2.11)$$

де χ - коефіцієнт, що враховує форму краплі.

Розтікання можна також оцінити за зміною форми та площі плями розтікання на базі залежності поверхневої енергії твердого тіла від інтенсивності його змочування рідиною, що призводить до зміни вільної енергії [1, 4]:

$$\Delta E = \Delta \sigma \cdot S, \quad (2.12)$$

де $\Delta \sigma$ - різниця залишкової поверхневої енергії до і після змочування; S - площа контакту.

Однак це рівняння справедливе для плоских нескінченних поверхонь. Але в даному випадку мова йде про пластину певного малого скінченного розміру, покриту певним об'ємом краплі, тобто використовуються контактні фази обмеженого розміру з певними межами, що впливають на величину зміни поверхневої енергії, тому використовувати рівняння (2.12) не можна. Однак з термодинамічної точки зору рівняння (2.12) для повного змочування твердого тіла рідиною в присутності газової фази (одна з основних вимог до капілярної дефектоскопії) можна записати в наступному вигляді [6]:

$$\Delta E = -(P_2^p - P_1^p)V + \frac{1}{3}S^{p_2}(\sigma_2^{m_2} - \sigma_1^{p_2}) + \sum(\sigma_2^i S_2^i - \sigma_1^i S_1^i) + \sum(\mu_i^2 - \mu_i^1)m_i, \quad (2.13)$$

де P - тиск; V - об'єм; S - площа поверхні; μ_i^1 і μ_i^2 - хімічний потенціал; m_i - число молей i -го компонента; «1» позначає початковий стан системи, а «2» - кінцевий стан, індекси «т», «р» і «г» позначають відповідну фазу системи.

Для неповного змочування твердої поверхні об'ємом рідини зміна вільної енергії становить:

$$\Delta E = -(P_2^p - P_1^p)V + \frac{1}{3}[\sigma_2^{mp} S_2^{mp} - \sigma_1^{mp} S_1^{mp} + (\sigma_1^{m_2} - \sigma_2^{p_2})S^{m_2}] + [\sigma_2^{p_2} - \sigma_1^{p_2}]S_1^{p_2} + \sum(\mu_i^2 - \mu_i^1)m_i. \quad (2.14)$$

Саме другий і третій доданки в рівняннях (2.13) і (2.14) визначають зміну вільної енергії під час змочування, перший доданок характеризує зміну тиску пари рідини, а останній доданок пов'язаний з хімічним потенціалом контактуючих фаз.

Процес розтікання краплі є двовимірним, і область змочування в ідеалі можна розглядати як коло. Час, необхідний для розтікання рідини по твердій поверхні, зазвичай становить від десятків секунд до декількох хвилин. У цьому випадку розтікання відбувається відповідно до так званої області гідродинамічної в'язкості, де радіуси плям розтікання є рівними [4]:

$$r = (4 \cdot \Delta\sigma \cdot m / \chi' \cdot \pi \cdot \rho \cdot \eta)^{1/4} \cdot t^{1/4}, \quad (2.14)$$

де r — радіус краплі у певний момент часу t ; $\Delta\sigma = \sigma_{m.z.} - \sigma_{m.p.} - \sigma_{p.z.}$ — рушійна сила на одиниці довжини периметра змочування при повному змочуванні рідини, m — маса краплі, що розтікається; χ' — коефіцієнт, що приблизно рівний 10, який враховує підвищення сил тертя в рідині через присутність кутових складових швидкості її потоку (оскільки кожен елементарний струмінь при русі по радіусу одночасно розширюється); ρ — густина рідини; η — в'язкість рідини.

Параметр $\Delta\sigma$ відповідає S_p — коефіцієнту розтікання, який є термодинамічною властивістю змочувальної здатності рідини, тобто $\Delta\sigma = S_p$, але, зазвичай, не можливо обчислити цю величину безпосередньо, оскільки значення $\sigma_{m.z.}$ і $\sigma_{m.p.}$ є невідомими.

У випадку рідини, що випаровується, в рівнянні (2.14) замість m потрібно замінити $m - m_i$, де m — маса рідини, щонаноситься на поверхню; m_i — маса частини рідини, яка випаровується в процесі розтікання, що можна визначити зважуванням або розрахунком за рівняннями [6]:

$$m_i = a \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2 \cdot \Delta t_i, \quad (2.15)$$

де a — експериментально визначена питома швидкість випаровування рідини, тобто маса рідини, яка випаровується з одиничної площі поверхні за одиницю

часу; n — кількість вимірювань радіусу (діаметру, площі) плями розтікання; Δt_i — проміжок часу між i -м і $(i - 1)$ -м вимірюваннями розміру плями; r_i — радіус плями в i -й момент вимірювання.

Змочувальну здатність слід визначати шляхом порівняння досліджуваної рідини з еталонною рідиною. У цьому випадку двох рідин (рідина 1 і рідина 2), змочувальні здатності яких порівнюються, за допомогою рівняння (2.14) можна отримати наступну залежність:

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{\Delta\sigma_1 \cdot m_1 \cdot \rho_2 \cdot \eta_2}{\Delta\sigma_2 \cdot m_2 \cdot \rho_1 \cdot \eta_1} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1/4}. \quad (2.16)$$

Спростивши дане рівняння та використавши відношення $\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \frac{S_{p1}}{S_{p2}}$ і ввівши додаткову поправку на випаровування рідини, отримуємо [20]:

$$\frac{S_{p1}}{S_{p2}} = \frac{r_1^4}{r_2^4} \cdot \frac{\rho_1 \cdot \eta_1}{\rho_2 \cdot \eta_2} \cdot \frac{m_2 - m_{2i}}{m_1 - m_{1i}} \cdot \frac{t_2}{t_1}, \quad (2.17)$$

де S_{p1} , S_{p2} — коефіцієнти розтікання 1 і 2 рідин; r_1 , r_2 — радіус плями розтікання 1 і 2 рідин за час t_1 і t_2 ; ρ_1 , ρ_2 — густини рідин; η_1 , η_2 — в'язкість рідин; m_1 , m_2 — маса крапель рідин в момент нанесення, яку можна визначити по формулі $m = \rho \cdot V$, де V — фіксований об'єм краплі рідини; m_{1i} , m_{2i} — маса рідин, що випаровується за час розтікання $(t_2 - t_1)$.

Залежність (2.17) дозволяє оцінити змочуваність рідини за розміром плями розтікання краплі з урахуванням впливу густини, в'язкості та випаровування рідини.

При нанесенні краплі рідини на тверду поверхню динаміка її розтікання залежить від властивостей рідини (поверхневого натягу σ , густини ρ , в'язкості μ), початкового діаметра D краплі сферичної форми, швидкості нанесення краплі u_0 , поверхневої енергії γ (гідрофобності або гідрофільності підкладки), зміни кута контакту θ і прискорення вільного падіння g . Ці величини відіграють важливу роль у керуванні динамікою розповсюдження-відскоку краплі. Також, кут контакту між рідиною і твердим тілом впливає на

гідродинаміку поблизу рухомої лінії контакту, що, в свою чергу, впливає на розтікання і площу контакту [21].

Аналіз розмірностей наведених вище параметрів показує, що характеристики розтікання краплі, в тому числі динамічний крайовий кут, визначаються наступними чотирма безрозмірними критеріями подібності, а саме: капілярне число, яке характеризує швидкість переміщення лінії трифазного контакту (ЛТК) [22] і зазвичай використовується для дослідження динаміки крайового кута [23, 24]; критерій Вебера (разом з фізичними властивостями рідини, що визначаються швидкістю удару краплі до поверхні); критерій Бонда (співвідношення між силою тяжіння і поверхневим натягом), критерій Лапласа (відображає вплив в'язкості на розтікання краплі, тобто її динаміку) [25,26]:

$$Ca = \frac{\mu u}{\sigma}, \quad We = \frac{\rho u_0^2 D}{\sigma}, \quad Bo = \frac{g D^2 \rho}{\sigma}, \quad Lp = \frac{\rho \sigma D}{\mu^2}. \quad (2.18)$$

Діаметр краплі досліджуваного розчину визначають візуально або гравіметричним (ваговим) методом. При гравіметричному методі діаметр краплі розраховують за формулою [25]:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \rho N}}, \quad (2.19)$$

де m - сумарна маса N крапель.

Похибка гравіметричного методу становить менше 8%. У візуальному методі діаметр краплі, що падає, вимірюється шляхом програмного опрацювання фотографії; точність вимірювання визначається параметрами відеокамери (близько 5%). Кут рівноваги крапель також визначається програмно. Швидкість удару краплі з підкладками розраховували за рівнянням [25]:

$$u_0 = \frac{L}{\Delta t}, \quad (2.20)$$

де L - відстань від підкладки до нижньої границі краплі, що відіривається від капіляра, Δt - часу падіння краплі до зіткненням з підкладкою.

Для опису залежності моментного радіуса плями розтікання від часу – $r(t)$ можна застосовувати наступну залежність [26]:

$$\bar{r}(t) = \sqrt{1 - \exp(-a\bar{t}^b)}, \quad (2.21)$$

де $r=r/r_e$ – відносний радіус плями контакту рідини, $t = t/t_e$ - відносний час, t_e - час встановлення зрівноваженого крайового кута, a і b - безрозмірні характеристики, розраховані шляхом мінімізації функціоналу F (дисперсії значень розрахункової константи a) при зміні b :

$$F = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^k |a_i - \bar{a}|, \quad (2.22)$$

де k - кількість оброблених кадрів, $a_i = -\frac{\ln(1 - \bar{r}_i^2)}{\bar{t}_i^b}$, $\bar{a} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i$. Мінімізація функціоналу F досягається методом сполучених градієнтів за допомогою алгоритму нелінійної оптимізації.

Швидкість переміщення лінії трифазного контакту розраховується шляхом диференціювання по часу (2.21) [25, 26]:

$$\bar{u}(\bar{t}) = \frac{d\bar{r}}{d\bar{t}} = \frac{ab\bar{t}^{b-1}}{2} \frac{\exp(-a\bar{t}^b)}{\sqrt{1 - \exp(-a\bar{t}^b)}}, \quad (2.23)$$

Для розрахунку капілярного числа Ca використовується взаємозв'язок швидкості розтікання від часу.

Наведений вище критерій подібності дозволяє задавати початкові умови нанесення рідини на тверду поверхню з урахуванням її фізико-механічних властивостей, забезпечувати рівномірне розтікання рідини для контролю процесом змочування системи «тверде тіло-рідина-газ».

2.2 Взаємозв'язок поверхневих натягів твердого тіла і рідини та їх діелектричними проникностями

Робота адгезії W_a на межі поділу фаз тверде тіло–рідина визначається параметрами міжмолекулярних взаємодій і, як уже було вказано, чисельно виражається співвідношенням:

$$W_a = \sigma_{mz} + \sigma_{pz} - \sigma_{mp}, \quad (2.24)$$

яке можна подати у наступному вигляді, врахувавши рівняння Юнга:

$$W_a = \sigma_{pz}(1 + \cos \theta). \quad (2.25)$$

Оскільки площі контакту рідини і твердого тіла на межі поділу фаз можуть відрізнятися, то робота, що виконується за одиницю часу, визначається множенням роботи адгезії на швидкість зміни площі контакту. [1, 4].

$$W = W_a \cdot \frac{S}{t}. \quad (2.26)$$

Ще врахувавши те, що поляризаційні властивості діелектриків визначаються дисперсійними силами, то залежність між макроскопічною поверхневою енергією та мікроструктурою діелектрика можна подати наступним чином [27]:

$$W = \frac{2N^2 h e (sZ)^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{3}{2}}}{64(m)^{\frac{1}{2}} r^2}, \quad (2.27)$$

де N – концентрація молекул; h – стала Планка ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), e – заряд електрона ($e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$), m – маса електрона ($m = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$), s – валентність, Z – кількість вільних електронів, α – поляризованість, r – міжмолекулярна відстань.

Крім того між поляризованістю молекули α та діелектричною проникністю речовини існує взаємозв'язок, що можна описати залежністю Клаузіуса-Мосотті [1010]:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{\alpha N_A}{3\varepsilon_0}, \quad (2.28)$$

де ε – діелектрична проникність, M – молярна маса, ρ – густина, N_A – число Авогадро ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} / \text{моль}$), ε_0 – абсолютна діелектрична проникність ($\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$).

Із рівняння (2.28) виражаємо значення α :

$$\alpha = \frac{3\varepsilon_0 M (\varepsilon - 1)}{N_A \rho (\varepsilon + 2)}, \quad (2.29)$$

Оскільки специфіка взаємодії контактуючих фаз визначається властивостями поверхні, що чисельно визначаються поверхневою енергією, а завданням адгезії є подолання цієї енергії для утворення окремих поверхонь за одиницю часу, то рівняння (2.26) і (2.27) можна прирівняти і отримані шляхом підстановки наступну залежність:

$$\sigma_{pz}(1 + \cos \theta) \cdot \frac{S}{t} = \frac{2N^2 h e (sZ)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{3\varepsilon_0 M (\varepsilon - 1)}{N_A \rho (\varepsilon + 2)} \right)^{\frac{3}{2}}}{64(m)^{\frac{1}{2}} r^2}, \quad (2.30)$$

З наведених співвідношень можна отримати рівняння, що відображають зв'язок між ККЗ і поверхневим натягом рідини σ_{pz} й діелектричною проникністю ε :

$$\cos \theta = \frac{N^2 h e (sZ)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{3\varepsilon_0 M (\varepsilon - 1)}{N_A \rho (\varepsilon + 2)} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot t}{32(m)^{\frac{1}{2}} r^2 \sigma_{pz} \cdot S} - 1, \quad (2.31)$$

У наведених співвідношеннях деякі величини є константами, а деякі постійними для окремо взятої речовини, тому їх співвідношення можна замінити наступним коефіцієнтом:

$$k_\alpha = \frac{N^2 h e (sZ)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{3\varepsilon_0 M}{N_A \rho} \right)^{\frac{3}{2}}}{32(m)^{\frac{1}{2}} r^2}, \quad (2.32)$$

Отже залежність (2.31) набуде вигляду:

$$\cos \theta = \frac{k_\alpha \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot t}{\sigma_{pz} \cdot S} - 1, \quad (2.33)$$

Отримані залежності чітко відображають зв'язок між кутом змочування та поверхневим натягом і діелектричними властивостями рідини, що дозволяє врахувати особливості взаємодії контактуючих середовищ (швидкість розтікання) і теоретично встановити можливість визначення ступеня

змочуваності поверхні твердого тіла за рахунок зміни діелектричних властивостей рідини і твердого тіла.

2.3 Дослідження зміни електричних параметрів системи в процесі розтікання рідини поверхнею твердого тіла

При розтіканні рідини по твердій поверхні відбувається перерозподіл зарядів рідини і твердого тіла. Коли система тверде тіло-рідина-газ розміщується між обкладками конденсатора, утворюється так звана «ємна комірка». Діелектриком може бути повітря (якщо рідина і тверде тіло є провідниками), повітря і непровідна рідина (якщо тверде тіло є провідником), повітря, рідина і тверде тіло (якщо рідина і тверде тіло є діелектриками).

Процес розтікання рідини можна оцінити за зміною параметрів цієї комірки, одним з яких є ємність [28], що є основою ємнісного методу. Для теоретичного обґрунтування цього методу необхідно встановити зв'язок між параметрами розповсюдження та зміною ємності ємнісної комірки, в якій знаходиться досліджувана система.

При дослідженні ємнісним методом процесів змочування, заснованих на динаміці розтікання рідини по твердій поверхні, зміни об'єму і форми крапель рідини, що наносяться, і повітряного зазору викликають перерозподіл різних типів середовищ, що знаходяться між обкладками конденсатора. Якщо швидкість потоку рідини, що наноситься на тверде тіло, постійна, тобто динаміка об'єму рідини однакова, то характеристикою, що визначає зміну повного імпедансу ємнісної комірки, є зміна форми краплі рідини, яка в основному визначається характеристиками змочування рідини по відношенню до твердого тіла, і діелектричною проникністю всіх середовищ, що знаходяться між обкладками конденсатора.

На рис. 2.3 показана досліджувана система «тверде тіло-рідина-газ», де простір між пластинчастими електродами можна розглядати як гетерогенний діелектрик, що складається з шарів рідини, повітря і твердого тіла. Кожен шар

міжпластинкового простору може бути представлений набором конденсаторів і резисторів, з'єднаних паралельно і послідовно один з одним [29, 30].

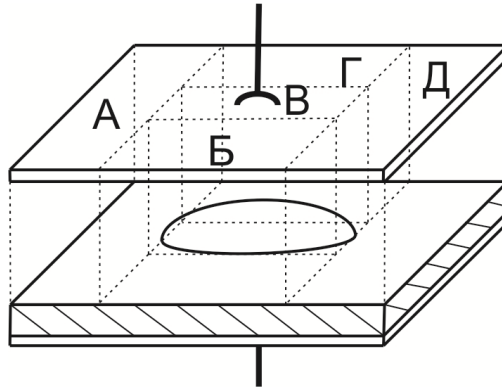


Рисунок 2.3 – Система «тверде тіло - рідина - газ» що знаходяться між обкладками конденсатора

У цьому випадку області А, Б, Д, Г з'єднані паралельно і представляють собою повітряний і твердий послідовно розміщені прошарки, в той час як область В представляє послідовно розміщені середовища повітряного, рідкого і твердого прошарків.

Для дослідження повної ємності вимірювальної комірки, що містить досліджувану систему, її можна представити загальною еквівалентною схемою, що наведена на рисунку 2.4.

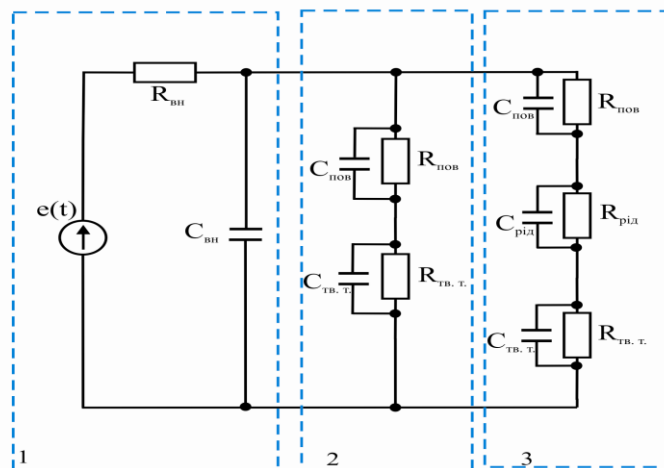


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема системи «тверде тіло - рідина - газ» що знаходяться між обкладками конденсатора

Для спрощення цієї загальної схеми еквівалентності можна використати схему заміщення. Ідеальну комірку ємності (рис.2.5,а), що містить циліндричні краплі на твердій поверхні, можна представити так, як показано на рис. 2.5,б.

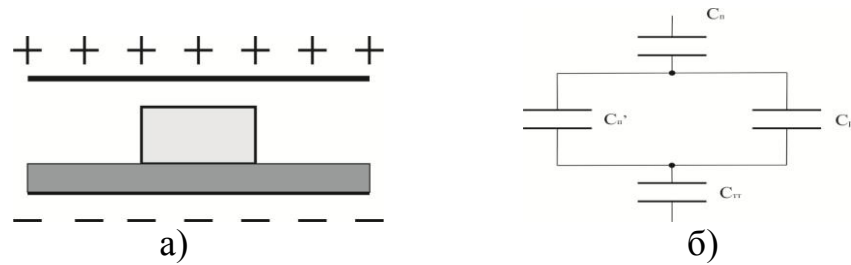


Рисунок 2.5 – а) ідеалізоване зображення ємнісної комірки з нанесеною краплею рідини, б) еквівалентна схема з'єднання конденсаторів ємнісної комірки

Для наведеної схеми розміщення конденсаторів формула розрахунку сумарної ємності $C_{заг}$ є:

$$C_{заг.1} = C_n + \frac{C'_n \cdot C_p}{C'_n + C_p} + C_{mm}; \quad (2.34)$$

де C_n - ємність повітряного прошарку над краплиною, C'_n - ємність повітряного прошарку біля краплі рідини, C_p - ємність краплини рідини, C_{mm} - ємність діелектричного твердого тіла.

У випадку провідних матеріалів розподіл ємності комірки та її еквівалентної схеми при заміні послідовно і паралельно з'єднаних конденсаторів виглядає наступним чином (рис. 2.6):

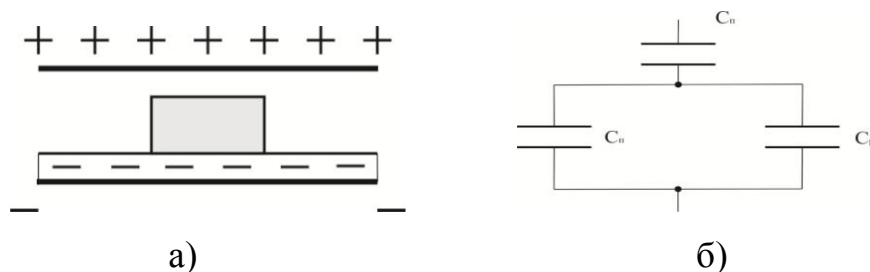


Рисунок 2.6 – а) ідеалізоване зображення ємнісної комірки з нанесеною краплею рідини на зразок провідного твердого тіла, б) еквівалентна схема з'єднання конденсаторів ємнісної комірки

У цьому випадку формула для повної ємності $C_{заг.2}$ конденсатора має вигляд:

$$C_{заг.2} = C_n + \frac{C'_n \cdot C_p}{C'_n + C_p} \quad (2.35)$$

Різниця у наведеній вище формулі є додатковою складовою ємності, що вноситься твердим діелектриком, який досліджується, по відношенню до провідника.

2.4 Дослідження стану поверхні твердого тіла на процес розтікання рідини

2.4.1 Дослідження впливу шорсткості твердої поверхні на процес розтікання рідини

Як уже згадувалося, стан поверхні твердого тіла значною мірою визначає особливості процесу розтікання рідини по цій поверхні. На відміну від ідеально гладких поверхонь, реальні тверді тіла мають досить складну мікронерівність, що характеризується виступами і заглибленнями різної форми і розмірів. З термодинамічної точки зору, нерівності поверхні твердих тіл впливають на крайовий кут змочування, оскільки нерівності збільшують фактичну поверхню в порівнянні з ідеалізованою. Відношення фактичної площі до ідеалізованої (гладкої) описується K – коефіцієнтом шорсткості, який за величиною більший від 1. З іншого боку, якщо нерівності поверхні розглядати як випадкове розташування канавок з рівнобедреними трикутниками в поперечному перерізі і глибиною z , які також можна назвати одиничними елементами шорсткості (рис.2.7), то характер поширення рідини по твердій поверхні буде залежати від орієнтації цих канавок відносно напрямку поширення рідини. Якщо ці орієнтації збігаються, то з кінематичної точки зору рідина вільно розтікатиметься по твердій поверхні.

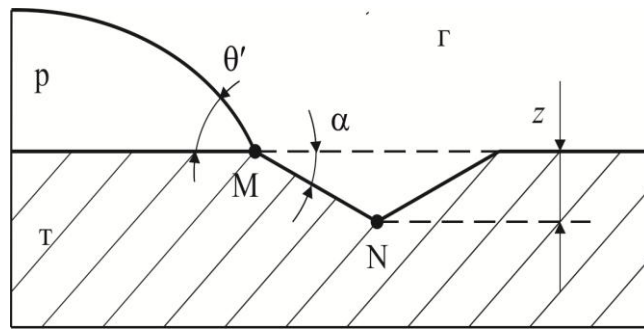


Рисунок 2.7 – Вплив нерівності твердої поверхні на процес розтікання

Якщо рідина переміщається перпендикулярно до напрямку канавки: у момент, коли рідина потрапляє в канавку, площа контакту між рідиною і твердим тілом різко збільшується, ніж коли рідина тече по гладкій горизонтальній поверхні. Поверхневий натяг діє під кутом $(\theta' - \alpha)$, до нового напрямку розповсюдження MN, де θ' – динамічний ККЗ, α – це кут нахилу канавки, як показано на рисунку 2.8. Умова для подолання рідини канавки є наступна: $\theta' > (\theta + \alpha)$, де θ - рівноважний ККЗ. У випадку $\theta' < (\theta + \alpha)$ канавка являє собою бар'єр, який може бути перетнутий лінією трифазного контакту тільки за наявності зовнішніх впливів (наприклад, вібрації) або досить сильних коливань поблизу цієї лінії [31].

Розглядаючи тверду поверхню як систему регулярних нерівностей (взаємно перпендикулярних або паралельних канавок, концентрично розташованих виступів синусоїдального профілю), було показано, що гістерезис ККЗ залежить як від параметрів змочування фаз, що контактують, так і від показників стану твердої поверхні. Мова іде про висоти гребенів і глибини западин, нахилу (кута α) шорсткості, відстані між складовими шорсткості та об'єму нанесеної рідини.

2.4.2 Дослідження впливу неоднорідності твердих поверхонь на процеси змочування

У той час як кінетика змочування однорідних гладких поверхонь добре вивчена, змочування неоднорідних поверхонь все ще викликає деякі питання,

оскільки різна змочуваність матеріалів спричиняє викривлення ліній контакту. Неоднорідність викликана двома факторами: відмінностями в кристалічній структурі та відмінностями в хімічному складі [32].

Неоднорідна поверхня - це плоска поверхня твердого тіла, яка містить різні матеріали з різними крайовими кутами змочування. Ця поверхня являє собою сукупність круглих точок – включень, що поводять себе як дефекти на поверхні твердого основного матеріалу. Розглянемо випадок, коли кут змочування поверхні основного матеріалу рідиною θ_0 менший за кут змочування включень θ_e . Різницю крайових кутів добре видно на рисунку 2.8. Дані включення - це перешкоди, які заважають рідині рівномірно розтікатися по поверхні твердого тіла, яка подається шприцом з постійною швидкістю потоку. Зміна змочуваності вимірюється як різниця між коефіцієнтом розтікання дефекту-включення і основного матеріалу.

$$\Delta S = S_e - S_0 = \sigma_{pe} \cdot (\cos\theta_e - \cos\theta_0), \quad (2.36)$$

де S_e - коефіцієнт розтікання окремих включень-дефектів, S_0 - коефіцієнт розтікання основного матеріалу, σ_{pe} - поверхневий натяг нанесеної рідини.

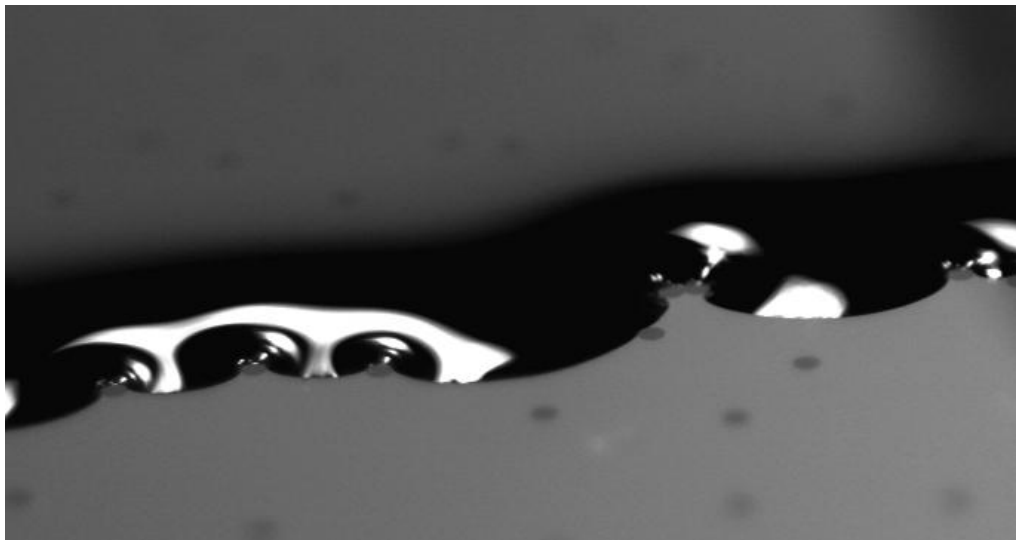


Рисунок 2.8 – Вплив неоднорідності твердої поверхні на процес розтікання рідини

Для оцінки величини змочування дефектів застосовується безрозмірна величина f , що розраховується наступним чином [32 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$f = \frac{d\Delta S}{\sigma_{pe} e}, \quad (2.37)$$

де d - діаметр включення-дефекта, e - товщина краплі.

На рис. 2.9 показано деформацію лінії контакту біля дефекту. Для кількісної оцінки деформації до лінії контакту було проведено дві горизонтальні дотичні із подальшим вимірюванням значень Y_{\min} та Y_{\max} . Максимальне відхилення деформованої лінії пропорційне розміру дефекту d . Коли $f < 0,5$; при $0,5 < f < 1$ деформація лінії контакту зростає із зростанням площі дефекту, що приводить до зростання його поверхневої енергії, при $f > 1$, дефект охоплює лінію контакту та залишається незмочений рідиною. Для дефектів з низькою енергією поверхні: лінія контакту приймає форму дефекту. Ця форма може бути охарактеризована геометричним параметром – кутом відштовхування. Цей кут вимірюється як кут між двома дотичними лінії контакту по обидва боки від дефекту, точка перетину яких є центром лінії контакту, прикладеної до дефекту (потрійна лінія контакту). Цей кут визначається перед тим, як потрійна лінія починає наближатися до дефекту. Цей кут відштовхування є постійним для невеликих дефектів.

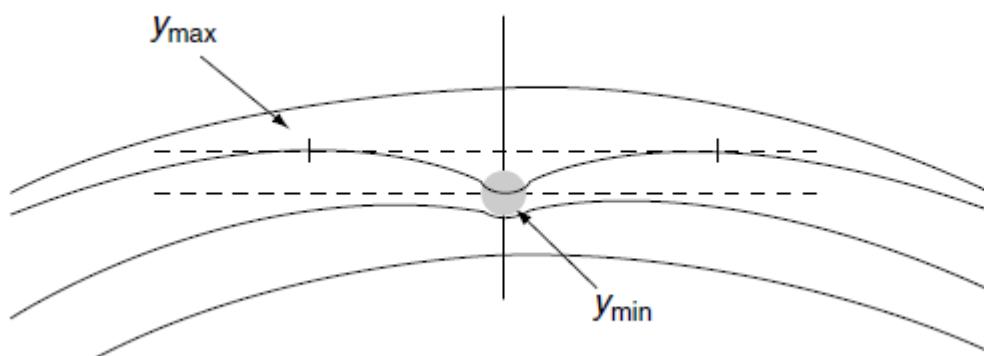


Рисунок 2.9 – Деформація лінії контакту на дефекті

На деформацію лінії контакту також сильно впливає щільність розсіювання включень. Якщо віддаленість між дефектами є більшою за капілярну довжину α , то дефекти діють як окремі точки затримки на лінії стику і залишаються набором дуг, але їх довжина розподілена випадковим чином [33].

$$a = \left(\frac{2\sigma_{p2}}{\rho g} \right)^{1/2}. \quad (2.38)$$

Зі збільшенням щільності дефектів і з зменшенням середньої відстані між дефектами менше d , дефекти стають колективно діяти на лінії контакту. При щільності дефектів, коли віддаль між дефектами дорівнює $2d$, середня лінія контакту двох дефектів деформується як у випадку одного великого дефекту, а при відстанях менше $2d$ – включення-дефекти утворюють кластери ліній контакту. Наступне збільшення щільності дефектів означає, що середня відстань між дефектами зменшується, тому нерівномірність лінії контакту спадає, оскільки утворюються кластери із більшою кількістю дефектів.

Якщо концентрація включень дуже низька, деформація контактної лінії відбувається лише в місцях включень-дефектів, при цьому кожне включення впливає на форму контактної лінії, збільшуючи сумарну довжину контактної лінії. При збільшенні щільності дефектів зміни довжини контактної лінії відбуваються в менших масштабах. Як наслідок, процес поширення не може бути проаналізований простим порівнянням фактичного положення ліній ТФК на поверхні твердого тіла, оскільки загальна форма реальної краплі часто дуже відрізняється від форми кола. У цьому випадку зміну форми лінії контакту для різних щільностей дефектів-включень кількісно оцінюють, апроксимуючи їх правильними багатокутниками.

Навіть якщо рідина наноситься з постійною швидкістю, але форма лінії контакту не є просторово регулярною. Рух відбуватиметься у напрямку, де лінія контакту має найменший опір. Оскільки дефекти випадково розподілені на твердій поверхні, тому сумарна сила вздовж лінії трифазного контакту відмінна від нуля [33].

Коли лінія контакту перетинає дефект, її локальна швидкість руху більша за середню швидкість поширення краплі і може бути визначена геометричними розмірами дефекту і ККЗ [33].

2.4.3 Дослідження впливу нерівності твердої поверхні на параметри ємнісної комірки

Вплив нерівності твердого тіла полягає у збільшенні ефективної площі ємнісної комірки, що призводить до зростання ефективної напруги між пластинами конденсатора, тобто між двома протилежними поверхнями контрольованої системи тверде тіло-рідина-газ. Це збільшення пропорційне квадрату площі контакту і має складну кореляцію з варіацією довжини і шорсткістю [34].

Таким чином, середнє значення напруженості електричного поля зростає і ємність між рідкою та твердою поверхнями збільшується [35].

Зокрема, якщо крапля товщиною t розтікається по твердій поверхні, утворюючи при цьому обмежувальний контур довільної форми, то ємність конденсатора, утвореного двома поверхнями, визначається наступною залежністю [35]:

$$C = \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right) \frac{C_0}{2} \left[1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \frac{C_0 \cdot z}{4\pi\varepsilon_1 t} \ln(1 - k^2)\right]^{-1}, \quad (2.39)$$

де $k = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - діелектричні проникності рідини і твердого тіла відповідно,

C_0 - ємність шару рідини без впливу нерівної поверхні твердого тіла, якою вона розтікається, тобто при однорідному за діелектричною проникністю середовищі розтікання (Φ), h - товщина діелектрика (м).

2.5 Динаміка форми краплі при нанесенні на поверхнею твердого тіла

Від моменту удару краплі в поверхню і до набуття нею її рівноважної форми спостерігаються коливальні зміни основних параметрів розтікання краплі.

Для визначення впливу в'язкості і поверхневого натягу на особливості розтікання порівнюються результати досліджень рідин з різним поверхневим натягом і низькою в'язкістю і навпаки. У [25], були досліджені явища нанесення, розтікання і відштовхування крапель для п'яти рідин: води, етиленгліколю, пропіленгліколю, гліцерину і оцтового ангідриду. Як тверді поверхні використовували два типи речовин: тефлон (гідрофобний матеріал) і скло (гідрофільний матеріал).

Рисунок 2.10 зображає серію схематичних ілюстрацій крапель (нанесення, максимальне розтікання, максимальний відскік і остаточна рівновага), що демонструють різну поведінку крапель на гідрофобній підкладці з числом Вебера близьким 20.

Властивість змочування твердої основи відіграє вагомую роль у визначенні максимального розтікання рідини по її поверхні. Під час фази відскоку змочувальна здатність підкладки відіграє домінуючу роль у процесі формування поверхні краплі. Дистильована вода сильніше відскакує на тефлоновій підкладці, ніж на скляній, викликаючи кілька коливань поверхні перед досягненням рівноваги її форми. Гліцерин, завдяки своїй порівняно високій в'язкості, відскакує дуже слабо і його форма коливається менше. Краплі пропіленгліколю створюють затухаючі відскоки, але насправді демонструють більш виражені коливання форми, ніж гліцерин.

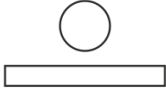
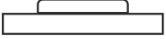
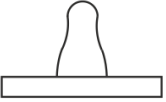

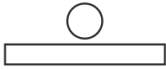
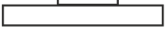

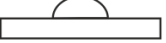




Рідини	Перед нанесенням	Максимальна швидкість	Максимальний відскок	Стан рівноваги
Дистильована вода				
Пропілен гліколь				
Гліцерин				

Рисунок 2.10-Схема поведінки краплі рідини в момент нанесенні на гідрофобну основу при числі Вебера близько 20

Поєднання низького поверхневого натягу та низької в'язкості призводить до найвищого коефіцієнта розтікання. Якщо в'язкість однієї рідини значно вища за в'язкість іншої, навіть якщо вони мають однакові значення поверхневого натягу, максимальний коефіцієнт розтікання рідини з меншою в'язкістю буде значно вищим за максимальний коефіцієнт розтікання другої рідини. Той факт, що максимальні коефіцієнти розтікання двох рідин з більшою в'язкістю дуже низькі, свідчить про те, що в'язкість відіграє певну роль в протидії розповсюдженню та розтіканню рідини на поверхні твердого тіла.

На основі аналізу поведінки крапель під час випробувань можна сказати, що низький поверхневий натяг сприяє розтіканню і послаблює відскок. Однак висока в'язкість послаблює як розтікання, так і відскок. Змочування поверхні має значний вплив на взаємодію краплі з поверхнею твердого тіла. Це означає, що при певному числі Вебера гідрофобні поверхні характеризуються сильнішим відскоком, ніж гідрофільні поверхні для всіх рідин.

Отже, процес розтікання можна охарактеризувати як: зміна форми нанесеної краплі, збільшення площі поширення і розтікання, ті відповідно перерозподіл середовища твердого тіла-рідини-газу в ємнісній комірці, що призводить до зміни її загальної ємності.

Для дослідження та встановлення ступеня змочування рідинами твердих тіл ємнісним методом запропоновано проводити на основі аналізу кута нахилу кривої розтікання. Згідно з запропонованим методом для серії контрольованих рідин результати вимірювань градуують, розбиваючи діапазон зміни кута нахилу на п'ять ділянок, для яких використовують бальну систему оцінки ступеня змочуваності:

- 1 бал - низька змочуваність;
- 2 бали - середньо-низька змочуваність;
- 3 бали - середня змочуваність;
- 4 бали – середньо-висока змочуваність;

5 балів - висока змочуваність.

Однак, слід зазначити, що ця запропонована шкала справедлива для окремого твердого зразка. Так як, діелектрична проникність зумовлена природою твердого тіла і її значення може змінюватися від одиниць до десятків одиниць, то початкове значення імпедансу сухого зразка буде різне, а для деяких зразків (особливо з високою діелектричною проникністю) зміна ємності внаслідок розтікання рідини по поверхні може «загубитися» на фоні її початкових значень ємності. Тому при застосуванні цього методу правильніше говорити про якість змочування різними рідинами одного і того ж зразка твердого тіла .

2.6 Розроблення структурної схеми пристрою контролю ступеня змочуваності рідинами поверхонь твердих тіл

Для практичної реалізації ємнісного методу було розроблено структурну схему пристрою, яка наведена на рисунку 2.11. Основними складовими елементами конструкції пристрою для вимірювання ступеня змочуваності твердої поверхні різними рідинами є:

1- вимірювальний блок, який являє собою паралельний пластинчастий конденсатор, де розташовується зразок твердого тіла. У конденсаторі верхня пластина жорстко закріплена, а нижня розміщена на поверхні підіймального столу, що переміщається з метою контролю різних товщин контрольованих твердих тіл;

2- захисний екран: для зменшення впливу зовнішніх полів і перешкод;

3 - вимірювальний перетворювач: плата AD 5432 (Analogue Devices);

4 - дозатор: шприц об'ємом 1 мм³, який використовується для подачі необхідної кількості досліджуваної рідини при постійній швидкості потоку.

5 – передавальний механізм, що перетворює обертальний рух валу крокового двигуна в поступальний рух поршня дозатора.

6 – кроковий двигун (ШИП 20), для автоматичної подачі рідини.

- 7 – блок управління двигуном;
 8 - цифро-аналоговий перетворювач
 9 - персональний комп'ютер з програмним додатком, що дозволяє здійснювати керування двигуном та вимірювальним перетворювачем.

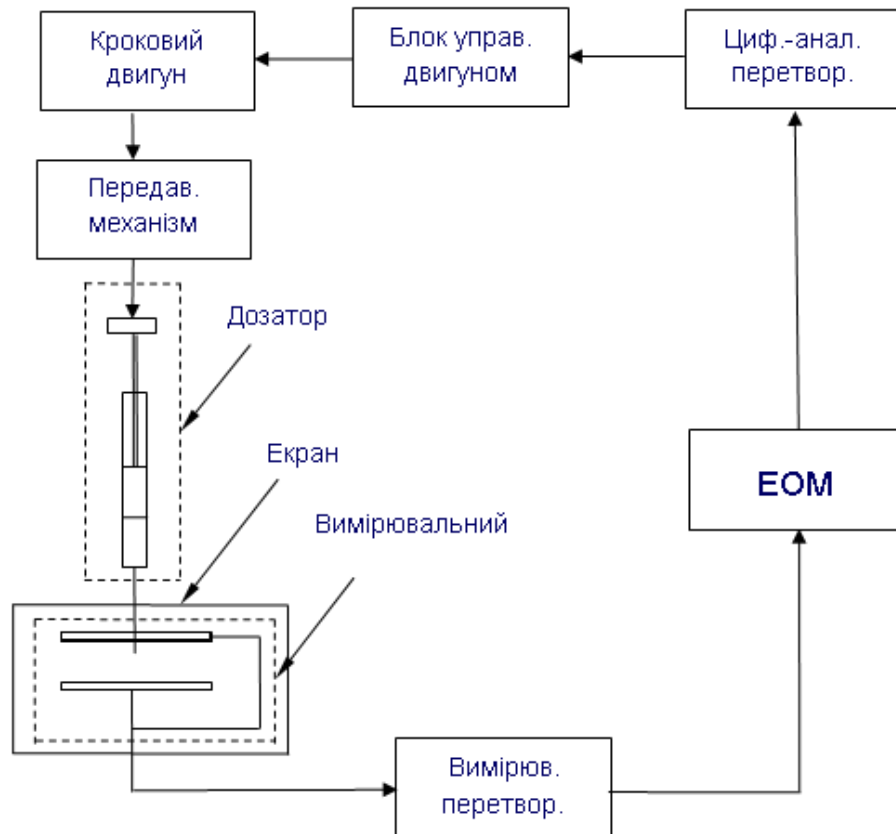


Рисунок 2.11 – Структурна схема пристрою контролю змочуваності рідинами твердих поверхонь

Механічним вузлом розробленого пристрою є комбінація наступних елементів, а саме: вимірювальний блок 1, екран 2, дозатор 4 та передавальний механізм 5.

Вимірювальний блок 1, де між пластинами розташовується досліджувана система «тверде тіло-рідина», захищений екраном 2. Певна кількість рідини наноситься на поверхню досліджуваного зразка за допомогою дозатора (шприца) 3. Автоматична подача крапель заданого об'єму рідини здійснюється за допомогою передавального механізму 5 кроковим двигуном 6. Дискретний

рух поршня дозатора здійснюється блоком керування двигуном 7 через цифро-аналоговий перетворювач 8, що підключений до комп'ютера 9. Одночасно з дозуванням рідини вимірюється зміна ємності перетворювачем 3, з якого сигнал надходить на персональний комп'ютер 9.

Конструкція розробленого пристрою забезпечує захист від зовнішніх електричних полів, а також швидку заміну зразків досліджуваної поверхні.

Перед початком вимірювань у розробленому пристрої необхідно визначити робочу частоту. Це зумовлено тим, що у приладі для вимірювання ступеня розтікання рідин на твердій поверхні використано в якості вимірювального перетворювача стандартну плату AD5433 [36], яка здатна вимірювати імпеданс на частотах в діапазоні до 0,5 МГц. При цьому робочою частотою вважається частота коливань вихідного сигналу, яка забезпечує максимальну чутливість перетворювача до швидкості розтікання досліджуваної рідини.

Для визначення робочої частоти експериментально вимірювали зміну імпедансу вимірювальної комірки при розміщенні у ній досліджуваного твердого зразка. Вимірювання проводилися на наступних частотах: 1, 2, 3, 5, 7, 5 і 10 кГц. Відносні зміни імпедансу вимірювальної комірки при введенні зразка між обкладками конденсатора показано на рис. 2.12:

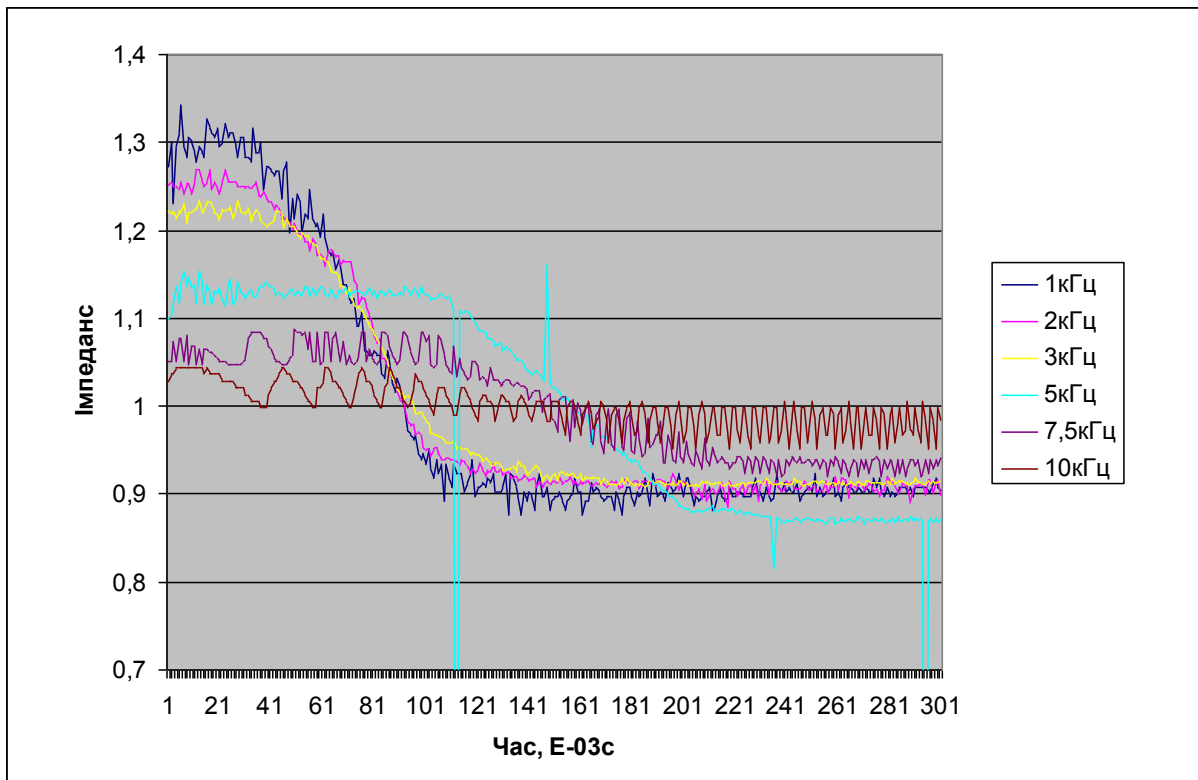


Рисунок 2.12 – Характер зміни імпедансу ємнісної комірки при введенні досліджуваного зразка для різних частот вихідного сигналу

Як видно з графіків зміни імпедансу, чутливість давача до змін діелектричного середовища ємнісної комірки зменшується зі збільшенням частоти вимірювального сигналу. Тому з цієї точки зору бажано проводити вимірювання на низьких частотах, тобто 1, 2 або 3 кГц. Однак слід також зазначити, що для сигналів різних частот характерна пульсація імпедансу відносно середньої лінії зміни. Як видно з графіка, найменший розкид значень відносно середнього значення мають сигнали з частотами 3 і 5 кГц. Тому, проаналізувавши отримані значення, 3 кГц було вибрано як робочу частоту.

2.7 Розроблення програмного забезпечення пристрою для визначення ступеня змочуваності рідинами твердих поверхонь

Вимірювання зміни модуля імпедансу ємнісної комірки виконується за допомогою вимірювального перетворювача AD5934 компанії Analogue Devices, США [36]. Перетворювач керується програмним забезпеченням AD5934, що

надається виробником перетворювача. Перед початком вимірювання необхідно задати вхідні параметри, що вимагаються цією програмою, тобто частоту вимірювального сигналу, кількість виміряних значень, що відповідають тривалості процесу вимірювання, і крок зміни частоти. Після встановлення вхідних характеристик програма виконує калібрування за номінальною ємністю 15 пФ і обчислює коефіцієнт пропорційності, що відповідає заданій робочій частоті. Наступним кроком у процесі вимірювання є видалення калібрувального елемента і безпосереднє спостереження за динамікою процесу змочування. Використовуване програмне забезпечення перетворювача може записувати отримані в процесі вимірювання значення у власну пам'ять (до 500 точок), інтерпретувати отримані значення у вигляді графіків і забезпечувати візуальне представлення результатів вимірювань.

Подальша обробка даних, що були отримані за допомогою перетворювача AD5934 здійснювалася у програмному середовищі MatLab. У цьому програмному додатку було розроблено алгоритм визначення ступеня змочуваності твердого зразка рідиною, виходячи зі швидкості розтікання фіксованого об'єму рідини (додаток А). Ця швидкість може бути визначена за кутом нахилу лінійної апроксимаційної залежності зміни імпедансу системи «рідина – тверде тіло - газ» під впливом розтікання рідини по поверхні твердого тіла. Алгоритм обробки даних вимірювань передбачає наступні кроки: імпорт даних, виміряних під час експерименту, апроксимацію цих даних поліномом першого порядку, визначення кута нахилу кривої розтікання та побудова графіків виміряних значень імпедансів, апроксимуючих прямих та наведенням на графіку значення кутів нахилу кривих для всіх досліджуваних рідин. Цей алгоритм реалізований у розробленій програмі і представлений у додатку Б.

2.8 Розроблення методики проведення вимірювання та оцінки результатів контролю

Контроль ступеня змочування твердої поверхні рідиною ємнісним методом включає наступну послідовність дій:

- підготовка досліджуваних зразків твердого тіла та рідин
- підготовка механічного вузла пристрою до вимірювання
- регулювання відстані між пластинами конденсатора пристрою відповідно до товщини твердого зразка та об'єму рідини
- калібрування пристрою
- вимірювання динаміки ємності і визначення ступеня змочуваності системи «тверде тіло-рідина-газ» при розтіканні рідини твердою поверхнею
- очищення та підготовка зразка й дозатора до наступного циклу вимірювань з іншою рідиною.

Оскільки тверді зразки розміщуються між обкладками конденсатора у вимірювальному блоці, то їх необхідно виготовляти у вигляді пластин певних розмірів. Ці розміри повинні дозволяти вільно розмішувати зразок у вимірювальному блоці, а товщина зразка не повинна перевищувати 5 мм через обернено пропорційну залежність між ємністю конденсатора і відстанню між його електродами і повинна забезпечувати максимальне перекриття електродів конденсатора. Тому, враховуючи розміри обкладок конденсатора і конструкцію вимірювального блоку, максимальні розміри зразка не повинні бути більшими за наступні значення: $100 \times 50 \times 5$ мм.

Слід також зазначити, що поверхня, яка тестується, повинна бути вільною від поверхневих дефектів, іржі, шлаку, органічних речовин та інших видів забруднень. Тому поверхня твердого зразка повинна бути попередньо очищена. Органічні забруднення можна видалити з поверхні за допомогою різноманітних розчинників і очищувачів, які повинні легко випаровуватися із поверхні зразка і не змінювати властивостей поверхні. Неорганічні забруднення потребують очищення, яке повинно здійснюватися таким чином, щоб не змінювати структуру поверхневого шару зразка. Тому для цього слід використовувати хімічні та електрохімічні методи очищення, в тому числі

вплив на об'єкт ультразвуком або електричним струмом, що значно підвищує ефективність процесу очищення [37]. Завершальним етапом підготовки контрольних зразків є сушіння.

Підготовка пристрою до вимірювання передбачає горизонтальне вирівнювання за допомогою ніжок для регулювання 1 (рис. 2.13). За допомогою ручки 2 здійснюється переміщення столика 4 по напрямних 3. На столику розміщено нижній електрод вимірювального блоку приладу – конденсатор 5. Відстань між пластинами конденсатора визначається товщиною твердого зразка та експериментально визначеною максимальною початковою висотою краплі досліджуваної рідини, що підлягає контролю. Підготовлений твердий зразок розміщують між пластинами конденсатора з максимальним і рівномірним перекриттям його електродів. Досліджуваний розчин набирають у дозатор 6 - одноразовий шприц об'ємом 1 мм^3 – і поміщають у тримач 7. Голка дозатора поміщається в отвір у верхній пластині конденсатора 5 для нанесення досліджуваного розчину на тверду поверхню. Потім поршень дозатора 6 переміщується у верхнє крайнє положення до контакту з валом 9 передавального механізму, що забезпечує повздовжній рух дозатора.

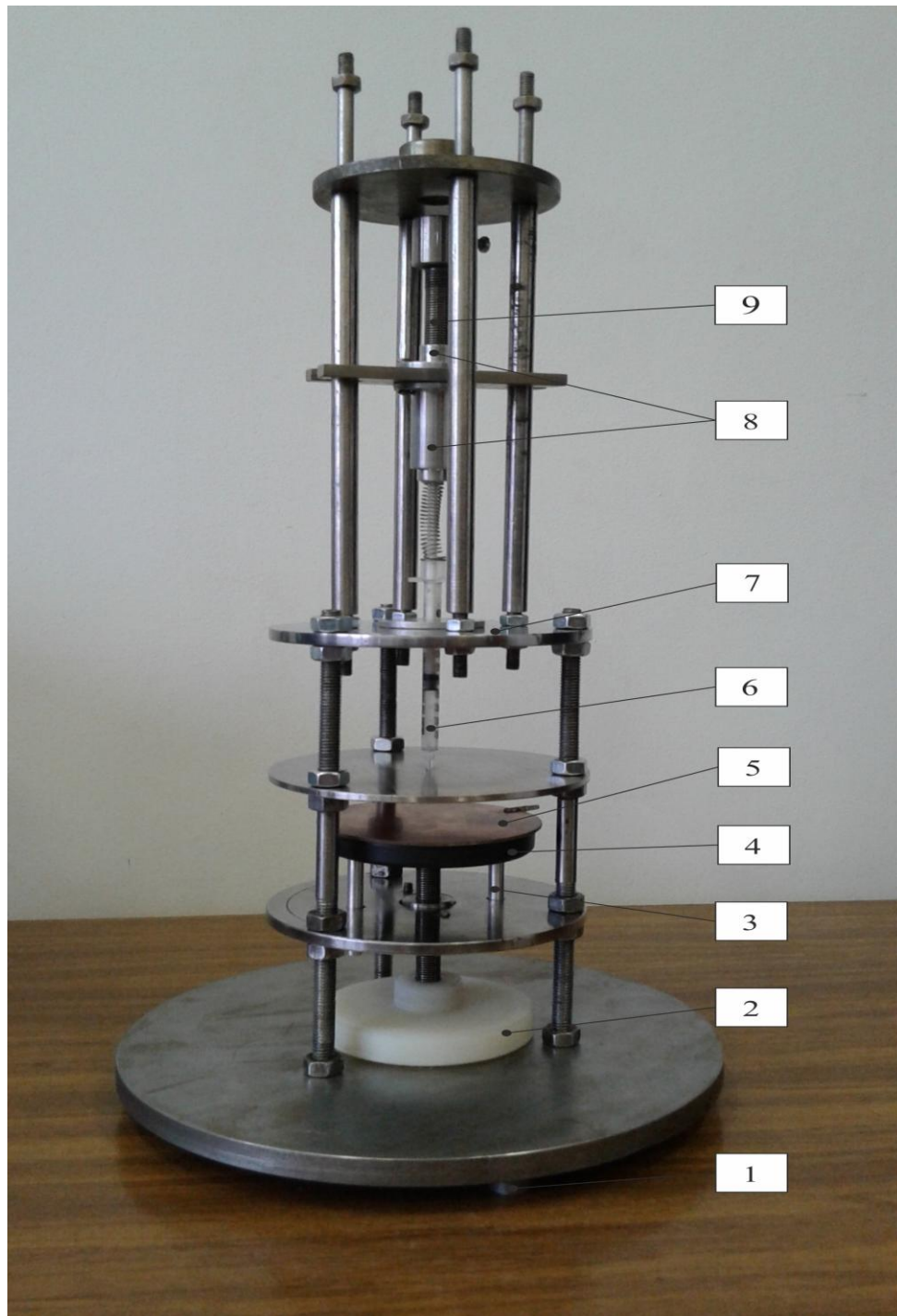


Рисунок 2.13 – Реалізація механічного блоку пристрою

Для роботи з пристроєм вмикаємо та завантажуємо AD5934 Eval Software – програмне середовище роботи перетворювача AD5934 (AnalogDevice). Інтерфейс роботи з перетворювачем вимагає внесення наступних параметрів процесу вимірювання: частота вимірювання, крок зміни частоти, кількість вимірювань у циклі, що визначають тривалість контролю, і затримки початку

процесу вимірювань, які задаються в підменю «Sweep Parameters» (Параметри розгортки).

Прилад калібрується за значенням еталонного конденсатора ємністю 15 пФ. Необхідні вхідні дані, що вносяться при налаштуванні пристрою програмним додатком обробляються натисканням кнопки Program Device Registers. Тоді за допомогою функції Calculate Gain Factor у програмному середовищі здійснюється розрахунок коефіцієнта пропорційності імпедансу щодо калібрувальної ємності 15 пФ. Розраховане значення даного коефіцієнта відображається у вікні програмного додатку. Після завершення налаштування калібрувальний конденсатор відключаємо спеціальним премикачем.

Для керування роботою крокового двигуна було використано програмний алгоритм, розроблений в середовищі Arduino (Додаток В). Програма задає необхідну частоту обертання та кут повороту валу двигуна для нанесення досліджуваної рідини з заданою витратою на поверхню твердого тіла. Гайковий механізм 8 здійснює перетворення обертового руху валу крокового двигуна у поступальний рух поршня дозатора через вал передавального механізму.

Наступним етапом досліджень є безпосереднє вимірювання динаміка зміни імпедансу під час розтікання рідини з постійною швидкістю її нанесення на поверхню твердого зразка. При цьому кроковий двигун і вимірювальний перетворювач вмикаються одночасно. Отримані значення зміни імпедансу зберігаються в пам'яті комп'ютера.

Після контролю характеристик змочування досліджуваним розчином, поверхня твердого зразка очищується, а дозатор замінюється на інший, що містить інший досліджуваний розчин.

Даний алгоритм дій реалізують для всіх контрольованих рідин.

Наступним кроком є обробка результатів, отриманих в процесі контролю, та визначення ступеня змочуваності рідини щодо зразка твердого тіла. З цією метою було розроблено програму в середовищі MatLab. Дана програма дозволяє імпортувати результати досліджень і будувати графік динаміки модуля імпедансу досліджуваної системи тверде тіло–рідина–газ внаслідок

розтікання. Програма також буде апроксимаційні залежності і встановлює ступені змочування твердої поверхні рідинами на основі визначених співвідношень між коефіцієнтами кожної залежності.

Під час експерименту на одну й ту саму поверхню наносяться різні досліджувані рідини, тому методика контролю включає видалення рідини та очищення досліджуваного твердого зразка після кожного циклу вимірювань з подальшим витримуванням зразка протягом певного часу, щоб дати змогу очищувачу повністю випаруватися з твердої поверхні. Очищення поверхні здійснюється за допомогою безворсової тканини або серветки.

2.9 Експериментальні дослідження процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл ємнісним методом

В ході експериментальних вимірювань, за допомогою розробленого пристрою здійснено дослідження змочувальних характеристик набору рідин: дистильована вода, етиловий спирт та 1% водяний розчин поверхнево-активної речовини (ПАР) – ВУК LPD 6296. Вищеперелічені рідини відрізняються значеннями поверхневого натягу: дистильована вода – 73 мН/м, етиловий спирт 22 – мН/м, 50% водяний розчин спирту – 38 мН/м та 1%-ий водяний розчин ПАР – 63 мН/м. Зразками твердих тіл були: діелектрики із скла і склотекстоліту (СТ); провідні тіла із нержавіючої сталі та металочерепиці. Експериментальні досліди проводилися за температури 20-22°C та за нормального атмосферного тиску).

Зміна імпедансу ємнісної комірки вимірювалася при подачі постійного потоку рідини згідно з методикою контролю. Наступним етапом контролю була побудова графіків зміни імпедансу в часі та визначення їх нахилів шляхом апроксимації отриманих кривих лінійними залежностями.

Ступінь змочуваності зразка твердого тіла контрольованими рідинами оцінюється за кутами нахилу кривих розтікання, які визначаються за допомогою розробленої програми. Результати обробки виміряних змін модуля

імпедансу для контрольованих рідин і твердих тіл наведено графічно на рис. 2.14-2.17. із побудованими апроксимаційними прямими та зазначеними кутами їх нахилу.

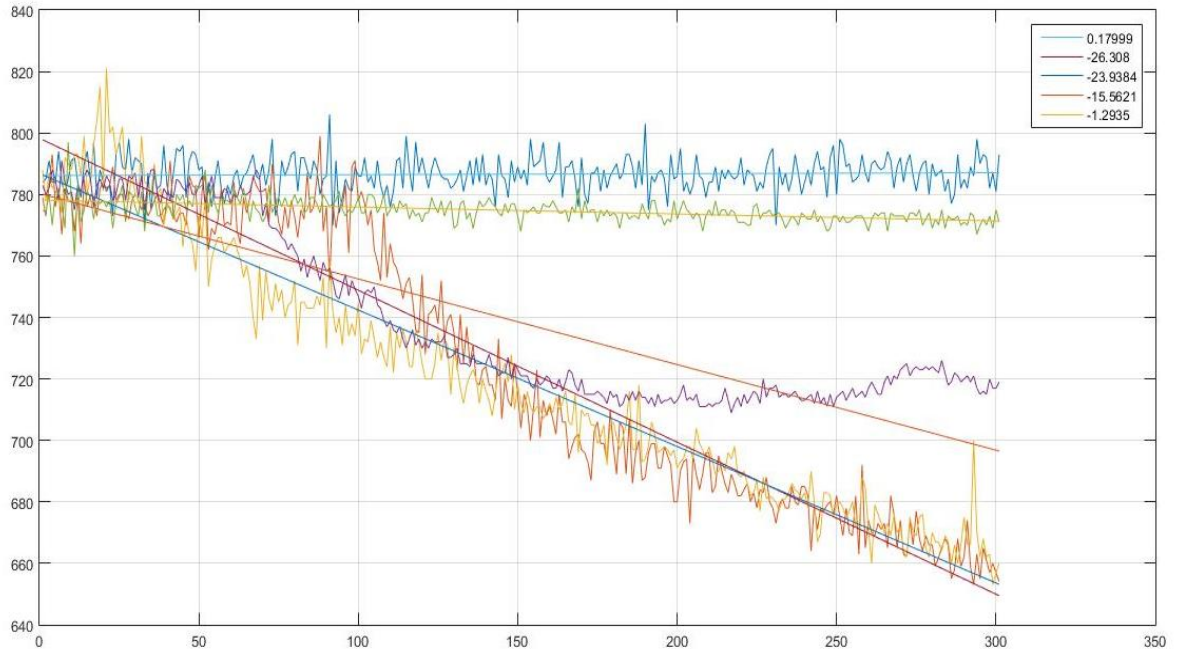


Рисунок 2.14 – Результат експериментальних досліджень для скла із зазначенням кутів нахилу прямих розтікання

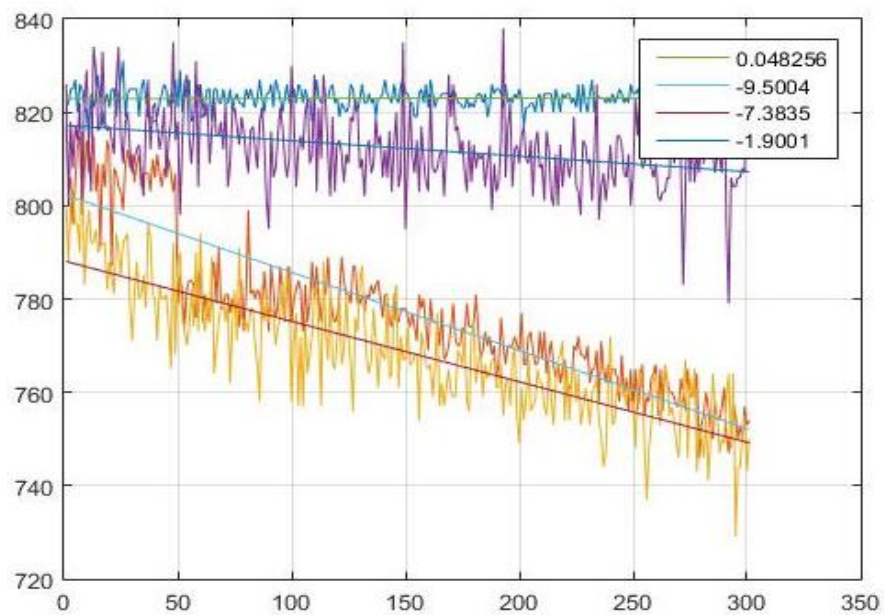


Рисунок 2.15 – Результат експериментальних досліджень для склотекстоліту із зазначенням кутів нахилу прямих розтікання

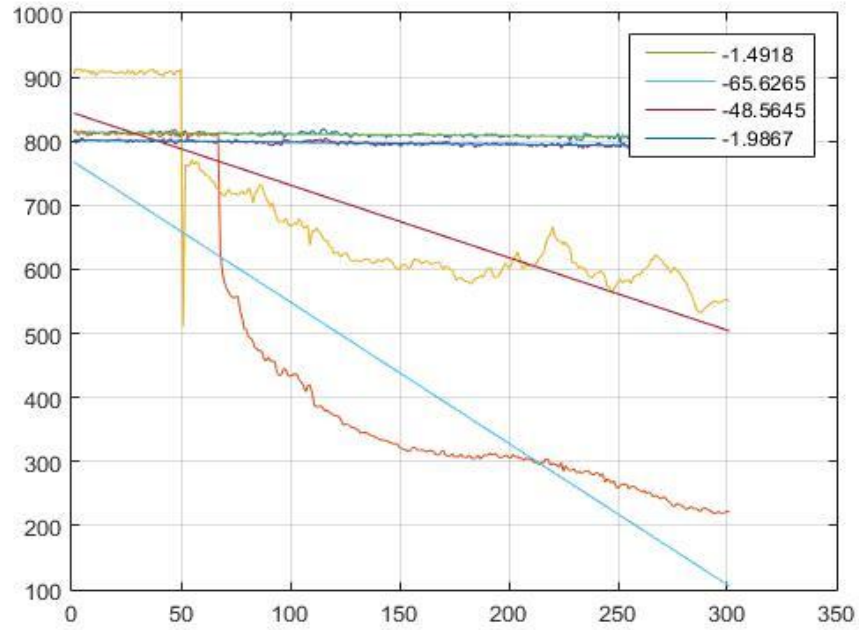


Рисунок 2.16 – Результат експериментальних досліджень для нержавіючої сталі із зазначенням кутів нахилу прямих розтікання

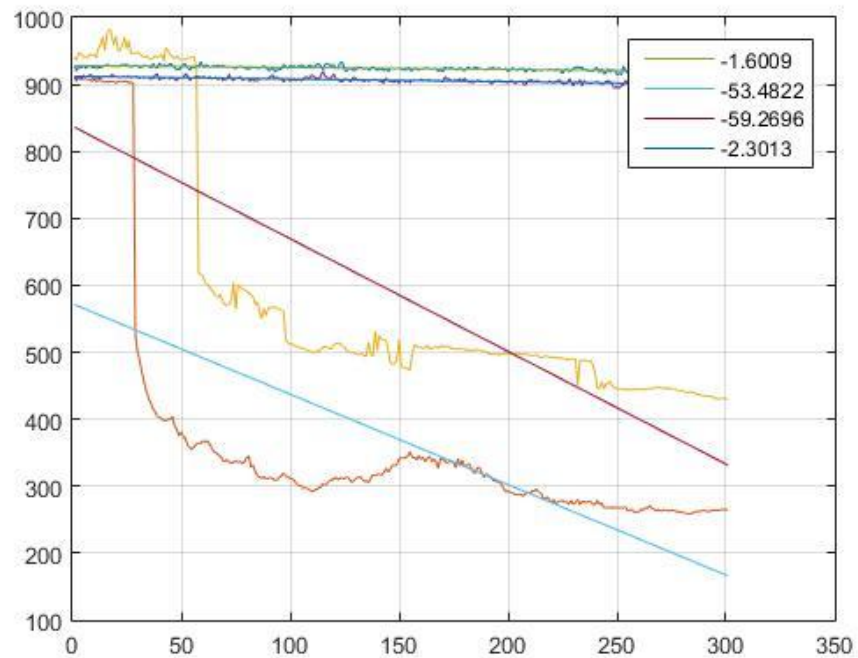


Рисунок 2.17 – Результат експериментальних досліджень для металочерепиці із зазначенням кутів нахилу прямих розтікання

Ранжування результатів вимірювань здійснюється шляхом розбиття діапазону зміни кута нахилу на 5 ділянок, а ступінь змочування оцінюється за бальною системою, де найбільший кут відхилення відповідає 1 балу та низькому ступеню змочування.

Шкала оцінки ступеня змочування рідиною поверхні твердого тіла:

- 1 бал** - низький ступінь змочування;
- 2 бала** - середньо-низький ступінь змочування;
- 3 бала** - середній ступінь змочування;
- 4 бала** - середньо-високий ступінь змочування;
- 5 балів** - високий ступінь змочування.

Згідно отриманих значень кутів нахилу прямих розтікання було проведено оцінку ступеня змочування досліджуваними рідинами поверхонь зразків твердих тіл у балах, яку наведено у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Оцінка ступеня змочування досліджуваними рідинами поверхонь зразків твердих тіл у балах

Рідина / Тверде тіло	Вода Дистильована, бали	розчин ВУК 1%-ий, бали	Спирт етиловий, бали
Скло	1	1	5
Склотекстоліт	1	2	5
Нержавіюча сталь	1	2	5
Металочерепиця	1	1	5

Відповідно згідно отриманих балів можна зробити подальші висновки щодо оцінки якості змочування:

- дистильована вода характеризується найнижчими балами, що свідчать про низький ступінь змочування;

- розчин ПАР ВУК LPD 629 1%-ний характеризується низьким ступенем змочування щодо скла та метало черепиці й середньо-низьким ступенем змочування щодо нержавіючої сталі і склотекстоліту;

- етиловому спирту характерний високий ступінь змочування щодо усіх досліджуваних твердих поверхонь;

Для перевірки адекватності експериментальних досліджень було здійснено безпосередні вимірювання ККЗ води та спирту із вищепереліченими зразками твердих тіл. Для краплі води на склі ККЗ становить 30° , для спирту – 9° , на склотекстоліті – 52° і 20° , на нержавіючій сталі – 60° і 8° , на метало-черепиці – 50° і 4° відповідно. Отримані значення підтверджують про кращі змочувальні властивості спирту, ніж води. Ідентичні висновки можна було зробити і з графіків, що були побудовані за зміною імпедансу, які було отримано за допомогою пристрою, що реалізує ємнісний метод контролю, що підтверджуються значеннями прямих вимірювань.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

3.1 Схема нагромадження сумарної невизначеності розробленого пристрою змочування рідинами твердих поверхонь

При аналізі впливів різних факторів на процес вимірювання імпедансу при розтіканні рідини поверхнею твердого тіла були визначені основні складові невизначеності та відповідно розроблена схема накопичення сумарної невизначеності пристрою контролю (рис. 3.1).

В загальному випадку всі складові невизначеності поділяються на інструментальну та методичні, залежно від причини їх походження [38, 39].

Пристрій включає наступні складові *інструментальної невизначеності*:

- невизначеність ємнісної комірки ($u_{ком.}$);
- невизначеність ємнісного перетворювача ($u_{пер.}$);
- невизначеність дозування рідини ($u_{доз.}$).

Невизначеність в ємнісній комірці спричинена відхиленням нижньої пластини конденсатора від горизонтального положення ($u_{гориз.}$) та відхиленням від паралельності його пластинами ($u_{парал.}$), наявністю отвору у верхній пластині конденсатора ($u_{отв.}$), неточність заданим конструктивним розмірам ($u_{розм.}$), неідеальним приляганням твердого зразка до пластини конденсатора ($u_{приляг.}$), зміною параметрів навколишнього середовища ($u_{зовн.сер.}$), що спричинені впливом зміни температури ($u_{темп.}$) та вологості.

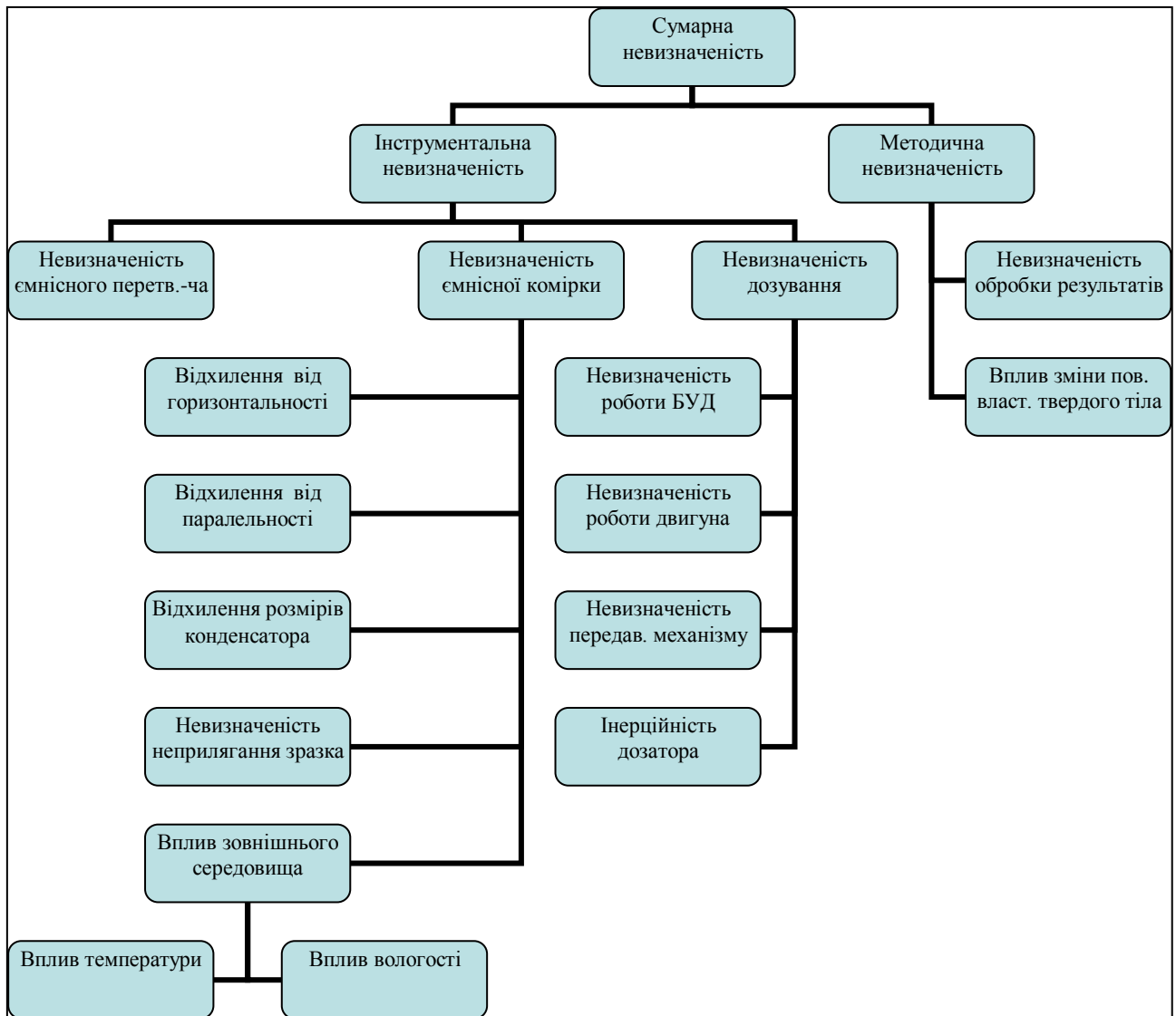


Рисунок 3.1 – Схема накопичення невизначеності розробленого пристрою

Сукупності невизначеностей роботи крокового двигуна ($u_{двиг}$), БУД ($u_{БУД}$), передавального механізму ($u_{пер.мех.}$) й інерційністю поршня дозатора ($u_{інерц.}$) зумовлюють невизначеність дозування пристрою.

Методична невизначеність контролю ступеня змочуваності рідинами поверхонь твердих тіл зумовлена:

- невизначеністю обробки сигналу вимірювань ($u_{оброб.}$);
- невизначеністю, пов'язаною зі нерівномірністю поверхневих властивостей зразка ($u_{пов.влас.}$).

3.2 Складові інструментальної невизначеності пристрою

Невизначеність ємнісних перетворювачів визначається за типом В [39, 40], оскільки неможливо виконати багаторазові вимірювання на одному і тому ж досліджуваному зразку. Абсолютна похибка цього перетворювача була вказана виробником під час експериментальних досліджень і становить $\delta_{\text{ємн.пер.}} = \pm 2\%$. Використаний у пристрої перетворювач побудований на мікросхемі AD 5934 і можна стверджувати, що він має рівномірний закон з коефіцієнтом $\sqrt{3}$ [39].

$$u_{\text{ємн.пер.}} = \frac{\delta_{\text{ємн.пер.}}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15\%. \quad (3.1)$$

Для зниження систематичної складової невизначеності через відхилення нижньої пластини конденсатора від горизонтального положення, що призводить до стікання рідини в одну сторону, а інколи і за межі контрольованого середовища, замість того, щоб рівномірно і концентровано розтікатися по твердій поверхні, слід регулярно контролювати нахил вимірювальної комірки та, за необхідності, здійснювати коригування горизонтальності. Дану невизначеність, була досліджено за допомогою універсального мікроскопа УИМ-216. Максимальне відхилення нижньої пластини конденсатора від горизонталі $\delta_{\text{гориз.}} = \pm 0,8\%$ визначалося експериментально. Як зазначено в [41], невизначеність відхилення геометричних розмірів об'єкта підпорядковується трикутному закону розподілу, тому закон розподілу цієї невизначеності можна розглядати як трикутний, а коефіцієнт при цьому становить $\sqrt{6}$. Таким чином, невизначеність, зумовлена негоризонтальним положенням нижньої пластини конденсатора, має наступний вигляд:

$$u_{\text{гориз.}} = \frac{\delta_{\text{гориз.}}}{\sqrt{6}} = \frac{0,8}{\sqrt{6}} = 0,33\%. \quad (3.2)$$

Щоб знайти відхилення від паралельності було здійснено багаторазові вимірювання відстані між обкладками конденсатора уздовж його зовнішнього

краю. Вимірювання проводилися мікрометром у протилежних точках для різних заданих відстаней між обкладками конденсатора (0,5, 0,7 і 1 см). Результати експерименту показали, що максимальні абсолютні відхилення були між 0,5 і 0,7 см. Враховуючи, що ці вимірювання характеризуються правилом трикутного розподілу, що характерне для відхилень геометричних розмірів, то невизначеність є наступною:

$$u_{\text{парал.}} = \frac{\delta_{\text{парал.}}}{\sqrt{6}} = \frac{0,55}{\sqrt{6}} = 0,22\%. \quad (3.3)$$

Так як ємність конденсатора безпосередньо залежить від його розмірів та форми, то відхилення від фактичних геометричних параметрів створюють невизначеність у показах пристрою. Ця невизначеність зумовлена похибкою інструменту, що використовується для вирізання пластин конденсатора. Для оцінки величини невизначеності було використано мікроскоп UIM-216 для визначення відхилення розмірів обкладинки конденсатора. Максимальне відхилення при цьому становило $\delta_{\text{розм.}} = \pm 1\%$. Також на ємність вимірювальної комірки впливає наявність отвору у верхній пластині конденсатора. Щоб дослідити цей вплив, ємність одного і того ж конденсатора вимірювали спочатку без отворів, а потім при поступовому збільшенні отвору від 1 мм до 3 мм в діаметрі. Отримані результати показують, що максимальне абсолютне значення невизначеності становить $\delta_{\text{отв.}} = \pm 2,5\%$ при максимальному діаметрі отвору.

Розрахунок цих компонентів показує, що наявність отвору верхній пластині конденсатора має найбільший вплив на результат вимірювання, а стандартна невизначеність для типу В в даному випадку з врахуванням рівномірного закону розподілу становитиме:

$$u_{\text{розм.}} = \frac{\delta_{\text{отв.}}}{\sqrt{3}} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,44\%. \quad (3.4)$$

Присутність повітряного зазору через неповне прилягання досліджуваного зразка до пластини конденсатора призводить до утворення додаткової ємності у вимірювальній комірці, що вносить додаткову

невизначеність у результати випробувань. Дане відхилення досліджувалося шляхом просвічування лінії контакту між контрольованим твердим тілом і пластиною конденсатора та визначалися максимальні розміри світлової плями. Відхилення щодо площі поперечного перерізу конденсатора становило $\delta_{\text{приляг.}} = \pm 0,5\%$. Стандартна невизначеність типу В з урахуванням трикутного закону розподілу становить:

$$u_{\text{приляг.}} = \frac{\delta_{\text{приляг.}}}{\sqrt{6}} = \frac{0,5}{\sqrt{6}} = 0,21\%. \quad (3.5)$$

Загалом, нагрівання призводить до покращення процесу фізичного змочування [3]. Дослідження впливу зовнішнього середовища – температури та вологості – було досліджено ємність конденсатора при зміні температури від 10 до 30°C та відносній вологості від 60 до 95%. Результати показують, що максимальний вплив температури на ємність становить $\delta_{\text{темн.}} = \pm 0,3\%$, максимальний вплив вологості на ємність становить $\delta_{\text{волог.}} = \pm 0,2\%$. Ці невизначеності характеризуються рівномірним законом розподілу і тому їх значення визначаються формулами:

$$u_{\text{темн.}} = \frac{\delta_{\text{темн.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,17\%, \quad (3.6)$$

$$u_{\text{волог.}} = \frac{\delta_{\text{волог.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115\%. \quad (3.7)$$

Результуюча невизначеність впливу навколишнього середовища:

$$u_{\text{зовн.сер.}} = \sqrt{u_{\text{темн.}}^2 + u_{\text{волог.}}^2} = \sqrt{0,17^2 + 0,115^2} = 0,205\%, \quad (3.8)$$

а сукупна невизначеність ємнісної комірки за умови відсутності кореляційних зв'язків між наведеними вище складовими буде такою:

$$\begin{aligned} u_{\text{емн.ком.}} &= \sqrt{u_{\text{гориз.}}^2 + u_{\text{парал.}}^2 + u_{\text{розм.}}^2 + u_{\text{приляг.}}^2 + u_{\text{зовн.сер.}}^2} = \\ &= \sqrt{0,33^2 + 0,22^2 + 1,44^2 + 0,21^2 + 0,205^2} = 1,52\%. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Некоректність роботи крокового двигуна в основному пов'язана з коливаннями напруги живлення. Відповідно до технічних характеристик, абсолютна похибка його роботи становить $\delta_{\text{двиг.}} = \pm 0,5\%$. Оскільки закон

розподілу цієї похибки близький до рівномірного, то непевність роботи крокового двигуна розраховується наступним чином:

$$u_{\text{двиг.}} = \frac{\delta_{\text{двиг.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,29\%. \quad (3.10)$$

Як показало дослідження, невизначеність може бути викликана наявністю «мертвого ходу» між передавальним механізмом та кроковим двигуном. Для знаходження величини невизначеності було проведено експериментальне дослідження з визначення залежності переміщення поршня дозатора від кількості імпульсів, що надсилаються з комп'ютера на блок керування двигуном. Максимальна похибка при цьому становить $\delta_{\text{пер.мех.}} = \pm 0,16\%$. Оскільки похибка кінематичних пар механізму підпорядковується рівномірному закону розподілу [39], то невизначеність механізму передачі дорівнює:

$$u_{\text{пер.мех.}} = \frac{\delta_{\text{пер.мех.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,16}{\sqrt{3}} = 0,09\%. \quad (3.11)$$

Робота БУД підпорядковується рівномірному закону розподілу і похибка при цьому становить $\delta_{\text{БУД}} = \pm 0,2\%$, тому невизначеність його роботи знаходимо наступним чином:

$$u_{\text{БУД}} = \frac{\delta_{\text{БУД}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115\%. \quad (3.12)$$

Дослідження невизначеності, пов'язаної з інерційністю дозатора, переміщення здійснювалося шляхом багатократних вимірювань переміщення поршня дозатора, коли вал двигуна робив один повний оберт. Максимальна варіація значень переміщення по відношенню до середнього переміщення становила $\delta_{\text{інерц.}} = \pm 0,1\%$. Таким чином, стандартна невизначеність інерційності дозатора з урахуванням рівномірного закону розподілу буде:

$$u_{\text{інерц.}} = \frac{\delta_{\text{інерц.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,058\%. \quad (3.13)$$

Оскільки всі вищенаведені невизначеності є некорельованими та адитивними, то результуюча невизначеність дозування є наступною:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{емн.ком.}} &= \sqrt{u_{\text{двиг.}}^2 + u_{\text{пер.мех.}}^2 + u_{\text{БУД}}^2 + u_{\text{інерц.}}^2} = \\
 &= \sqrt{0,29^2 + 0,9^2 + 0,115^2 + 0,058^2} = 0,95\%.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Сумарна інструментальна невизначеність пристрою визначається за формулою [38, 40, 41 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{інстр.}} &= \sqrt{\sum_i u_i^2} = \sqrt{u_{\text{емн.пер.}}^2 + u_{\text{емн.ком.}}^2 + u_{\text{дозув.}}^2} = \\
 &= \sqrt{1,15^2 + 1,52^2 + 0,95^2} = 2,13\%.
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

3.3 Методичні складові невизначеності

Найвагомішою складовою методичної невизначеності приладу є невизначеність, пов'язана з обробкою сигналу, яка викликана застосуванням певних методів згладжування при побудові графіка часової залежності ємнісного опору конденсатора за допомогою програмного пакету MatLab. При опрацюванні результатів експерименту здійснювалася лінеаризація експериментальних даних що приводить до додаткової невизначеності, що розраховується на основі коефіцієнту лінеаризації $k_z = 0,4$ для рівномірного закону розподілу і становить:

$$u_{\text{оброб.}} = \frac{\delta_{\text{оброб.}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,23\%.
 \tag{3.16}$$

Невизначеності, пов'язані зі зміною властивостей поверхні зразка, виникають через процедуру очищення поверхні зразка після змочування його еталонним і досліджуваними розчинами. У даних дослідженнях в якості калібрувальної характеристики використовується крива розтікання еталонного розчину (дистильованої води). Оскільки тест виконується на одному твердому тілі і декількох рідинах, поверхня зразка повинна бути очищена від залишків цих рідин після кожного циклу вимірювань. В процесі очищення поверхня контрольного зразка може отримати механічні пошкодження, які впливають на поверхневий натяг, поверхневий заряд і шорсткість поверхні зразка. Тому контрольні вимірювання ємнісного опору були проведені на тестових зразках після кожного очищення та сушіння зразків для визначення відхилення від

початкового значення. Відхилення ємнісного опору зростало зі збільшенням кількості випробуваних рідин та циклів вимірювань і максимальне відхилення при цьому становило $\delta_{пов.власт.} = \pm 1,5\%$. Стандартна невизначеність через зміну поверхневих властивостей була розрахована за типом В та з урахуванням рівномірного закону розподілу:

$$u_{пов.власт.} = \frac{\delta_{пов.власт.}}{\sqrt{3}} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,87\%. \quad (3.17)$$

Сумарна методична невизначеність пристрою є такою [38, 40, 41]:

$$U_{метод.} = \sqrt{\sum_i u_i^2} = \sqrt{u_{оброб.}^2 + u_{пов.власт.}^2} = \sqrt{0,23^2 + 0,87^2} = 0,9\%. \quad (3.18)$$

Сумарна невизначеність розробленого пристрою становить:

$$U = U_{інстр.} + U_{метод.} = 2,13\% + 0,9\% = 3,03\% . \quad (3.19)$$

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних досліджень було вирішено задачу, яка полягає в розробленні ємнісного методу та пристрою дослідження змочувальних властивостей при розтіканні рідини поверхнею твердого тіла. При цьому отримані такі основні результати:

- на основі проведеного аналізу відомих методів контролю параметрів змочуваності встановлено, що для кількісної оцінки процесу змочування доцільно проводити експрес-контроль в динамічному режимі в процесі розтікання рідини поверхнею твердого тіла;

- розроблено математичну модель процесу змочування рідиною поверхні твердого тіла з врахуванням поверхневих властивостей всіх контактуючих фаз і встановлено зв'язок швидкості розтікання рідини з поверхневими властивостями всіх контактуючих фаз;

- розроблено метод експрес-контролю для контролю процесу змочування при розтіканні рідини поверхнею твердого тіла, на основі зняття динаміки зміни імпедансу ємнісної комірки;

- розроблено методику проведення контролю та систему градації для інтерпретації результатів вимірювання динаміки зміни імпедансу;

- розроблено пристрій контролю процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл імпедансним методом, який дозволяє здійснювати підбір рідини з оптимальними змочувальними характеристиками відносно контрольованого зразка твердого тіла;

- здійснено метрологічний аналіз розробленого пристрою контролю процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл, розраховане значення сумарної невизначеності якого складає 3,03%, підтверджує доцільність його практичного застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Зимон А.Д. Адгезія рідин і змочування. Москва : Хімія, 1974. 416 с.
2. Neumann A.W., Robert David, Yi Zuo Applied surface thermodynamics. 2nd ed. N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 768 p.
3. Bonn D., Eggers J., Indekeu J., Meunier J., and Rolley E. Wetting and spreading. *Rev. Mod. Phys.* 2009. P. 739 – 805.
4. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. Москва : Химия, 1976. 232 с.
5. Surface tension values of some common test liquids for surface energy analysis URL: <http://www.surface-tension.de/>
6. Adamson, A. W., Gast, A. P. Physical chemistry of surfaces. Німеччина: Wiley1997. 784 с.
7. Русанов А.І., Прохоров В.А. Міжфазна тензіометрія. С.-Петербург : Хімія, 1984. 397 с.
8. Bormashenko Edward Yu. Wetting of Real Surfaces. Berlin/Boston : Walter de Gruyter GmbH, 2013. 170 p.
9. Мчедлов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Лебідь О.В., Глазкова О.М. Колоїдна хімія : підручник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. 500 с.
10. Dukhin S.S., Kretzschmar G., Miller R. Dynamics of Adsorption at Liquid Interfaces: Theory, Experiment, application. Amsterdam : Elsevier, 1995. 196 p.
11. Snoeijer JH, Andreotti B. Moving contact lines: scales, regimes, and dynamical transitions . *Annu. Rev. Fluid Mech.* 45. 2013. P. 269 – 292.
12. Chebbi R. Capillary spreading of liquid drops on prewetted solid surfaces. *J. Colloid Interface Sci.* 211, 1999. P. 230 – 237.
13. Matsumoto T., Nakano T., Fujii T.H., Kamai M. and Nogi K. Precise measurement of liquid viscosity and surface tension with an improved oscillating drop method. *Phys. Rev. E*, №65. 2002. P. 031201.

14. Кісіль І.С., Боднар Р. Т., Витвицька Л.А., Казакевич М.Л., Яшина Н.І. Методи та засоби вимірювання якісних параметрів пенетрантів. *Приладобудування* : тези доповідей другої науково–технічної конференції. Київ, 2003. С.161 – 162.
15. Tomlinson Fort. Jr. and H.T. Patterson. A simple Method for Measuring Solid-Liquid Contact Angle. *Journal of Colloid Science*. Vol. 18. 1963. P. 217 – 222.
16. Neumann A.W., Good R.J. Techniques of Measuring Contact Angles. *Journ. Surface and Colloid Science*. New York. V. 11. 1979. P. 32 – 91.
17. Bewin K.W., Zisman W.A. The Wetting of Gold and Platinum by Water. *Journ. Phys. Chem.* V. 69. № 12. 1965. P. 4238 – 4242.
18. Боднар Р. Т., Горєлов В.О., Кісіль І.С., Степанюк Я.В. Визначення крайового кута змочування рідинами твердих тіл шляхом вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі. *Методи та прилади контролю якості*. 2004. № 12 С. 38 – 41.
19. Mack G.L. The Determination of Contact Angles from Measurements of the Dimensions of Small Bubbles and Drops. I. The Spheroidal Segment Method for Acute Angles. *Journ. Phys. Chem.* 1936. V. 40(2). P. 159 – 167.
20. Чуйко М.М., Витвицька Л.А. Метод контролю якості змочування рідинами твердих тіл. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання*: зб. тез. доп. 5-ї наук.–практ. конф. студ., і мол. уч., 24–25 листопада 2015р. Івано-Франківськ, 2015. С. 227 – 228.
21. Sikalo S., Wilhelm H. D., Roisman I. V., Jakirlic S., and Tropea C. Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations. *Physics of Fluids*. Vol. 17. №6. 2005. P. 062103.
22. Cox R. G. The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 168. P. 169 – 194.
23. Blake T. D. and Haynes J. M. Kinetics of liquid–liquid displacement. *J. Colloid Interface Sci.* 1969. Vol. 30. No. 3. P. 421 – 423.

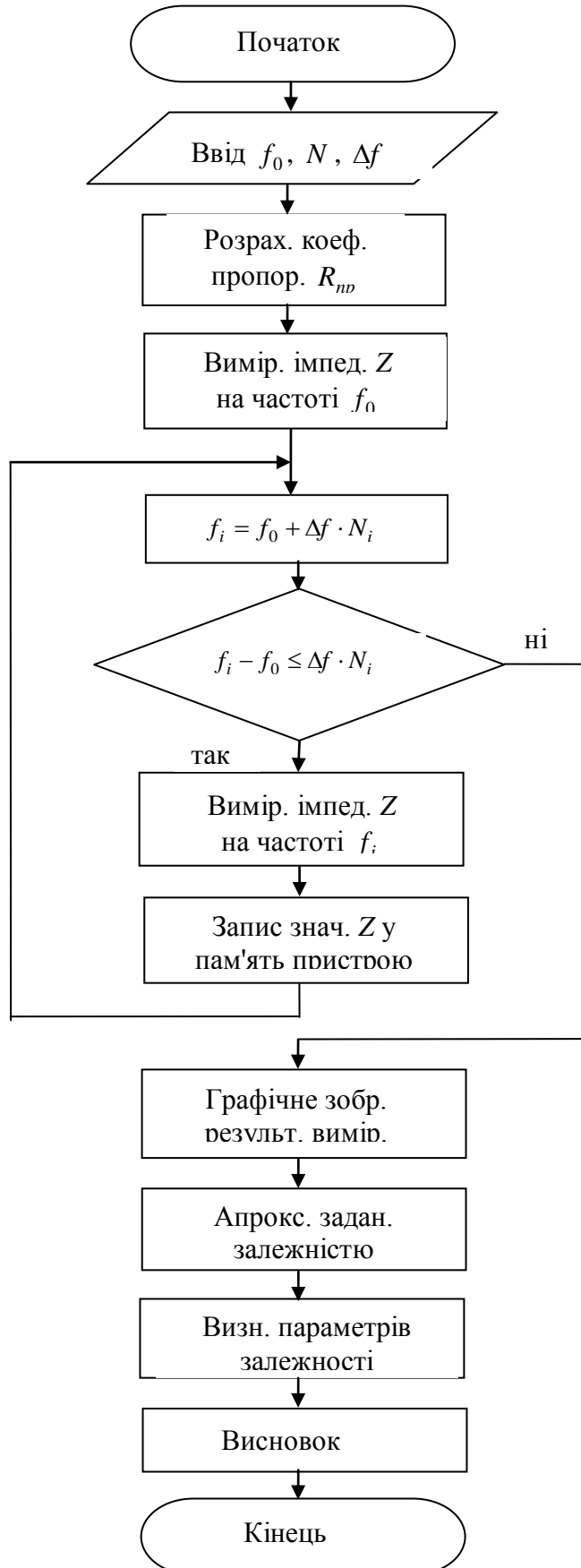
24. Remoortere P. Van and Joos P. About the kinetics of partial wetting. *J. Colloid Interface Sci.* 1993. Vol. 160. No. 2. P. 387 – 396.
25. Ravi V., Jog M. A., and Manglik R. M. Effects of Interfacial and Viscous Properties of Liquids on Drop Spread Dynamics. *ILASS Americas : 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Cincinnati, OH, May 2010
26. Becky L. and Abraham M. The exponential power law: partial wetting kinetics and dynamic contact angles. *Colloid Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2004. Vol. 250. P. 409 – 414.
27. Curtis F. Holmes. On the relation between Surface tension and Dielectric Constant. *J. Amer. Soc.* 1973. P. 1014 – 1016
28. Походило Є.В., Столярчук П.Г. Імітансний контроль якості : монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 164 с.
29. Білинський Й.Й., Городецька О.С. Автоматизований контроль поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі : монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 146 с.
30. Бальцер О.Ю., Мінаєв Ю.П., Тищук В.І., Циганок М.М. Вплив крайових ефектів на ємність плоского конденсатора. *Наукові записки Рівненського педінституту*. 1997. С. 66 – 73.
31. Щукін Є.Д., Перцов А.В., Амеліна О.А. Колоїдна хімія : 3-є вид. Вища школа. 2004. 447 с.
32. Cubaud T., Fermigier M. and Jenffer P. Spreading of Large Drops on Patterned Surfaces. *Oil & Gas Science and Technology*. Vol. 56. No. 1. 2001. P. 23 – 31.
33. Kubiak K.J., Wilson M.C.T., Mathia T.G., Carval Ph. Wettability versus roughness of engineering surfaces. *Wear*. 271. 3-4. 2011.
34. Yiping Zhao, Gwo-Ching Wang, Ton-Ming Lu Characterization of amorphous and crystalline rough surface: principles and applications. N. Y. :Academic Press, Vol. 37. 2001. 417 p.

35. Ashrafi A., Golnabi H. A high precision method for measuring very small capacitance changes. *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 70. No. 8. August 1999. P. 3484 – 3487.
36. AD 5433 URL : http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5424_5433_5445.pdf.
37. Капілярний метод неруйнівного контролю URL : http://ndt-ua.com/images/poleznye_files/kapilyarniy-kontrol.pdf.
38. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ : Вид-во “Факел”, 2002. 400 с.
39. Поджаренко В.О., Васілевський М.В., Кучерук В.Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності : навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. 128 с.
40. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 2001. 219 с.
41. Ціделко В.Д., Яремчук Н.А. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання : монографія. Київ : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 176 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Алгоритм визначення ступеня змочуваності рідинами зразка твердого тіла



Додаток Б

Програма для побудови експериментальних та апроксимаційних залежностей,
із зазначенням кутів нахилу

```

clc;
filename = 'E:\Робота\ЗАПИСКА\Дисертація\досліди\досліди 1\досліди
скло\перетворене\графік1.xls';
doslid1 = xlsread(filename);
x1=doslid1(:,1)*1000000;
x2=doslid1(:,2)*1000000;
x3=doslid1(:,3)*1000000;
x4=doslid1(:,4)*1000000;
x5=doslid1(:,5)*1000000;
t=1:length(x1);
t=t';
[g1, val]=polyfit(t,x1,1);
[g2, val]=polyfit(t,x2,1);
[g3, val]=polyfit(t,x3,1);
[g4, val]=polyfit(t,x4,1);
[g5, val]=polyfit(t,x5,1);
p1=g1(1)*t+g1(2);
p2=g2(1)*t+g2(2);
p3=g3(1)*t+g3(2);
p4=g4(1)*t+g4(2);
p5=g5(1)*t+g5(2);
teta1=radtodeg(atan(g1(1)))
teta2=radtodeg(atan(g2(1)))
teta3=radtodeg(atan(g3(1)))
teta4=radtodeg(atan(g4(1)))
teta5=radtodeg(atan(g5(1)))
s1=num2str(teta1)
s2=num2str(teta2)
s3=num2str(teta3)
s4=num2str(teta4)
s5=num2str(teta5)
figure
plot(t,x1,t,x2,t,x3,t,x4,t,x5);
hold all
hL1 = plot(t,p1);
hL2 = plot(t,p2);
hL3 = plot(t,p3);
hL4 = plot(t,p4);
hL5 = plot(t,p5);
hold off
legend([hL1,hL2,hL3,hL4,hL5],s1,s2,s3,s4,s5)
grid on

```

Додаток В

Розроблена програма для управління роботою крокового двигуна

```
#include <Stepper.h>

const int stepsPerRevolution = 200; // change this to fit the number of steps per revolution
// for your motor

// initialize the stepper library on pins 8 through 11:
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);

int stepEn=5;
int int2=2;
int int3=3;

void(* resetFunc) (void) = 0;//declare reset function at address 0

void breakStepper() {
  digitalWrite(stepEn, LOW);
  Serial.println("\n\r Boundary Error. ");
  delay(2000);
  resetFunc();
}

void setup() {
  // set the speed at 60 rpm:
  myStepper.setSpeed(60);
  // initialize the serial port:
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Commands format:");
  Serial.println("u - one step up");
  Serial.println("d - one step down");
  Serial.println("s(-)ddd - ddd steps up or (-) down (exaple: s100, s-200)");
  Serial.println("Command>");

  pinMode(stepEn, OUTPUT);
  digitalWrite(stepEn, LOW);

  // pinMode(int2, INPUT_PULLUP);
  // pinMode(int3, INPUT_PULLUP);
  // attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(int2), breakStepper, LOW);
  // attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(int3), breakStepper, LOW);
}

long stepCount;

void loop() {

if (Serial.available()) {
  switch (Serial.read()) {
```

Продовження додатку В

```

case 's':
  Serial.println("s> Waiting for data...");
  Serial.setTimeout(1000);
  stepCount=Serial.parseInt();
  Serial.print("Steps:");
  Serial.println(stepCount, DEC);
  Serial.println("Stepper Starting ... ");
  digitalWrite(stepEn, HIGH);
  delay(100);
  myStepper.step(stepCount);
  delay(100);
  digitalWrite(stepEn, LOW);
  Serial.println("Done ... ");
  Serial.println("Command>");
  break;
case 'u':
  Serial.println("u> Step up");
  digitalWrite(stepEn, HIGH);
  delay(100);
  myStepper.step(1);
  delay(100);
  digitalWrite(stepEn, LOW);
  Serial.println("Command>");
  break;
case 'd':
  Serial.println("d> Step down");
  digitalWrite(stepEn, HIGH);
  delay(100);
  myStepper.step(-1);
  delay(100);
  digitalWrite(stepEn, LOW);
  Serial.println("Command>");
  break;
default:
  Serial.println("Command Error.");
  Serial.println("Command>");
  break;
}
// step one revolution in one direction:
Serial.println("clockwise");
digitalWrite(stepEn, HIGH);
myStepper.step(stepsPerRevolution);
digitalWrite(stepEn, LOW);
delay(500);

// step one revolution in the other direction:
Serial.println("counterclockwise");
digitalWrite(stepEn, HIGH);
myStepper.step(-stepsPerRevolution);
digitalWrite(stepEn, LOW);
delay(500);

```