

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Сандалович Володимир Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження засобів контролю крайового кута змочування

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Сандалович В. А.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Білішук В. Б., к.т.н., доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

_____ О. Є. Середюк

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 175 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Сандаловичу Володимирі Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження засобів контролю крайового кута змочування

керівник роботи, Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від 3 грудня 2024 року № 787/7

2. Строк подання студентом роботи 31 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: діапазон вимірювання крайового кута змочування від 5° до 85° і від 95° до 175°, максимальна похибка 2 %

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів вимірювання крайового кута змочування. 2. Розроблення приладу для вимірювання крайового кута змочування. 3. Метрологічний аналіз приладу для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі.

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

1. Теоретичний аналіз методу визначення крайового кута змочування. 2. Структурна схема приладу. 3. Електрична схема. 4. Алгоритм програми аналізу зображення. 5. Метрологічний аналіз.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30 грудня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів вимірювання крайового кута змочування	11.01.2025 р.	
2	Розроблення приладу для вимірювання крайового кута змочування	21.01.2025 р.	
3	Метрологічний аналіз приладу для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі	31.01.2025 р.	

Студент _____ Сандалович В. А. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Біліщук В. Б. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 85 с., рис., табл., додатків, джерел, 5 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – крапля рідини на поверхні твердого тіла.

Мета роботи – дослідження засобів для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі.

Метод дослідження – аналіз зображення об'єкту і розрахунок його параметрів за допомогою математичної моделі.

В даній роботі розроблено методику і прилад для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі.

Зроблено огляд і аналіз методів вимірювання приладу для вимірювання крайового кута змочування, запропоновано використання методу вимірювання за розмірами краплі. Здійснено опис виведення кінцевих формул і розрахунок необхідних параметрів для проведення процесу вимірювання. Виконано розробку функціональної і структурної схем приладу і проведено метрологічний аналіз.

КРАЙОВИЙ КУТ ЗМОЧУВАННЯ, КАПЛЯР, КРАПЛЯ, РАДІУС, ОБ'ЄМ, ВИСОТА, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ПОРШЕНЬ, КОНТРОЛЕР, ПОХИБКА.

ABSTRACT

Master's thesis: 100 p., fig., table., appendices, sources, 5 sheets of drawings.

The object of the study is a drop of liquid on the surface of a solid.

The purpose of the work is to study the means for measuring the contact angle by the size of the drop.

The research method is to analyze the image of the object and calculate its parameters using a mathematical model.

In this work, a methodology and a device for measuring the contact angle by the size of the drop are developed.

A review and analysis of the measurement methods of the device for measuring the contact angle are made, the use of the measurement method by the size of the drop is proposed. The derivation of the final formulas and the calculation of the necessary parameters for the measurement process are described. The functional and structural diagrams of the device are developed and a metrological analysis is carried out.

WETTING ANGLE, CAPILLARY, DROP, RADIUS, VOLUME, HEIGHT, STEPPER MOTOR, PISTON, CONTROLLER, ERROR.

Зміст

Вступ.....	8
1 Аналіз методів вимірювання крайового кута змочування.....	11
1.1 Прямі вимірювання крайового кута.....	11
1.2 Розрахунок крайового кута за формою краплі.....	14
1.3 Визначення крайового кута методом занурення.....	17
1.4 Визначення крайового кута в капілярах.....	21
1.5 Визначення крайового кута на нитках.....	26
1.6 Вибір методу для вимірювання крайового кута змочування і постановка задачі на дипломний проект.....	29
2 Розроблення приладу для вимірювання крайового кута змочування..	32
2.1 Теоретичне обґрунтування методу вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі.....	32
2.2 Розробка компонентів приладу для вимірювання крайового кута змочування.....	37
2.2.1 Структурна схема приладу для вимірювання крайового кута змочування	37
2.2.2 Розробка електричної принципової схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування.....	40
2.2.3 Розрахунок блока живлення Помилка! Закладку не визначено.	
2.2.4 Розробка алгоритму роботи програми аналізу зображення.....	46

2.2.5 Розробка алгоритму роботи програми мікропроцесора і програми комп'ютера	49
2.2.6 Розроблення конструкції приладу для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі	55
2.2.7 Розрахунок радіатора транзистора Помилка! Закладку не визначено.	
2.3 Розробка методики проведення контролю за допомогою спроектованого приладу	58
3 Метрологічний аналіз приладу для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі	60
3.1 Огляд метрологічних характеристик контролю	60
3.2 Аналіз похибок при вимірюванні крайового кута змочування за розмірами краплі	65
3.3 Розробка методики стандартизації параметрів розроблюваного приладу	67
Висновки.....	70
Перелік посилань на джерела.....	71

ВСТУП

Змочування дуже широко поширено в природі, техніці, сільському господарстві, повсякденному побуті і грає важливу, і що іноді визначає роль в протіканні багатьох природних і технологічних процесів. Для оптимального управління такими процесами необхідне з'ясування законів змочування [1].

Перші наукові дослідження і спостереження, пов'язані з аналізом змочування, відносяться, мабуть, до XVII в.: в 1665 р. Гук в своїй книзі «Мікрографія» описав деякі капілярні явища. Зокрема, Гук виявив, що вода протікає через маленькі отвори тільки під дією додаткового тиску, а розплавлений свинець утворює кулясті краплі. У 1718 р. був встановлений перший кількісний закон у області капілярних явищ: Жюрен експериментально показав, що висота підйому, що змочує рідини в капілярній трубці обернено пропорційна її діаметру. Звідси витікає, що отвір висоти підйому даної рідини на діаметр капіляра представляє постійну величину (капілярна постійна). Протягом довгого часу капілярну постійну використовували дуже широко для опису різних поверхневих явищ, наприклад, її застосовував Д. І. Менделєєв для визначення критичної температури [2].

Експериментальне вивчення капілярного підйому виявило зв'язок між змочуванням стінок капілярної трубки і формою поверхні рідини в капілярі: при змочуванні утворюється увігнутий меніск, а у відсутність змочування — опуклий меніск. Ці спостереження стимулювали вивчення форми поверхні рідини поблизу поверхні твердого тіла. У середині XVIII в. Сегнер описав форму краплі не змочувальною рідини на горизонтальній твердій поверхні.

Залежно від числа фаз, що беруть участь в змочуванні, розрізняють два основних випадки. Перше це змочування при повному зануренні твердого тіла в рідину (імерсійне змочування), в якому беруть участь тільки дві фази, — рідина

і тверде тіло. Імерсійне змочування реалізується звичайно при змо змочуванні порошків і дрібних частинок. І друге — контактне змочування, в якому разом з рідиною і твердим тілом контактує третя фаза, — газ або інша рідина. Можливі також випадки, коли в змочуванні беруть участь чотири різні фази — тверде тіло, газ, дві рідини [3].

Характер змочування визначається перш за все фізико-хімічними взаємодіями на поверхні розділу фаз, які беруть участь в змочуванні. Інтенсивність цих взаємодій при імерсійному змочуванні характеризується теплою змочування. Контактне змочування характеризується частіше всього величиною крайового кута — кута між поверхнями рідини і твердого тіла на межі з навколишнім середовищем.

Як відомо мірою змочування звичайно служить крайовий кут між змочуваною поверхнею і поверхнею рідини на периметрі змочування. По характеру змочування і його залежності від різних чинників можна одержати обширні дані про взаємодію поверхні твердого тіла з рідиною. Вимірюючи крайовий кут, можна встановити умови відмивання рідини від поверхні. Залежно від характеру відмиваючої і відмивної рідини, їх відносній швидкості переміщення, температури системи і т.д. вимірюються динамічні (що наступає і відступаючий краєві кути змочування) кути змочування на трифазній межі розділу. Ефективність відмивання краплі з твердої поверхні визначається різницею між відступаючим і що наступає крайовими кутами змочування. Чим ця різниця вище, тим ефективніше відмивання краплі. Для реєстрації швидко протікаючих процесів використовується прискорене кіно - або фотографування.

Визначення крайового кута пов'язане також із розробкою технологічних масел, що представляє практичний і науковий інтерес. Застосування індустриальних масел загального призначення типу И-12А і И-20А по ГОСТ 20799-88, а також доступних нафтопродуктів типу відпрацьоване машинне масло не забезпечує якість готової продукції, викликає появу плям і поверхневих дефектів.

Мета і завдання дослідження. Аналітичне дослідження методів і засобів

для вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- зробити аналіз методів і засобів вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл;

- зробити теоретичний аналіз вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл;

- розробити структурну і електричну схему приладу для вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл;

- розробити методикку проведення контролю за допомогою спроектованого приладу;

- зробити метрологічний аналіз для спроектованого приладу.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл.

Предметом дослідження є прилад для вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл.

Методи дослідження. В роботі використано методи теоретичного дослідження методики і засобу вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл.

Наукова новизна отриманих результатів – вдосконалено метод вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл шляхом вимірювання розмірів краплі на плоскій поверхні твердого тіла.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено математичну модель методики вимірювання розмірів краплі для визначення крайового кута змочування рідиною поверхні твердого тіла;

- розроблено структурну і електричної принципові схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування рідиною поверхні твердого тіла;

- розроблено алгоритм роботи програм, для визначення розмірів краплі на зображенні;

- зроблено аналіз похибки вимірювання крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл розробленими методикою і приладом.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ

1.1 Прямі вимірювання крайового кута

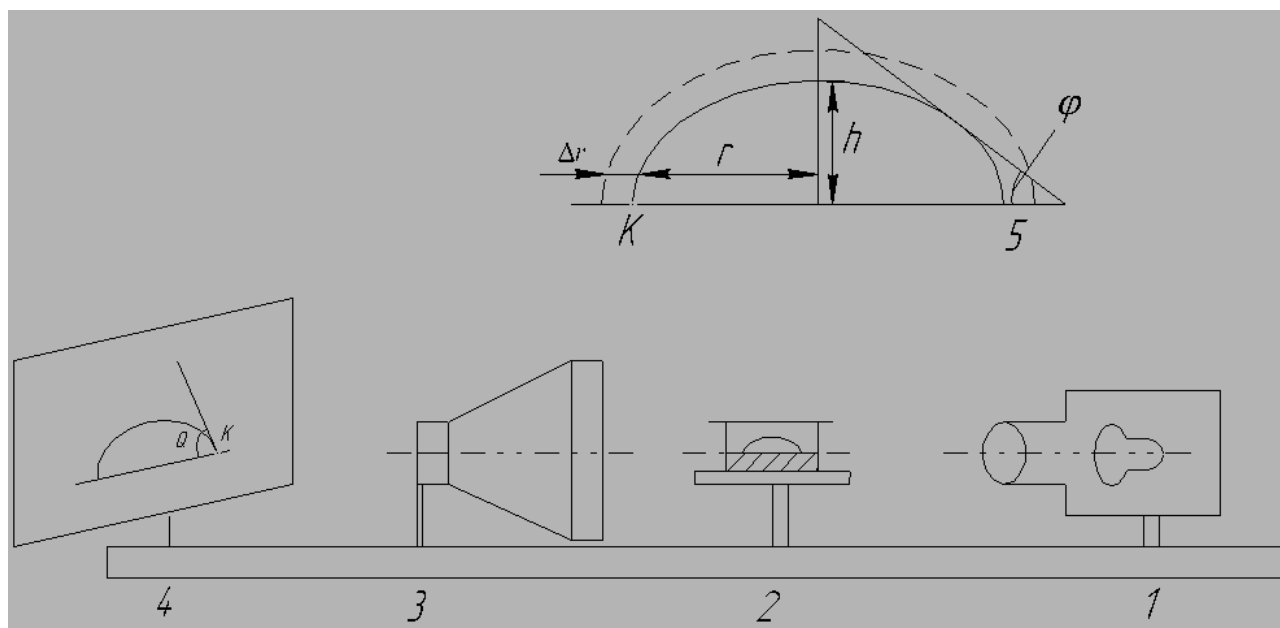
Адгезія рідини (під адгезією рідини розуміють взаємодію рідкої і твердої фаз на межі розділу цих фаз і вона обумовлена молекулярною взаємодією, яка, виникає на межі розділу фаз рідина — тверде тіло) і її здатність змочувати тверді поверхні характеризуються крайовим кутом і роботою адгезії. Ці два найважливіші показники піддаються безпосередньому вимірюванню.

Рівноважне значення крайового кута можна було б розрахувати згідно рівняння Юнга [1, 4] — $\cos\theta = (\sigma_{TG} + \sigma_{TP}) / \sigma_{PG}$ по відомих поверхневих натягах. Проте з трьох поверхневих натягів σ_{TG} , σ_{TP} і σ_{PG} можна виміряти загальнодоступними методами тільки одне — поверхневий натяг на межі рідини з газоподібним середовищем. Поверхневий натяг твердого тіла на межі з рідкою і газоподібною фазами σ_{PG} важко визначити експериментально. Тому розрахувати крайовий кут за допомогою цього рівняння не є можливим. У зв'язку з цим зупинимося на методах визначення крайового кута.

Один з цих методів передбачає безпосереднє вимірювання крайового кута за формою краплі, що знаходиться на пластинці. Краплю проектують на екран (рис. 1.1), добиваючись максимальної різкості в зображенні контуру краплі. При вимірюванні крайового кута таким методом необхідно замалювати по проекції або сфотографувати форму краплі. На знімку або на малюнку проекції краплі проводять дотичну в точці перетину контуру краплі з підкладкою і вимірюють кут нахилу цієї дотичної. Можлива похибка вимірювання крайового кута може складати 3—5°. Крайовий кут дуже малих крапель вимірюють, виходячи з припущення, що крапля сферична. Це декілька підвищує точність вимірювання, хоч і в даному випадку вона складає 1—2°.

Вимірювання крайового кута цим методом широко застосовуються при вивченні змочування поверхні розплавами металів. При лінійному розмірі краплі розплаву, рівному 0,5—1 см, і збільшенні зображення в 5—6 разів точність вимірювання крайових кутів в інтервалі температур 20—160 °С складає $\pm 1^\circ$. Вимірювання таким методом крайових кутів, близьких до 180° і 0° , мають значно велику погрішність. Погрішність пов'язана в основному з тим, що вимірювання проводять по одній проекції краплі. Тим часом в різних перетинах краплі значення крайового кута можуть коливатися. Ці коливання викликані енергетичною неоднорідністю твердої поверхні, наявністю забруднення на ній і іншими чинниками.

Крім того, периметр змочування і точка К (рис. 1.1) можуть бути визначені з деякими погрішностями. У зв'язку з цим необхідно проводити декілька вимірювань і брати середні дані.

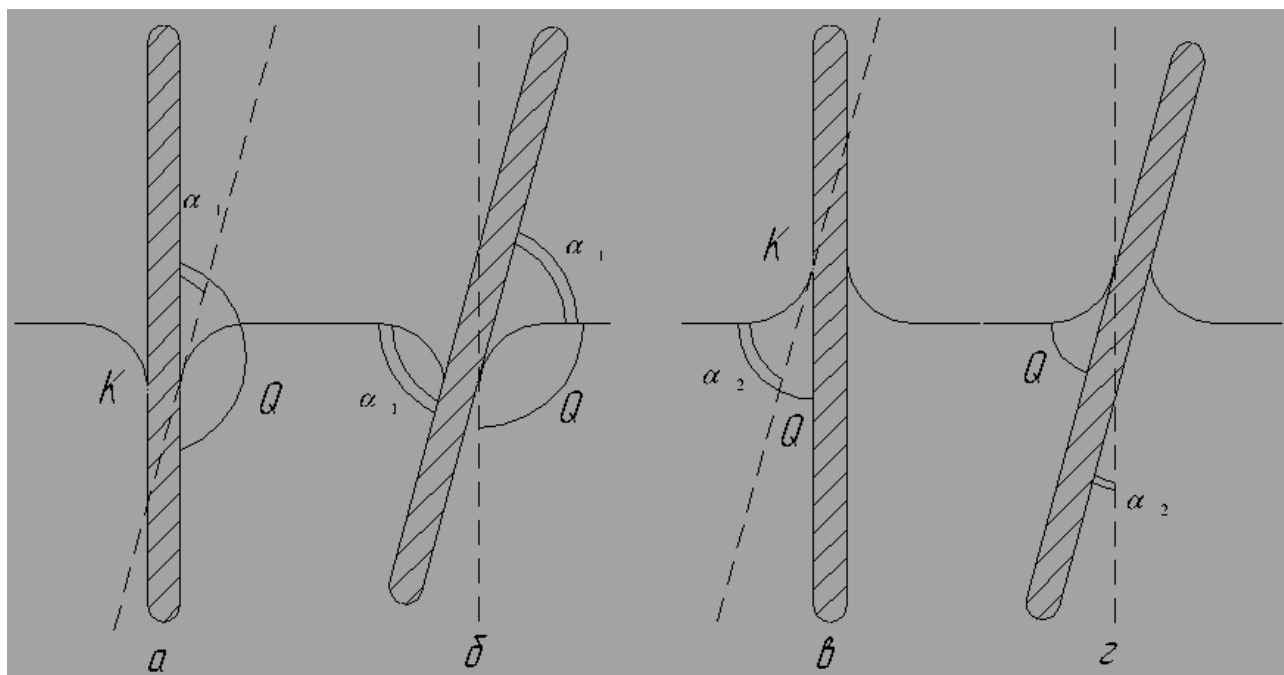


1 — джерело світла; 2 — випробовувана поверхня; 3 — збільшувач; 4—екран;
5—контур краплі

Рисунок 1.1 — Схема установки для визначення крайового кута

На плоскій поверхні важко одержати симетричну краплю. У зв'язку з цим застосовують метод примусового формування краплі. Визначення крайового кута може бути здійснено методом нахилу пластини, поміщеної в рідину (рис. 1.2).

Безпосередньо зміряти крайовий кут по величині кута між дотичної в точці К(рис. 1.2 *a* і 1.2 *в*), і пластиною експериментально дуже важко. Тому для визначення крайового кута в цих умовах вимірюють кут нахилу пластини.



a, б—гідрофобні поверхні, *в, г*—гідрофільні поверхні

Рисунок 1.2 — Визначення крайового кута методом нахилу пластини

Поміщена в рідину пластина нахиляється на певний кут. У разі гідрофобної поверхні пластини (рис. 1.2, *a, б*) величина крайового кута в сумі з кутом α_1 складає 180° , тобто $\alpha + \theta = 180^\circ$. Вимірювши кут α_1 , неважко визначити і крайовий кут. На гідрофільній поверхні (рис. 1.2, *в, г*) сума кутів α_2 і θ рівна 90° , тобто $\alpha_2 + \theta = 90^\circ$. Тому кут нахилу пластини в цьому випадку рівний крайовому куту.

Крім цих методів крайовий кут може бути визначений по висоті підйому шаруючи рідині, що примикає до стінки посудини (рис. 1.3). Відповідно до закону Гауса - Лапласа можна написати[1]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\rho_P g h^2}{\sigma_{PG}}, \quad (1.1)$$

де ρ_P — густина рідини, кг/м³.

Значення крайового кута на поверхні свіжорозколеного графіту залежно від висоти підйому рідини рівні: $83,2^\circ$ при $h = 0,032$ см, $84,5^\circ$ при $h = 0,026$ см, $84,6^\circ$ при $h = 0,024$ см. З приведених даних витікає, що висота підйому рідини

незначна. Тому вона повинна вимірюватися з великою точністю.

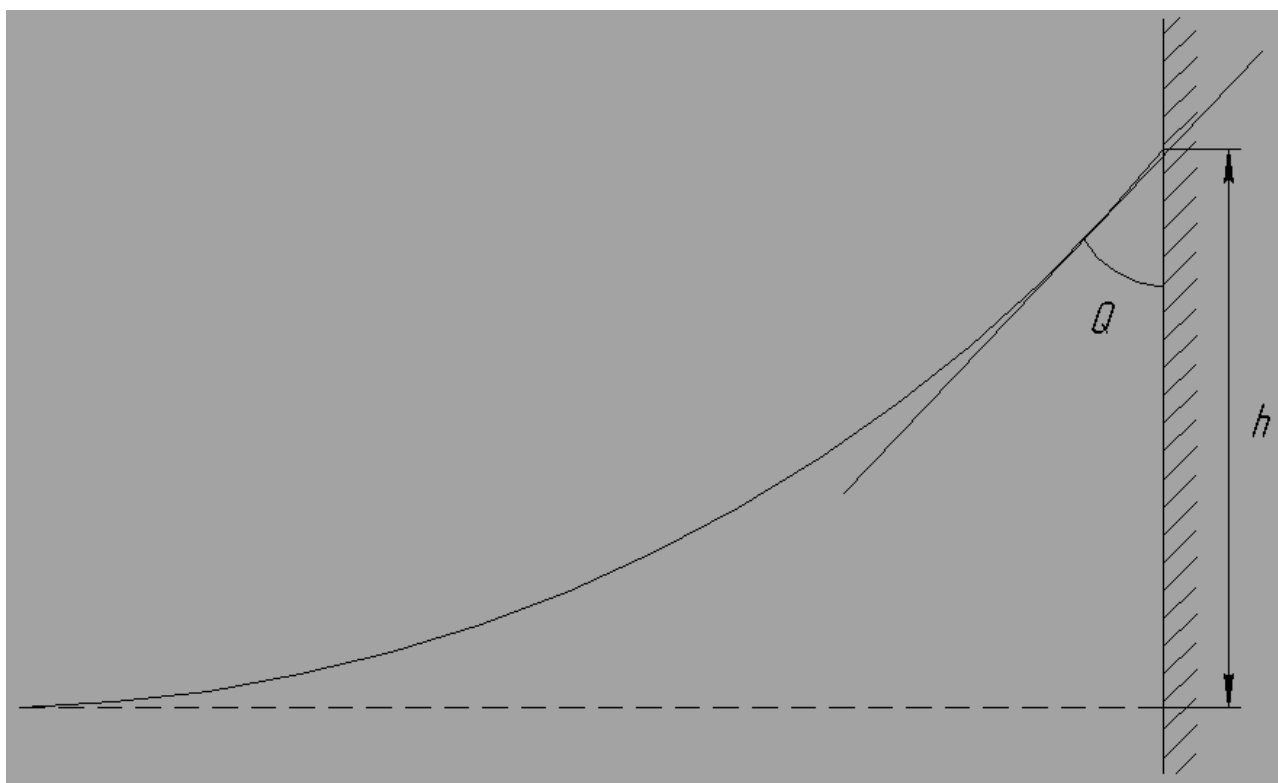


Рисунок 1.3 — Висота підйому рідини по вертикальній стінці

Прямі методи вимірювання крайового кута змочування забезпечують простоту процесу вимірювання, оскільки потребують вимірювання тільки кута або висоти, проте точність вимірювання не є високою оскільки процес потребує декількох вимірювань і усереднень значень. Також вимірювання кутових величин носить більшу погрішність ніж вимірювання лінійних величин.

1.2 Розрахунок крайового кута за формою краплі

Крім безпосереднього вимірювання крайового кута можна визначити його значення за основним розміром прилиплої краплі: по висоті h і радіусу або діаметру площі контакту краплі з поверхнею r_k (рис. 1.4).

Знаючи ці розміри розраховують кут по наступних формулах[1] :

$$\text{при } \theta < 90^\circ \quad \text{tg } \theta = \frac{2hr_k}{r_k^2 - h_k^2}, \quad (1.2)$$

$$\text{при } \theta > 90^\circ \quad \text{tg } \theta = \frac{\sqrt{2hr_k - h^2}}{r_k - h}. \quad (1.3)$$

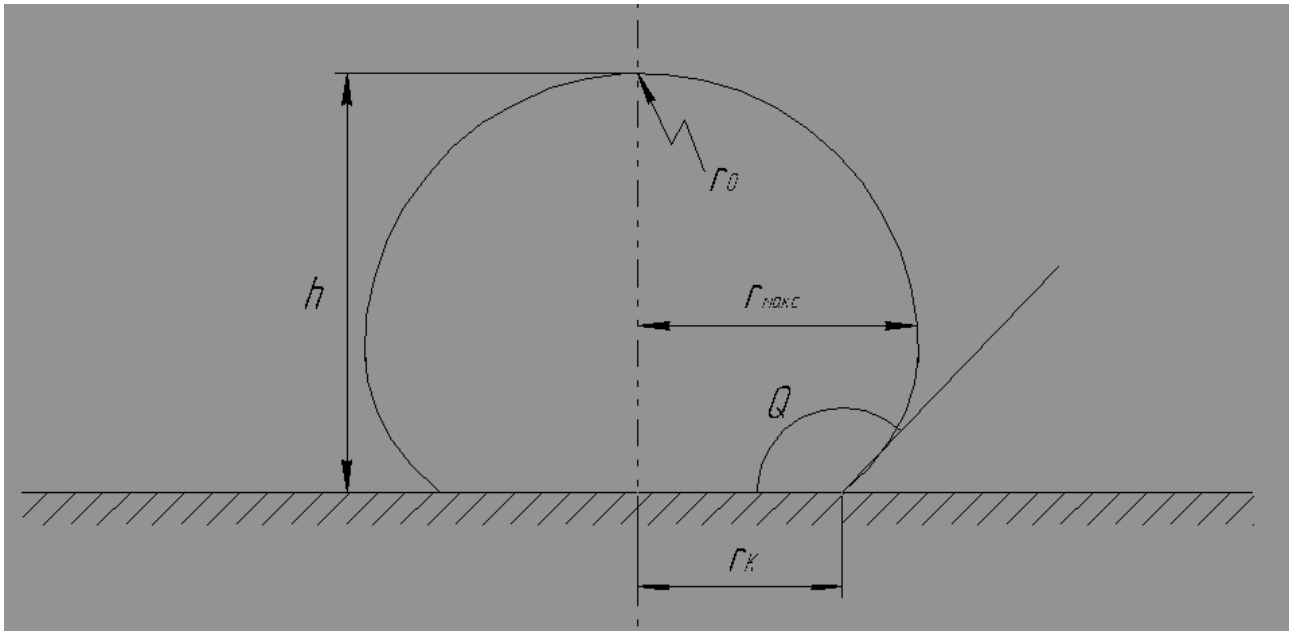


Рисунок 1.4 — Крапля рідини на горизонтальній поверхні

Змочування іноді виражають через $\cos \theta$. Тому, замінивши $\text{tg } \theta$ у формулах (1.2) і (1.3) через $\cos \theta$, одержимо:

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

$$\text{при } \theta > 90^\circ \quad \cos \theta = 1 - \frac{h}{r_k}. \quad (1.5)$$

Для крапель малого розміру, коли деформацією за рахунок маси краплі можна нехтувати і $\theta > 90^\circ$, формула (1.2) спрощується:

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

Формула (1.6) є спрощеною, але менш точна, чим формула (1.3).

Крім безпосереднього вимірювання розмірів крапель можна визначити крайовий кут, виходячи із співвідношення між радіусами, які характеризують кривизну поверхні краплі.

Для $\theta > 90^\circ$ співвідношення між r_0 і $r_{\text{макс}}$ визначають з наступних умов:

$$r_0 \approx r_{\text{макс}} \frac{r_{\text{макс}}}{2a^2}, \quad (1.7)$$

$$a = \sqrt{\frac{2\sigma_{PF}}{\rho_P g}}, \quad (1.8)$$

де r_0 — радіус кривизни вершини краплі, м; $r_{\text{макс}}$ — найбільша відстань точок медіального січення краплі від її осі (рис. 1.4), м; a — капілярна постійна.

Для різного відношення h/r_0 і r_0/r_k по таблицях визначають крайовий кут. Цей метод придатний для крайових кутів, значення яких не перевищують 20° .

При вимірюванні крайового кута дрібних крапель діаметром 80–200 мкм були зіставлені результати, одержані двома різними методами. Один з методів базується на розрахунку крайового кута за профілем краплі. Другий метод полягає в безпосередньому вимірюванні крайового кута. Середнє значення крайового кута крапель метилсаліцилу, яке визначене двома методами, складає $8^\circ 2'$ і $8^\circ 4'$. Досягнутий майже ідеальний збіг, що свідчить про можливість розрахунку крайового кута за формою краплі.

Похибка в розрахунках крайового кута за формою крапель пов'язана з неточністю визначення контуру краплі, крім того, можливі нерегулярні похибки, викликані відхиленнями від умов, в яких справедливі розрахункові рівняння і таблиці.

Точність вимірювань контуру краплі залежить не тільки від абсолютних значень радіусу і висоти краплі, але і від їх відношення. Похибку, одержану в результаті вимірювань цього відношення, позначимо через $\Delta h/r$. Нерізкість контуру краплі, тобто похибку вимірювання проекції краплі, перпендикулярної контуру краплі, позначимо через Δr . Для визначення співвідношення між h і r треба знати кут φ , тобто кут нахилу дотичної в будь-якій точці контуру краплі (рис. 1.1). Похибки при вимірюванні цього кута рівні $\Delta\varphi$.

У загальному вигляді можливі похибку вимірювання можна виразити наступною формулою:

$$\Delta \frac{h}{r} = \frac{\Delta r}{r \cos \varphi} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta r}{r} \left(\frac{h}{r} \right). \quad (1.9)$$

Можна оцінити внесок різних складових похибки при фотографуванні контуру краплі. Для краплі діаметром 1,6 мм при збільшенні, рівному 5, похибка

за рахунок Δr не перевищуватиме 0,4%. При подальшому збільшенні розмірів краплі відносна похибка $\Delta h/r$ падає. Проте надмірне збільшення веде до зростання розмірів фотознімків, що в деяких випадках створює проблеми при їх обробці. Найбільша точність розрахунку досягається в тих випадках, коли крайовий кут має значення 30—60° і більші 115°.

Похибки у вимірюваннях крайового кута за профілем краплі можуть бути викликані відхиленням краплі від осі симетрії. Ці відхилення виникають в результаті попадання бульбашки повітря всередину краплі, за рахунок не горизонтальності і шорсткості змочуваної поверхні і інших причин, проте даний метод широко використовується у сучасних приладах оскільки він дає можливість проводити вимірювання і отримати результати з потрібною точністю, що досягається використанням сучасної техніки і технологій.

1.3 Визначення крайового кута методом занурення

Цей метод базується на вимірюванні маси пластинки або циліндра при зануренні їх в рідину. При цьому відбувається втягування або виштовхування твердого тіла залежно від того, змочується або не змочується воно рідиною.

Метод занурення пластин звичайно застосовують для визначення крайових кутів на гідрофільних поверхнях. У цих умовах відбуватиметься втягування пластинки в рідину і збільшення її маси на величину Δmg (де Δm — різниця в масі між частково зануреною в рідину і сухою пластинкою).

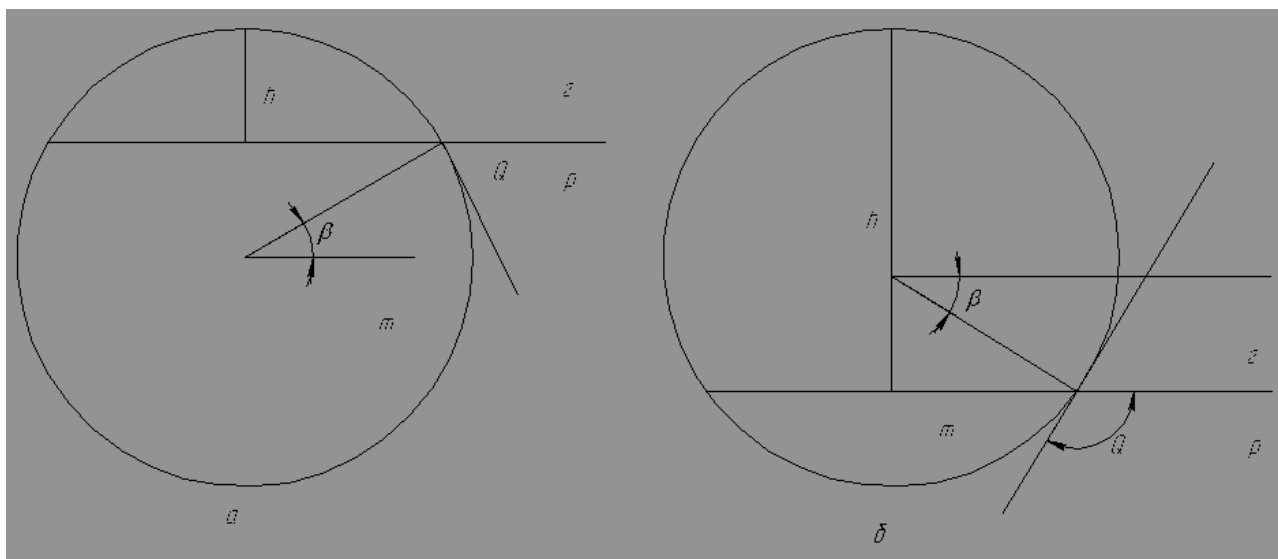
Виштовхуюча сила протидіятиме вазі пластини і втягуючій силі, яка виникає по периметру змочування L . В умовах рівноваги можна написати [1]:

$$L\sigma_{\text{рГ}} \cos\theta = \rho Shg - \Delta mg, \quad (1.10)$$

де ρ — густина рідини, кг/м³; S — поперечний перетин пластини, м²; h — глибина занурення пластини, м.

З рівняння (1.10) можна одержати формулу для визначення крайового кута:

$$\cos \theta = \frac{g(\rho Sh - \Delta m)}{L\sigma_{\text{PG}}} \quad (1.11)$$



a —гідрофільна поверхня; *b* — гідрофобна поверхня

Рисунок 1.5 — Визначення крайового кута методом занурення сферичної частинки в прозору рідину

Прилади для визначення крайового кута дозволяють по відомих σ_{PG} , Δm , ρ і S знайти його величину залежно від глибини занурення пластини.

Реєстрація глибини занурення пластини в рідину може бути здійснена за допомогою катетометра або спеціального пристрою з шкалою, що світиться. Показники на цій шкалі тарують залежно від глибини занурення. Величина крайового кута метилового спирту на платиновій пластинці, визначена цим методом, коливається в межах $28,8 \pm 0,4^\circ$.

Широко застосовують метод вимірювання крайового кута шляхом занурення в рідину полого циліндра. Цей метод точніший, чим метод занурення пластини. У цих умовах крайовий кут також визначають на основі рівняння (1.10). Периметр змочування L рівний сумі зовнішньої $L_{\text{ЗН}}$ і внутрішній L_0 довжин кіл полого циліндра.

Якщо величини в правій частині рівняння (1.10) позначити через M_1 то крайовий кут при зануренні циліндра визначатиметься по наступній формулі:

$$\cos \theta = \frac{M_1 g}{\sigma_{\text{PG}}(L_{\text{ЗН}} + L_0)} \quad (1.12)$$

Величину M_1 можна або визначити експериментально, або розрахувати. Експериментальні значення M_1 для циліндра, виготовленого з пластини і зануреного в бензол, при 20°C складають 0,1464 і 0,1482 г для закритої і відкритої посудин відповідно.

Для розрахунку величини M_1 визначають площу поперечного перетину полого циліндра, глибину його занурення, різниця в масі сухого і зануреного в рідину циліндра. Значення інших величин визначають так само, як і у разі занурення пластинки, а крайовий кут знаходять залежно від глибини занурення.

Точність вимірювання крайового кута при $\sigma_{PI} = 25$ ерг/см² і глибині занурення до 5 см залежить від значення θ : при θ , близькому до 0°, точність складає 3°; при $\theta = 10^\circ$ точність - 0,5°; при $\theta = 50^\circ - 90^\circ$ точність рівна 0,1°.

Особливі труднощі можуть виникнути при вимірюванні крайового кута частинок, занурених в рідину. У разі сферичної частинки вимірюють висоту кульового сегменту h після занурення частинки в прозору рідину (рис. 1.5).

Якщо відомий діаметр частинок d , то для визначення крайового кута використовують наступні формули:

$$\text{при } \theta < 90^\circ, \text{ (рис. 1.5, а), } \theta = 90^\circ - \beta, \theta = 90^\circ - \arcsin\left(1 - \frac{2h}{d}\right), \quad (1.13)$$

$$\text{при } \theta > 90^\circ \text{ (рис. 1.5, б), } \theta = 90^\circ + \beta, \theta = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{2h}{d} - 1\right). \quad (1.14)$$

При знаходженні в непрозорій рідині частинок несферичної форми можна виміряти кут α_1 (рис. 1.6).

В умовах рівноваги дій поверхневих натягів і у зв'язку з тим, що сума їх проекцій на горизонтальну вісь рівна нулю по аналогії з раніше прийнятим методом можна написати:

$$\sigma_{TG} \sin \alpha_1 - \gamma_{TЖ} \sin \alpha_2 + \sigma_{ЖГ} \sin \gamma = 0. \quad (1.15)$$

Кут γ складає всього декілька градусів і його можна прийняти рівним нулю. Тоді замість рівняння (1.15) запишемо:

$$\sigma_{TG} \sin \alpha_1 - \gamma_{TЖ} \sin \alpha_2 = 0, \text{ або } \sin \alpha_2 = \frac{\sigma_{TG}}{\gamma_{TЖ}} \sin \alpha_1. \quad (1.16)$$

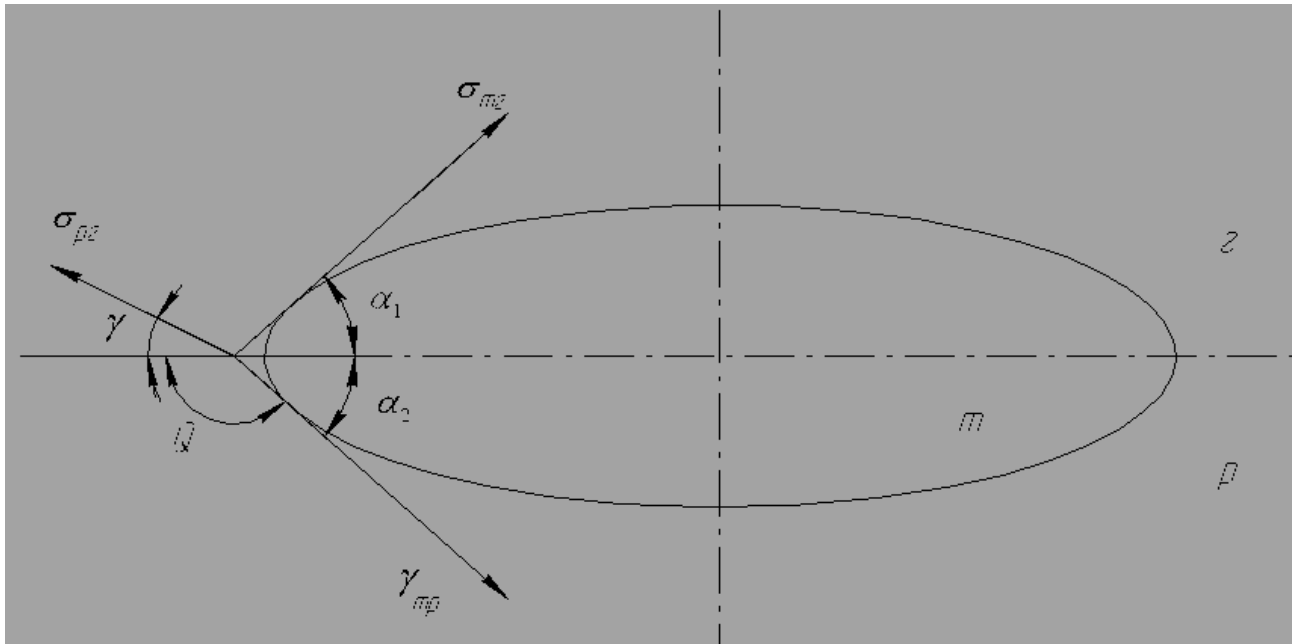


Рисунок 1.6 — Визначення крайового кута методом занурення несферичної частинки в непрозору рідину

З рис. 1.6 витікає, що $\sin \alpha_2 = \sin \theta$. Тому:

$$\sin \theta = \frac{\sigma_{PL}}{\gamma_{TJ}} \sin \alpha_1. \quad (1.17)$$

Кут α_1 визначають експериментально. Середні значення цього кута для шлаку складу $\text{CaO—SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ на поверхні розплаву заліза складають $36\text{—}48^\circ$ залежно від складу контактуючих фаз.

Якщо відоме відношення σ_{PL}/σ_{TP} , то можна за допомогою формули (1.17), знаючи кут α_1 визначити крайові кути для деяких частинок, плаваючих в рідині.

Визначення крайового кута методом занурення частинок в рідину застосовується у тому випадку, коли густина рідкого і твердого середовищ мало відрізняється один від одного. Цей же метод можна застосовувати при зануренні краплі однієї рідини в іншу.

Визначення крайового кута методом занурення дозволяє визначити кут змочування з досить високою точністю, проте при розрахунку потрібно враховувати ще інші параметри, які не є завжди відомими і тому це вносить деякі труднощі при створенні відповідних приладів.

1.4 Визначення крайового кута в капілярах

Крайовий кут може бути визначений, виходячи з особливостей поведінки рідин в капілярах.

При встановленні рівноваги між вагою рідини в циліндричному капілярі і капілярною силою висота підйому рідини в ньому визначається співвідношенням [1]:

$$h = \frac{2\sigma_{жГ} \cos \theta}{\rho_{ж} g r} - \frac{r}{\cos \theta} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{1 - \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}\right), \quad (1.18)$$

де r — радіус капіляра, м.

Згідно рівняння (1.18) висота підйому h залежить від крайового кута і поверхневого натягу рідини. Звідси по відомому $\sigma_{рГ}$ можна визначити θ і навпаки.

Проте в рівнянні (1.18) не враховується кінетика процесу і час досягнення певної висоти. Відповідно до робіт час підйому рідини, що має в'язкість η , визначається по формулі

$$\tau = \frac{8\eta}{r^2 \rho_{р} g} \left(h_{np} \ln \frac{h_{np}}{h_{np} - h} - h \right), \quad (1.19)$$

де h_{np} — гранична висота підйому рідини, м.

Гранична висота підйому рідини рівна:

$$h_{np} = \frac{2\sigma_{жГ} \cos \theta}{r \rho_{ж} g}. \quad (1.20)$$

Для досягнення граничної висоти відповідно до рівняння (1.19) потрібен нескінченний час. Якщо обмежитися деякою часткою від граничної висоти, то час стає кінцевим. Так, для води $h = 0,999h_{np}$ досягається за 1,5 хв. Для в'язких рідин, наприклад неполярних масел, висота, близька до граничної, досягається за триваліший час — більше годину. Тому вказаний метод не прийнятний для в'язких рідин. Крім того, треба враховувати можливість зміни крайового кута (гістерезис) під час підйому. Тому формула (1.19) є певною мірою наближеною.

Для усунення цих неточностей можливо використання інших варіантів методу капілярного підняття рідини для визначення крайового кута. Один з таких варіантів полягає в зіставленні висот підйому рідини в капілярі і трубці, радіус якої виключає капілярні явища. На рис. 1.7 показаний прилад, в якому діаметр трубки складає 1 мм, а діаметр капіляра — 0,0064 мм. Висота підйому рідини у відповідності (1.18) залежить від наступних величин:

$$h = f(\sigma_{жг}, \theta, \rho_{ж}, r), \quad (1.21)$$

де r — радіус капіляра або трубки, м.

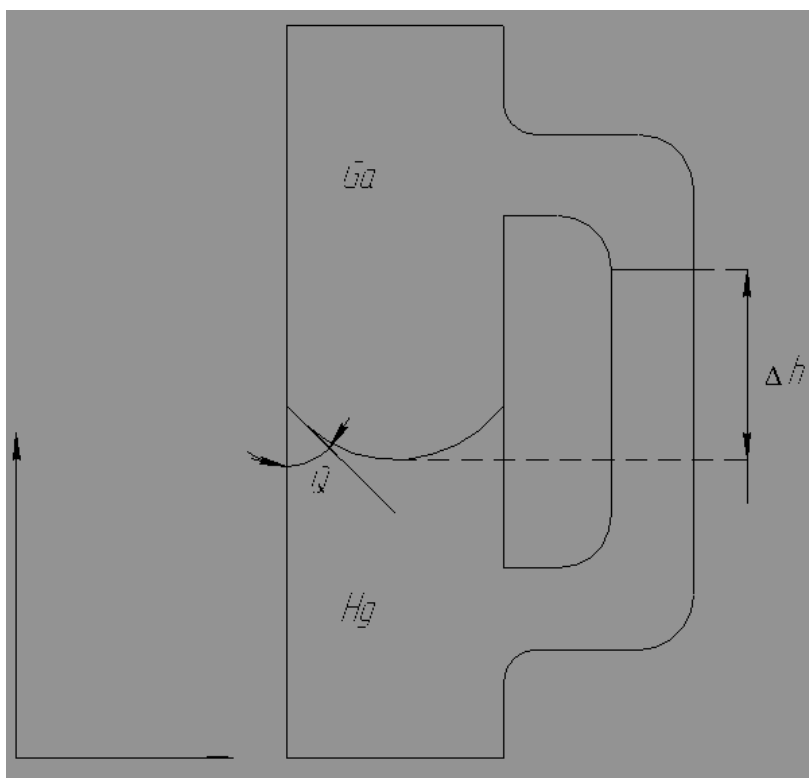


Рисунок 1.7 — Схема приладу для визначення крайового кута системи галій - ртуть

Різниця в рівнях рідини в капілярі і в трубці може бути представлена у вигляді:

$$\Delta h = f_1(\sigma_{жг}, \theta, \rho_{ж}, r_1) - f(\sigma_{жг}, \theta, \rho_{ж}, r_2). \quad (1.22)$$

Рівняння (1.22) дозволяє визначити крайовий кут, якщо відома величина Δh .

Крім того, знаючи крайові кути різних рідин, можна наперед провести тарировку величини Δh залежно від значень цих кутів.

Подібні визначення крайового кута особливо ефективні в тих випадках, коли потрібно знайти крайовий кут при контакті однієї рідини з іншою, наприклад для системи галій — ртуть (рис. 1.7).

Крайовий кут можна визначити, при знаходженні краплі рідини в конічному капілярі (рис. 1.8). В умовах рівноваги, коли капілярний тиск знизу і зверху краплі рівні, одержимо:

$$\Delta h = \frac{V \Delta \rho g \cos \theta}{2\pi S_1} \cdot \frac{R_1 \cos(\beta - \alpha)}{S_1} \cdot \frac{R_2 \cos(\beta - \alpha)}{S_1}, \quad (1.23)$$

де V —об'єм краплі, м^3 ; $\Delta \rho$ — різниця щільності краплі і парової фази, $\text{кг}/\text{м}^3$; S_1 — поверхня краплі, м^2 ; решта позначень відповідно до рис. 1.8.

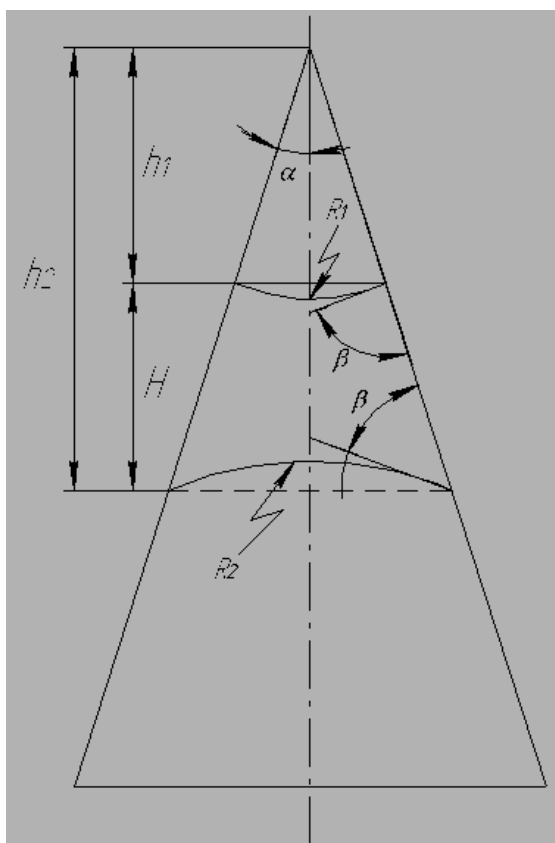


Рисунок 1.8 — Крапля рідини у конічному капілярі методом капілярного підняття рідини

Після спрощень формула (1.23) приймає вигляд:

$$\Delta h = \frac{A}{B} \Delta \rho g \cos \theta, \quad (1.24)$$

де A і B — параметри, що включають величини, які безпосередньо вимірюються в досліді.

Для визначення крайового кута методом капілярного підйому рідини можуть бути використані вузькі щілини змінного перетину. Схематично підйом рідини на висоту h в щілині шириною δ показаний на рис. 1.9.

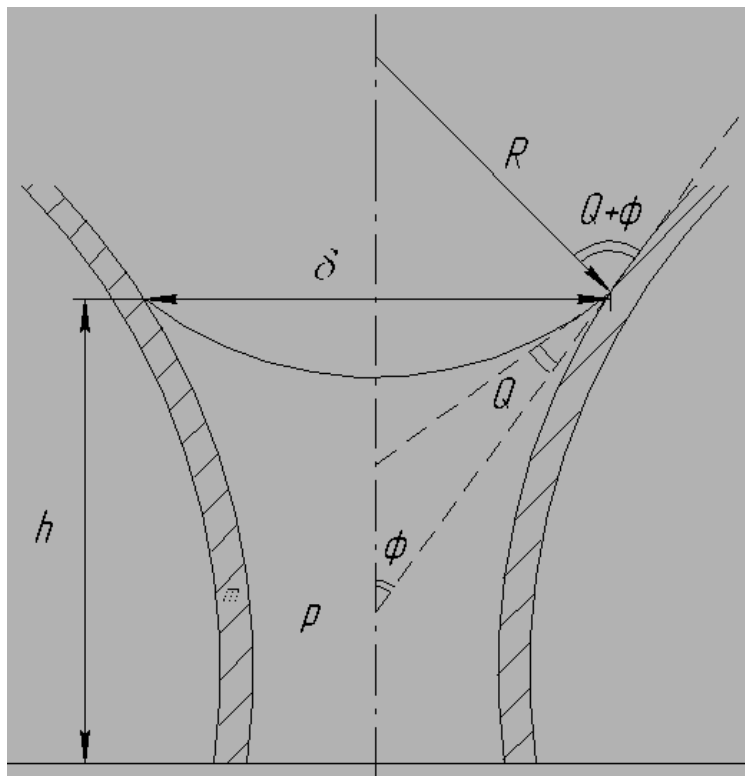


Рисунок 1.9 — Рідина у вузькій щілині

Рівноважна висота підйому рідини в щілині h визначається по формулі:

$$h = \frac{\sigma_{жг}}{\rho g R}, \quad (1.25)$$

де R — радіус кривизни циліндричної поверхні меніска (рис. 1.9), м.

З рис. 1.9 витікає, що:

$$R = \frac{\delta}{2 \cos(\theta + \Phi)}. \quad (1.26)$$

Комбінуючи (1.25) і (1.26), одержимо[1]:

$$h = \frac{\sigma_{жг} \cos(\theta + \Phi)}{\rho g R}. \quad (1.27)$$

Всі величини, що входять у формулу (1.27), окрім θ , визначаються експериментально, що дозволяє розрахувати крайовий кут. При визначенні

крайових кутів у разі змочування твердих фаз власними розплавами погрішність у вимірюваннях, одержаних вище вказаним методом (рис. 1.9), досягає до $\pm 1,5^\circ$ при абсолютних значеннях крайових кутів, рівних $15\text{—}30^\circ$.

Крім статичних методів визначення крайового кута можна застосовувати динамічні методи, зокрема рух рідини по капіляру. При цьому використовується наступна формула:

$$\cos \theta = \frac{2\eta l^2}{r\sigma_{жг}\tau}, \quad (1.28)$$

де τ — час, протягом якого рідина пройде по капіляру відстань l .

Рух рідини на обмеженій ділянці капіляра визначається наступною формулою:

$$\cos \theta = \frac{2\eta\Delta l(\Delta l + 2l_1)}{r\sigma_{жг}\Delta\tau}, \quad (1.29)$$

де $\Delta\tau$ — час руху рідини на ділянці; Δl — відстань, пройдена рідиною від початку капіляра.

Рівняння (1.28) і (1.29) визначають умови руху рідини в горизонтально розташованому капілярі і відомі як рівняння Ушборна.

Справедливість формули (1.29) може бути перевірена зіставленням значень радіусу капіляра, розрахованих по цій формулі і виміряних безпосередньо. Таке зіставлення проведено для дуже вузьких капілярів, радіусом менше 25 мкм.

Зіставлення свідчить про задовільну збіжність експериментальних і розрахункових даних, що дає підставу використовувати формулу (1.29) для визначення крайового кута.

Визначення крайового кута змочування в капілярах потребує, як правило, визначення висоти підйому рідини в ньому, що є досить зручним і простим у процесі вимірювання, проте точність вимірювання не є високою, а також даний метод не застосовують для в'язких рідин. Виникають труднощі при створенні потрібних капілярів малого діаметру і не всі величини, які входять у формулу розрахунку крайового кута змочування є завжди відомими.

1.5 Визначення крайового кута на нитках

При використанні методу лежачої краплі кращі результати будуть тоді, коли крапля має великі розміри. Але в цих умовах виникають небажані явища. Йдеться про значний час встановлення рівноваги, збільшенні площі контакту краплі і гістерезис. Крім того, накладається дія гравітаційної сили. Все це призводить до того, що визначені крайові кути не завжди будуть рівноважними. Тому пропонується метод вимірювання крайових кутів малої краплі, яка „садиться” на нитку. У цих умовах рівновага досягається швидко, гістерезис виключається, а гравітаційна сила не впливає на крайовий кут.

Перш за все, необхідно встановити мінімальний радіус краплі, коли дією гравітаційної сили можна нехтувати. При цьому виходять з припущення, що гідростатичний тиск в краплі повинен бути значно менше, ніж тиск, викликаний кривизною поверхні краплі (так званий лапласовий тиск), тобто:

$$\rho_P g h_{\text{макс}} \ll \frac{2\sigma_{\text{ПГ}}}{r^2}, \quad (1.30)$$

де r — радіус краплі, м; $h_{\text{макс}}$ — максимальна висота краплі, м.

Вважаючи, що:

$$r^2 \ll a^2 = \frac{2\sigma_{\text{ПГ}}}{\rho_P g}, \quad (1.31)$$

де a — капілярна постійна Лапласа.

Прийнявши $\rho_P = 1 \text{ г/см}^3$, $\sigma_{\text{ПГ}} = 73 \text{ ерг/см}^2$, $g = 980 \text{ см/с}^2$, визначимо мінімальний радіус краплі, який не повинен перевищувати 1,2 мм.

Прямі вимірювання крайового кута по нахилу дотичної в даному випадку можуть дати велику похибку. Поблизу точки контакту краплі з ниткою (т. A , рис. 1.10) крива профілю краплі (меридіальна крива) дуже складна, а проведення дотичної в т. A є складною операцією. Кут β рис. 1.10 не рівний крайовому куту. Тому для знаходження крайового кута необхідно проводити вимірювання тих величин, які можна визначити експериментально з найменшою похибкою. На рис. 1.10 зображена частина краплі рідини, яка “обвиває” вертикальну нитку.

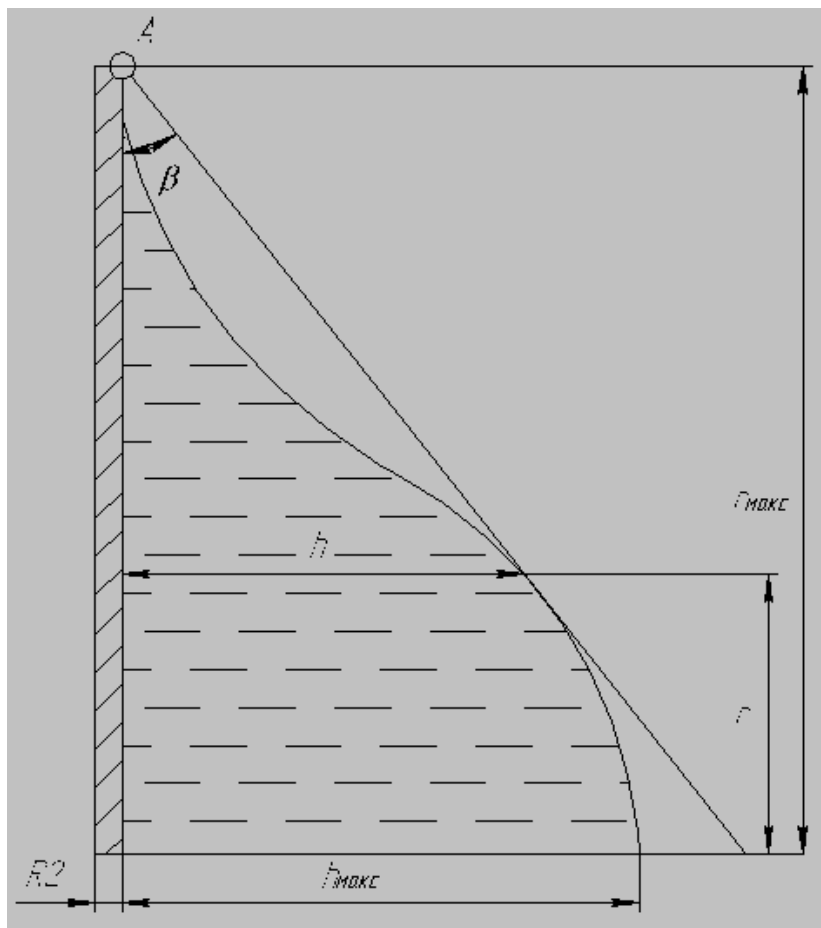


Рисунок 1.10 — Профіль краплі на нитці

На основі загального варіаційного методу рішення з урахуванням умов термодинамічної рівноваги і наявності адсорбційного шару в краплі одержимо наступний вираз для визначення крайового кута [1] :

$$\cos \theta = \frac{(x_{\max}^2 - 1)x \cos \beta - x_{\max} (x^2 + 1)}{x_{\max}^2 - x^2}, \quad (1.32)$$

де x — безрозмірна змінна, рівна $x = h/R$, і $x_{\max} = h_{\max}/R$ (рис. 1.10); β — допоміжний кут між віссю нитки і дотичною до утворюючої краплі, $^{\circ}$; R — радіус нитки, м.

Для обчислення крайового кута по рівнянню (1.32) необхідно виміряти β , h , h_{\max} і R .

Визначення безрозмірних величин x і x_{\max} , які входять у формулу (1.32) може бути проведено по фотографіях. Вимірювання кута β при відносно невеликих розмірах краплі не завжди точні. Тому бажано проводити вимірювання не кутових, а лінійних величин.

Для того, щоб уникнути вимірювань кутових величин, можна скористатися наступним рівнянням:

$$\cos \theta = \frac{k'x_{\text{макс}} + \frac{1}{x_{\text{макс}}}}{1 + k'}, \quad (1.33)$$

де k' — модуль, який залежить від кута β і величини r , що є радіусом вертикально розташованої краплі (рис. 1.10).

При визначенні крайового кута за формулою (1.33) приймають таке значення радіусу r , яке відповідає розміру краплі h , що становить задану частину від максимальної величини $h_{\text{макс}}$. Крім того, для розрахунків треба знати радіус нитки і значення $h_{\text{макс}}$ і мати перелічувальні графіки. Всі величини у формулі (1.33), також як і у формулі (1.32), відносні, тому всі вимірювання можна робити по фотографіях.

Визначення крайового кута краплі на нитці можна використовувати в умовах високого тиску і термостатування.

Як вже наголошувалося, крайовий кут на нитках залежить від радіусу нитки. На основі тих же припущень, що і раніше, а саме, неточності визначення крайового кута в точці дотику і необхідності вимірювання тих величин, які дають меншу погрішність, запропонована наступна формула, яка дозволяє оцінити вплив радіусу нитки на крайовий кут:

$$\frac{r_{\text{макс}}}{a} = \frac{R}{a} \cos \theta \left\{ 0.809 + \lg \left[\frac{a}{R(1 + \sin \theta)} \right] \right\}, \quad (1.34)$$

де $r_{\text{макс}}$ — максимальний радіус краплі (рис. 1.10), м; a — капілярна постійна.

Рівняння (1.34) зв'язує наступні величини:

$$\frac{r_{\text{макс}}}{a} = f(R, \theta).$$

Величини $r_{\text{макс}}$ і R неважко виміряти, а значення a легко розрахувати. У зв'язку з цим формулу (1.34) можна застосовувати для визначення крайового кута при змочуванні нитки.

Отже, крайовий кут може бути визначений на основі вимірювань розмірів

краплі, проте даний метод потребує знання (вимірювання) багатьох величин, які входять у формулу розрахунку крайового кута змочування і ці величини можуть бути визначені не завжди точно, що приводить до значної похибки результату досліду. Також використання малих крапель на нитках не завжди є зручним і можливим тому цей метод потребує дуже точних засобів вимірювальної техніки для його реалізації.

1.6 Вибір методу для вимірювання крайового кута змочування і постановка задачі на роботу

Перед вибором методу вимірювання крайового кута проаналізуємо коротко існуючі методи, виділивши їхні кращі і гірші сторони. Прямі методи вимірювання крайового кута змочування забезпечують простоту процесу вимірювання, оскільки потребують вимірювання тільки кута або висоти, проте точність вимірювання не є високою оскільки процес потребує декількох вимірювань і усереднень значень, а також вимірювання кутових величин носить більшу погрішність ніж вимірювання лінійних величин.

Похибки у вимірюваннях крайового кута за профілем краплі можуть бути викликані відхиленням краплі від осі симетрії. Ці відхилення виникають в результаті попадання бульбашки повітря всередину краплі, за рахунок не горизонтальності і шорсткості змочуваної поверхні і інших причин, проте даний метод широко використовується у сучасних приладах оскільки він дає можливість проводити вимірювання і отримати результати з потрібною точністю, що можна реалізувати з використанням сучасної техніки і технологій.

Визначення крайового кута методом занурення дозволяє визначити кут змочування з досить високою точністю, проте при розрахунку потрібно враховувати ще інші параметри, які не є завжди відомими і тому це вносить деякі труднощі при створенні відповідних приладів.

Визначення крайового кута змочування в капілярах потребує, як правило,

визначення висоти підйому рідини в ньому, що є досить зручним і простим у процесі вимірювання, проте точність вимірювання не є високою, а також даний метод не застосовують для в'язких рідин. Виникають труднощі при створенні потрібних капілярів малого діаметру і не всі величини, які входять у формулу розрахунку крайового кута змочування є завжди відомими.

Вимірювання крайового кута на нитках потребує вимірювання багатьох величин, які входять у формулу розрахунку кута змочування і ці величини можуть бути визначені не завжди точно, що приводить до значної похибки результату дослідження.

Для визначення крайового кута змочування потрібно вибрати такий метод, який би забезпечував високу точність вимірювання, був би простим у реалізації, а також давав можливість проводити контроль за короткий час. Цим характеристикам відповідає метод вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі. Даний метод дозволяє отримати велику точність результату вимірювання, яка буде залежати від точності формування краплі певного об'єму і точності обробки зображення. Також тут проводиться вимірювання тільки радіусу краплі, що дає змогу зробити процес вимірювання більш зручним і швидшим, а також простим у застосуванні для створення автоматизованих установок. Він не потребує вимірювання таких величин як поверхневий натяг рідини чи її густина, які залежать від тих чи інших умов і не завжди відомі, а потребує тільки значень об'єму і радіусу краплі досліджуваної рідини.

Виходячи з вищесказаного, всім цим вимогам відповідає апаратура, де використовується метод вимірювання крайового кута за розмірами краплі.

Отже, завдання на в даній роботі наступне:

- теоретично обґрунтувати метод вимірювання крайового кута за розмірами краплі;
- розробити структурну схему приладу для вимірювання крайового кута;
- розробити електричну принципову схему приладу для вимірювання крайового кута;
- розробити методику проведення контролю за допомогою

спроектованого приладу;

- зробити метрологічний аналіз для спроектованого приладу.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ

2.1 Теоретичне обґрунтування методу вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі

Крім безпосереднього вимірювання крайового кута можна визначити його значення за основним розміром прилиплої краплі тобто по висоті h і радіусу або діаметру площі контакту краплі з поверхнею r (рис. 2.1, рис. 2.2).

Знаючи ці розміри розраховують кут по наступних формулах [1] :

$$\text{при } \theta < 90^\circ \quad \cos \theta = \frac{r^2 - h^2}{r^2 + h^2}, \quad (2.1)$$

$$\text{при } \theta > 90^\circ \quad \cos \theta = 1 - \frac{h}{r}. \quad (2.2)$$

Проте задача вимірювання спроститься якщо ми будемо визначати крайовий кут, вимірюючи тільки радіус краплі, а висота буде нам відома наперед. Розрахувати висоту можна за відомими значеннями об'єму і радіуса краплі, оскільки радіус r ми будемо вимірювати в процесі досліду, то величина яка нам буде невідомою це об'єм. Тому дану величину потрібно знати наперед тобто ми будемо нею задаватися, видавлюючи краплю певного відомого об'єму. Розрахунок висоти і тим самим визначення крайового кута змочування буде відбуватися за умови, що крапля буде мати форму частини кулі(певний її сегмент). Це можливе для крапель малого розміру, коли деформацією за рахунок маси краплі можна нехтувати.

Отже, суть даного методу полягає у визначенні крайового кута змочування шляхом вимірювання радіуса краплі, яке буде відбуватися за допомогою системи, яка включає обчислювальну машину, оптичну систему і відеокамеру, і розрахунку цього кута за допомогою формул, виведення яких наведено нижче.

Розглянемо краплю на гідрофільній поверхні, тобто коли крайовий кут лежить в межах від 0° до 90° (рис. 2.1).

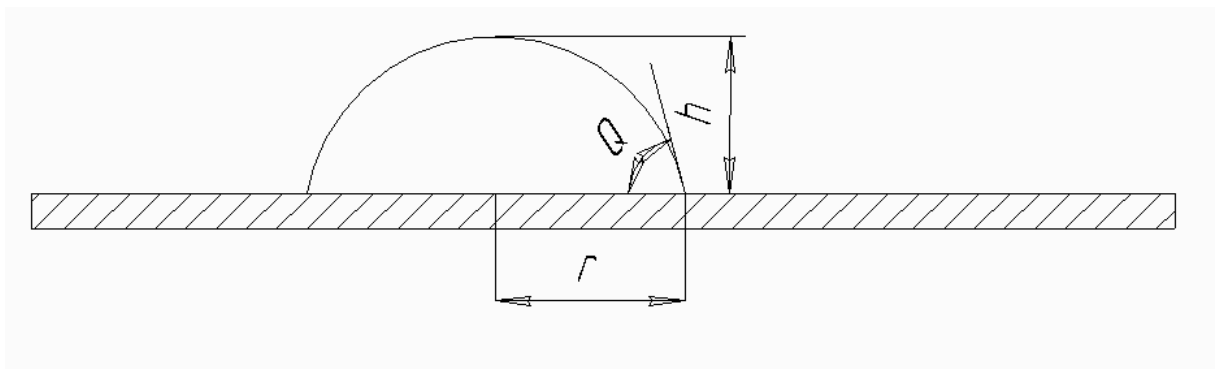


Рисунок 2.1 – Форма краплі на гідрофільній поверхні ОК

Оскільки об'ємом краплі ми задаємося, то вираз залежності об'єму від радіусу r і висоти h буде виглядати наступним чином:

$$V = \pi \cdot h^2 \cdot \left(\frac{r^2 + h^2}{2 \cdot h} - \frac{h}{3} \right). \quad (2.3)$$

Зробивши декілька спрощень, одержимо:

$$V = \frac{\pi}{6} \cdot (3 \cdot h \cdot r^2 + 3 \cdot h^3 - 2 \cdot h^3). \quad (2.4)$$

Визначаємо висоту краплі як функцію від об'єму і радіусу з формули:

$$h^3 + 3 \cdot h \cdot r^2 = \frac{6 \cdot V}{\pi}. \quad (2.5)$$

Розв'язавши рівняння (2.5) в середовищі Maple, отримаємо залежність висоти краплі від об'єму і радіусу:

$$h = \frac{\left[3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2} \right]^{\frac{2}{3}} - r^2 \cdot \pi^{\frac{2}{3}}}{\left[\pi \cdot (3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}) \right]^{\frac{1}{3}}}. \quad (2.6)$$

Підставляючи знайдену висоту у рівняння (2.1) отримаємо кінцеву формулу для визначення крайового кута:

$$\theta = \arccos \frac{\left[\frac{r^2 - \left(\left[\frac{3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}}{3} \right]^{\frac{2}{3}} - r^2 \cdot \pi^{\frac{2}{3}} \right)^2}{\left[\pi \cdot (3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}) \right]^{\frac{1}{3}}} \right]}{\left[\frac{r^2 + \left(\left[\frac{3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}}{3} \right]^{\frac{2}{3}} - r^2 \cdot \pi^{\frac{2}{3}} \right)^2}{\left[\pi \cdot (3 \cdot V + \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}) \right]^{\frac{1}{3}}} \right]}. \quad (2.7)$$

Отже, ми отримали вираз (2.7) для визначення крайового кута при його зміні від 0° до 90° .

Тепер розглянемо краплю на гідрофобній поверхні, тобто коли крайовий кут лежить в межах від 90° до 180° (рис. 2.2).

Значення даного кута можна визначити за умови, що крапля на поверхні ОК буде мати сферичну форму (буде частиною сфери), тобто ми будемо нехтувати дією сили тяжіння, яке можливе при малих розмірах краплі.

Об'єм частини сфери, яка знаходиться під поверхнею ОК, можна визначити за формулою:

$$V = \frac{1}{3} \pi H^2 (3R - H). \quad (2.8)$$

Із рис. 2.2 можна записати, що:

$$R^2 = H^2 + r^2. \quad (2.9)$$

У свою чергу:

$$H^2 = R - H. \quad (2.10)$$

Підставляючи (2.10) у (2.9) і розкриваючи дужки отримаємо, що:

$$R = \frac{r^2 + H^2}{2H}. \quad (2.11)$$

Підставляючи (2.11) у (2.8) і спрощуючи отриманий вираз, одержимо:

$$V = \frac{1}{6} \pi H (3r^2 + H^2). \quad (2.12)$$

Отже, ми можемо записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} V = \frac{1}{6} \pi H (3r^2 + H^2) \\ V = \frac{1}{3} \pi H^2 (3R - H) \end{cases} \quad (2.13)$$

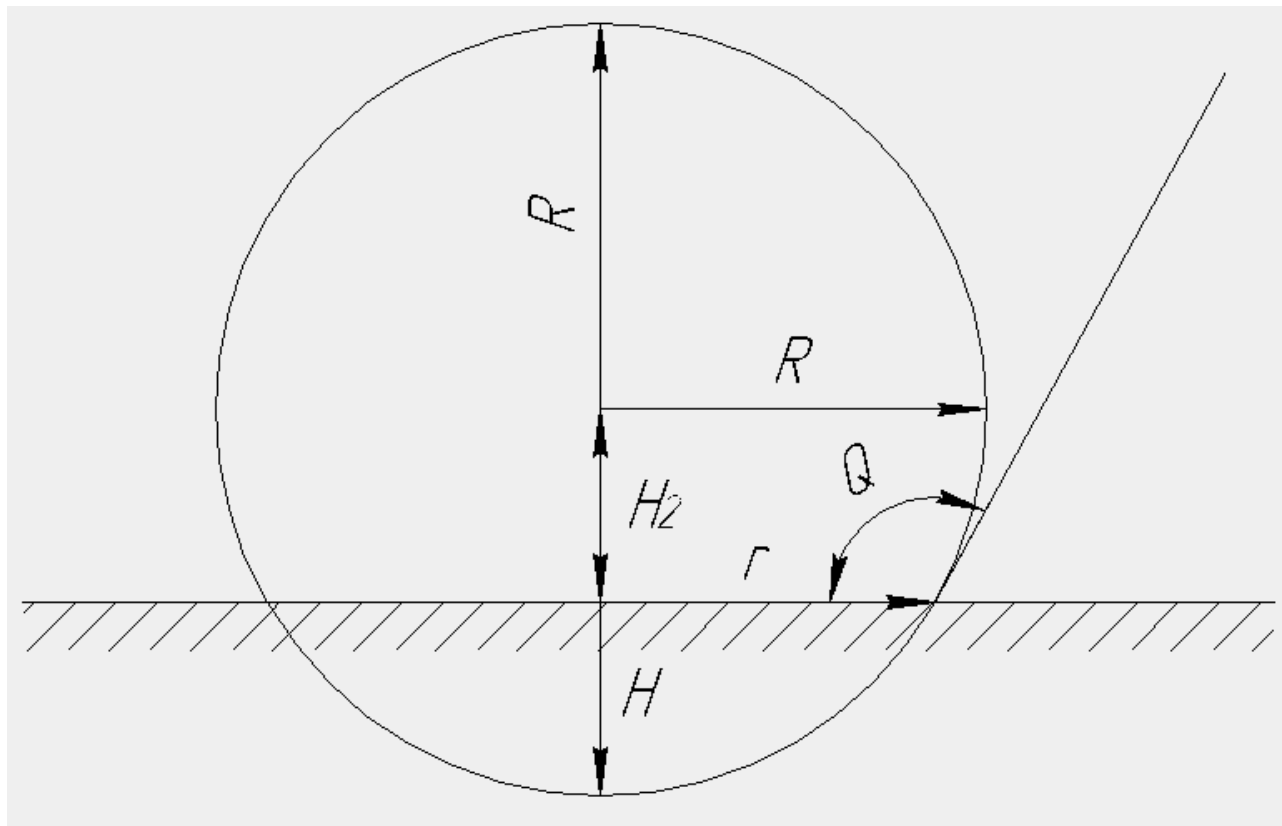


Рисунок 2.2 – Форма краплі на гідрофобній поверхні ОК

Як бачимо в цій системі двох рівнянь ми маємо дві невідомі величини – H і r . Радіус ми визначаємо безпосередньо його вимірюванням за допомогою відеокамери, а визначення об'єму опишемо далі.

Із першого рівняння системи (2.13) ми визначаємо радіус r , через об'єм V і висоту H :

$$r = \sqrt{\frac{2V}{\pi H} - \frac{H^2}{3}} \quad (2.14)$$

Висоту H визначаємо із другого рівняння системи (2.13):

$$H = \frac{\sqrt[3]{\frac{2 \cdot (\gamma(R, V))^2}{\pi} + R^2 \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \pi} + R \cdot \sqrt[3]{\gamma(R, V)}}}{\sqrt[3]{\gamma(R, V)}}, \quad (2.15)$$

де $\gamma(R, V) = -3V + 2R^3\pi + \sqrt{3 \cdot [-V \cdot (-3V + 4R^3\pi)]}$.

Отже, визначивши висоту H через відомі нам величини і підставивши її у вираз (2.14), ми зможемо розрахувати величину r .

Об'єм V ми знайдемо із виразу:

$$V = V_k - V_3, \quad (2.16)$$

де V_k — це об'єм кулі, який можна знайти із виразу — $V_k = 4\pi R^3/3$ по вимірному радіусу; V_3 — це об'єм краплі, який ми задаємо за допомогою системи формування краплі, він є наперед відомою величиною.

Крайовий кут ми визначаємо із виразу (2.2). Висоту краплі h визначимо із наступного виразу (рис. 2.2):

$$h = R + H_2 = R + R - H = 2R - H \quad (2.17)$$

Отже, значення самого кута, при його зміні від 90° до 180° буде:

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{2R - H}{r}\right) = \arccos\left(1 - \frac{2R - H}{\sqrt{\frac{2V}{\pi H} - \frac{H^2}{3}}}\right). \quad (2.18)$$

де H – висота, яку ми розраховуємо за формулою (2.15).

Визначення радіуса краплі буде відбуватися шляхом її фотографування зверху за допомогою відеокамери і послідувальною обробкою зображення на обчислювальній машині за допомогою програми написаної на мові Visual C++.

Розглянемо дещо детальніше операції, які робить комп'ютер при визначенні радіусу краплі. По-перше, оскільки зображення краплі ми розглядаємо через об'єктив, то воно буде збільшене, в залежності від коефіцієнту збільшення даної оптичної системи. По-друге, ЕОМ знаходить значення радіусу не в лінійних одиницях, а в певній кількості точок (пікселях - N_{pix}). Отже, для визначення дійсного значення радіусу краплі будемо використовувати таку залежність:

$$r_k = \frac{r'_k}{k}, \quad (2.19)$$

де r'_k — визначений радіус краплі за допомогою камери, м; k — коефіцієнт

збільшення мікроскопа, який є відомим.

Як було вже сказано r'_k визначається у пікселях і для переводу даної величини у лінійну величину, наприклад в мм, будемо використовувати таку залежність:

$$r'_k = \frac{N_{pix}}{K_{dpi}} \cdot 25,4, \quad (2.20)$$

де K_{dpi} — коефіцієнт, який залежить від розширення відеокамери, тобто від кількості точок яка припадає на один дюйм довжини.

Підкладаючи (2.20) у (2.19), отримаємо формулу для визначення радіуса краплі, яка враховує коефіцієнт збільшення мікроскопа, коефіцієнт, який залежить від розширення відеокамери, а також визначену кількість точок N_{pix} за допомогою комп'ютера:

$$r_k = \frac{N_{pix}}{k \cdot K_{dpi}} \cdot 25,4. \quad (2.21)$$

Визначений попередньо об'єм краплі і тепер її радіус вносяться у формулу (2.7) або (2.18) і обчислюється крайовий кут.

Отже, метод визначення крайового кута змочування за розміром краплі дозволяє реалізувати процес вимірювання за короткий проміжок часу, здійснюючи вимірювання тільки радіусу краплі.

2.2 Розробка компонентів приладу для вимірювання крайового кута змочування

2.2.1 Структурна схема приладу для вимірювання крайового кута змочування

Структурна схема містить наступні елементи: мікропроцесор (тип процесора вибрано AT90S4433) МП; кроковий двигун для видавлювання краплі

(FL57STH41-1006MA) КД, кроковий двигун для переміщення столика (FL57STH56-2804MA) і кроковий двигун для фокусування відеокамери КД; камера для зберігання досліджуваної рідини КМР; капіляр КП; поршень для видавлювання краплі П; фотодатчик ФД; блок живлення БЖ; об'єктив ОБ; відеокамера ВК; електронно-обчислювальна машина ЕОМ; монітор МН; освітлювач ОС і світлофільтр СФ, а також три мікрокнопки МК для реєстрації положення столика, поршня і відеокамери.

Процес роботи приладу полягає у наступному: мікропроцесор МП, який з'єднаний з комп'ютером ЕОМ через послідовний порт, одержавши сигнал від ЕОМ, посилає імпульси на кроковий двигун для видавлювання краплі КД. Кроковий двигун КД починає обертатися тим самим переміщуючи вертикально вниз поршень П, який видавлює рідину із камери КМР через капіляр КП. Перед початком процесу вимірювання столик СТ, поршень П, а також відеокамера ВК переміщуються у крайні положення, що реєструється за допомогою мікрокнопок МК.

Капіляр КП дозволяє отримати малого об'єму краплю ДК, яка під дією сили тяжіння переміщується на зразок твердого тіла ЗТТ. Механізм формування краплі показаний на рис. А.1.

При виході з трубки розмір краплі поступово наростає, але відривається вона тільки тоді, коли досягає цілком певного розміру. Це відбувається тому, що поки крапля недостатньо велика, сили поверхневого натягу достатні для того, щоб протистояти силі тяжіння і запобігти відриванню. Відрив же відбудеться тоді, коли вага краплі стане рівною силі поверхневого натягу, що утримує її.

Перед відривом утворюється шийка, радіус якої декілька менше радіусу трубки. Уздовж кола цієї шийки і діє сила поверхневого натягнення, яка у момент відриву повинна бути рівна силі тяжіння.

Якщо радіус шийки — r , а коефіцієнт поверхневого натягнення рідини — σ , то сила поверхневого натягу рівна, очевидно $2\pi r\sigma$. Отже, відривши краплі відбувається за умови [4]:

$$2\pi r\sigma = \frac{P}{F}, \quad (2.22)$$

де F — поправочний коефіцієнт, який визначають із таблиць; P — вага краплі, Н.

Насправді крапля не відривається по лінії кола шийки. В мить, коли розмір краплі досягає значення, визначуваного попередньою рівністю, шийка починає швидко звужуватися, як це показано на рис. А.1, причому її супроводить ще одна маленька крапля, як це показано на рис. А.1. Саме ця маленька крапля і робить похибку при формуванні краплі, яку можна зменшити використанням загостреного на кінці капіляра, а також зовнішню поверхню капіляра покрити гідрофобним покриттям.

В момент коли крапля ДК перемістить на зразок твердого тіла ЗТТ фотодатчик ФД посилає сигнал на мікропроцесор МП, який у свою чергу зупиняє кроковий двигун для видавлювання краплі КД і посилає інформацію обчислювальній машині ЕОМ про кількість обертів двигуна КД. ЕОМ переводить ці оберти у відстань, яку пройшов поршень, і визначає об'єм краплі ДК як об'єм прямокутного паралелепіпеда утвореного рухом поршня.

Далі мікропроцесор посилає імпульси на кроковий двигун для переміщення столика КД. Оскільки відстань від капіляра КП до відеокамери ВК з об'єктивом ОБ є фіксованою, то столик СТ здійснює горизонтальний рух за допомогою крокового двигуна КД на цю відстань. Переміщення столика із краплею відбувається для того щоб ми здійснювали фотографування краплі зверху, а не під кутом, в результаті чого визначений радіус не буде відповідати дійсному.

Здійснивши потрібну кількість обертів, що відповідає лінійному переміщенню на відстань, яка рівна відстані від капіляра КП до об'єктива ОБ, кроковий двигун КД, керований мікропроцесором МП зупиняється і починається процес отримання зображення краплі.

В момент зупинки крокового двигуна для переміщення столика КД починається процес фокусування відеокамери ВК, який здійснюється її

вертикальним переміщенням за допомогою крокового двигуна КД, який у свою чергу керується ЕОМ через мікропроцесор МП. Переміщення ВК відбувається до того моменту коли різкість зображення стане найкращою, що фіксується ЕОМ за допомогою відповідної програми.

Збільшене зображення краплі, яке пройшло через об'єктив ОБ, потрапляє на світлочутливу матрицю відеокамери ВК і перетворюється на електричний сигнал, який потрапляє до обчислювальної машини ЕОМ через USB — порт. Зображення записане в пам'яті комп'ютера підлягає аналізу в результаті якого ми отримаємо радіус краплі і відповідно розрахуємо крайовий кут.

Для отримання кращого зображення краплі ДК і зменшення похибки, досліджувану краплю ДК освітлюють монохроматичним світлом, яке одержують від освітлювача ОС через світлофільтр СФ.

Всі ці операції здійснюються автоматично за досить короткий час і ми можемо вже за декілька хвилин отримати потрібні нам результати, які відображаються на екрані монітора МН, який у свою чергу може знаходитися на будь — якій відстані від приладу.

2.2.2 Розробка електричної принципової схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування

Блок живлення пристрою, який складається із трансформатора, випрямляча і транзисторного компенсаційного стабілізатора зображений як вузол А2, створює на виході постійну напругу 5 і 10 В. Розрахунок елементів блоку живлення наведений нижче. Напруга 5 В подається на живлення мікроконтролера АТ90S4433 (DD3), а також на схему фотодатчика і на мікрокнопки. Напруга 10 В із струмом живлення у 1 А подається тільки на крокові двигуни через мікросхему ULN2002A (DD2, DD5) [7, 8].

Основним елементом електричної схеми приладу є мікропроцесор DD3 фірми Atmel, який посилає і отримує керуючі імпульси постійного струму від

інших елементів і який керується командами, одержаних від комп'ютера, через послідовний порт. При включені мікропроцесора відбувається запуск основної програми, яка попередньо записана у пам'ять програм, і очікуються імпульси від EOM. Мікропроцесор AT90S4433 має вбудований UART (універсальний асинхронний прийомо-передатчик), а також два входи зовнішніх переривань INT0 і INT1. Контролер, що використовується у приладі, має можливість передавати сигнали по інтерфейсу RS-232. Логічному „0” відповідає рівень сигналу 0 В, логічній „1” – 5 В. Опишемо роботу електричної принципової схеми у тому порядку, у якому буде здійснюватись процес роботи самого приладу.

Імпульси постійного струму від EOM із COM порта через кабель послідовного зв'язку потрапляють на роз'єм плати XS2. Амплітуда імпульсів становить 15 В, а на мікропроцесор потрібно подавати імпульси, амплітуда яких не перевищує 5 В, тому щоб одержати потрібні рівні напруги використовується мікросхема MAX 202CPE, яка перетворює входні імпульси у потрібні вихідні і служить зв'язковою ланкою між EOM і самим процесором [5].

Два виходи MAX202CPE підключені до входів мікропроцесора – портів PD0 і PD1. Порт PD є 8-бітними двонаправленим портом вводу/виводу і може споживати струм до 20 мА. Для обслуговування портів у мікропроцесорі відведено три регістри: регістр даних PORTD (12h, 32h), регістр направлених даних DDRD (11h, 31h) і ніжки порта D — PIND (10h, 30h). Адрес ніжок порта D призначений тільки для читання, в той час як регістр даних і регістр направлених даних — як для читання так і для запису. Функція порта PD0 — це вхід даних UART, а порта PD1 — це вихід даних UART і позначається RXD і TXD відповідно. Біт DDDn регістру DDRD задає напрям передачі даних. Якщо біт встановлений як 1, то вивід сконфігурований як вихід, якщо біт встановлений як 0, то вивід сконфігурований як вхід.

Конденсатори C1–C4, які використовуються для роботи мікросхеми MAX202CPE, підбираються за рекомендаційними даними щодо самої мікросхеми. Ємність цих конденсаторів становить 10 мкФ. Тому вибраний тип — K50-16-10В-10мкФ±5%.

Отримавши імпульси від ЕОМ через порт PDO, мікропроцесор згідно програми аналізу сигналів посилає імпульси на мікросхему ULN2002A (DD2). Ця мікросхема призначена для керування обмотками крокового двигуна, на яких необхідно забезпечити достатній струм для формування магнітного поля, який би взаємодіяв з ротором і повертав його. Звичайно напруга живлення повинна бути співрозмірною із напругою живлення системи і тому для забезпечення достатньої потужності (зусилля на валу) двигуна необхідно збільшити струм через робочі котушки. Для комутування великого струму на котушках крокового двигуна струму контактів мікроконтролера замало тому і використовується мікросхема ULN2002A як система транзисторних ключів для комутації струму. Ця мікросхема містить сім однакових транзистори, ввімкнених по схемі Дарлінгтона. Додатково схема містить захисні діоди для запобігання виходу транзисторів із ладу при комутаційних перехідних процесах на індуктивному навантаженні. Мікросхема ULN2002A може комутувати вихідну напругу до 50В і струм до 500мА на канал. Такі заземлені ключі успішно використовуються як підсилювачі стандартних цифрових сигналів. Для запобігання перенапруг на контактах мікросхеми окрім контакту землі використовується контакт COMMON який приєднують до контакту із максимальною допустимою напругою. Здебільшого в системі ця напруга є напругою живлення. Схема елемента ключа зображена на рис. А.2.

Оскільки мікросхема ULN2002A може комутувати вихідний струм тільки до 500 мА, а двигун споживає струм 1 А, то на кожному виході цієї мікросхеми потрібно підключити транзистор для підсилення сигналу по струму. Прекрасно підійдуть транзистори типу КТ814А, в яких мінімальний коефіцієнт підсилення по струму $h_{21e} = 40$, а максимально допустимий постійний струм колектора $I_{кmax} = 1,5$ А.

Отже, від елемента DD3 електричної схеми приладу, через транзистор і роз'єм XS3 імпульси постійного струму поступають на відповідну котушку статора крокового двигуна, в результаті чого ротор цього двигуна повертається і займає таке положення, при якому різнойменні полюса ротора і статора буду

знаходитися один проти одного. Для здійснення неперервного руху потрібно включати котушки поперемінно. Сигнали керування обмотками двигунів формуються на портах PC0—PC5 і PB0—PB5 програмно.

Мікропроцесор здійснює керування трьома двигунами по чергово, які підключені до роз'ємів XS3, XS4 і XS6. Три ключі (мікроперемикачі) призначені для реєстрації крайніх положень крокових двигунів. При замиканні якогось із ключа на відповідному порті мікропроцесора виставляється сигнал логічної одиниці, що викликає зупинку відповідного двигуна. Як ключі використовуються мікроперемикачі типу МП1-1, які підключені до портів PD5, PD6 і PD7. Дані порти настроєні як входи бітам DDDn регістру DDRD.

Фотодавач використовується як реєстратор моменту відривання краплі від капіляра і зупинки крокового двигуна. Вихід фотодавача з'єднаний із мікропроцесором через порт PD2, який виконує функцію зовнішнього переривання і позначається як INT0. Переривання відбувається через загальний регістр маски переривань GIMSK. Зовнішнє переривання від ніжки INT0 дозволено якщо шостий біт регістра GIMSK встановлений у одиницю, а також встановлений у одиницю біт регістра стану. Біти керування запуском переривань (ISC01 і ISC00) в регістрі управління мікроконтролером (MCUCR) визначають по якій події відбувається переривання – по спадаючому чи по наростаючому фронту. При виникненні переривання виконується програма, яка починається із адреси \$001 в пам'яті програм. Оскільки при затемненні фотодіода краплею рідини на виході фотодавача буде сигнал логічної одиниці, то переривання буде відбуватися по спадаючому фронту.

Розглянемо роботу електричної схеми фотодавача. Основним елементом являється фотодіод VD2 і логічний елемент DD4.1. При освітленні фотодіода VD2 світлодіодом VD1, фотодіод VD2 на своїх виводах виробляє негативну ЕРС – біля -0,2...0,4 В. І оскільки резистор R2 має великий опір (1 МОм), то напруга на виводі 3 інвертора DD4.1 буде відповідати високому логічному рівню. Резистор R1 вибирається залежності від яскравості світіння світлодіода VD1. Тип резисторів R1 і R2: R₁ – МЛТ-0,5-100 Ом ± 5 %, R₂ – МЛТ-0,125-1 МОм ± 5%.

Тип діодів VD1 і VD2: VD1 – АЛ107А, VD2 – ФДК-1. При затемненні фотодіода VD2 вихід елемента DD4.1 переходить у стан логічного нуля. Це відбувається за рахунок того, що опір фотодіода в затемненому стані дуже великий (біля 10 МОм).

Використання мікросхеми КМОП структури дозволило довести споживаючий струм фотодавача до наноамперного рівня. В результаті чого флуктуаційні процеси в кристалах фотодіода і мікросхеми, які можуть бути викликані внутрішнім нагрівом, є мінімальні. Це сприяє високій точності спрацювання фотодавача.

Елементи DD4.3 і DD4.4 утворюють RS-тригер, який дозволяє зафіксувати точку позиціонування, тобто підвищує точність спрацювання фотодавача. Елемент DD4.2 виконує функцію інвертування сигналів, які поступають на вхід тригера. Тип елементів DD4.1 – DD4.4 вибираємо КМОП структури: К561ЛА7. Резистори R3 і R4 і елементи DD4.1 і DD4.2 утворюють тригер Шмітта. Гістерезисну петлю цього тригера можна налаштувати за допомогою резисторів R3 і R4. Працює дана схема наступним чином: при подачі на вхід великої напруги тригер Шмітта переключиться в стан високого логічного рівня. Незважаючи на те, що сигнал в наступний момент часу може стати дещо нижчий за початковий рівень спрацювання тригера Шмітта, завдяки своїй гістерезисній петлі, не переключиться в стан логічного нуля. Переключення відбудеться тоді коли сигнал досягне певного відповідного рівня – так називаючої точки відключення. Вихідний сигнал можна проілюструвати за допомогою графіка на рис. А.3.

Потрібну ширину петлі гістерезису можна розрахувати по наступній формулі [9]:

$$\Delta E = E_{n2} - E_{n1} = \frac{(U_2^1 - U_2^0) \cdot R_4}{R_5}, \quad (2.23)$$

де E_{n2} — порогова напруга спрацювання тригера Шмітта, В; E_{n1} — порогова напруга відключення тригера Шмітта, В; U_2^1, U_2^0 — вихідні напруги логічної одиниці і логічного нуля мікросхеми DD4 відповідно, В.

Для мікросхем серії 561 напругу U_2^0 можна прийняти рівною нулю. Напруга U_2^1 залежить від напруги живлення. Оскільки напруга живлення складає 5 В, то $U_2^1=3,6$ В.

Згідно (2.23) опір резисторів R_3 і R_4 для ширини петлі гістерезису $\Delta E=1$ В буде рівний:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{\Delta E}{U_2^1 - U_2^0} = \frac{1}{3,6}.$$

Враховуючи, що $R_2=1$ МОм, потрібно прийняти $R_3=100$ кОм, а $R_5= 360$ кОм згідно розрахунку. Типи резисторів будуть наступними: R_3 — МЛТ-0,125-100 кОм $\pm 5\%$, R_4 — МЛТ-0,125-360 кОм $\pm 5\%$.

Резистори R_5 - R_{10} вибираємо так щоб при замкненому ключі SB_1 (SB_2 , SB_3) на порті мікропроцесора був стан логічної одиниці (напруга більше 3,6 В), а при розімкненому ключі – стан логічного нуля. Отже, R_5 , R_7 , R_9 — МЛТ-0,125-1 кОм $\pm 5\%$, R_6 , R_8 , R_{10} — МЛТ-0,125-100 кОм $\pm 5\%$.

Частоту тактового генератора процесора визначаємо із виразу [5]:

$$F_{ck} = BAUT \cdot 16 \cdot (UBRR + 1), \quad (2.24)$$

де $BAUT$ – швидкість передачі даних між мікропроцесором і ЕОМ (бод);

$UBRR$ – значення регістру швидкості передачі UART. Це 8-ми розрядний регістр, який задає швидкість передачі даних по послідовному порту згідно вище наведеного виразу.

Вибираємо швидкість передачі даних і значення регістру при найменшій похибці. Отже, при $BAUT=2400$ бод і $UBRR=207$ похибка буде найменшою – 0,2%. При таких значеннях параметрів частота тактового генератора буде складати 8 МГц. Тип кварцового резонатора — ШГ-14БО-8,0 МГц-МЗ. Для правильної роботи кварцового генератора потрібні навантажувальні конденсатори. Значення навантажувальних конденсаторів залежать від навантажувальної ємності резонатора, обумовленою документацією на резонатор. Загальна ємність конденсаторів підключених між виводами кварцового генератора повинна бути рівна навантажувальній ємності

резонатора. Конденсатори C7, C8 вибираються згідно рекомендацій. Отже, тип цих конденсаторів — K10-17-2-25B-1пФ±5%.

2.2.3 Розробка алгоритму роботи програми аналізу зображення

Робота програми полягає у аналізі зображення краплі, яке буде мати форму кола з деякими відхиленнями, і визначення радіуса цієї краплі. Визначення радіуса полягає у знаходженні крайніх точок кола методом відшукування на зображенні крайніх чорних точок (пікселів), здійснюючи сканування малюнка по горизонталі і по вертикалі. Далі, визначивши відстань між цими точками, ми можемо визначити діаметр і, відповідно, радіус у такій одиниці виміру, як кількість точок. Використовуючи формулу (2.20) ми можемо перевести цю “кількість точок” у міліметри.

Комп'ютер може працювати тільки з цифровими даними. Для того, щоб обробити за допомогою комп'ютера зображення, його потрібно виразити в цифровому вигляді. Існують два основні способи цифрового представлення зображень: растровий і векторний. Оскільки ми будемо використовувати растровий тип зображення, то коротко опишемо його.

Растрові зображення дуже схожі на мозаїку, в якій малюнок формується з дрібних одноколірних елементів, пікселів. Піксель (pixel) — елементарна одиниця зображення в растровій двовимірній графіці. Це найдрібніші точки, з яких, як стіна з цегли, і складається зображення. Якщо відійти від мозаїчного панно досить далеко, окремі пікселі стають невиразно малі, і зображення здається однорідним (continuous). За цим принципом кодується растрове зображення в комп'ютерній графіці. Для простоти і швидкості обробки самого зображення проводиться його розбиття подібно до таблиці: по горизонтальних рядках і вертикальних стовпцях (саме тому растрові зображення завжди прямокутні). При роботі із зображенням комп'ютер "запам'ятовує" всю цю таблицю і колір кожного елементу. Таким чином, в растрових зображеннях не

існує об'єктів як таких. Кожен елемент таблиці називається точкою, а вся таблиця — растровим зображенням.

Точку цифрового зображення часто ототожнюють з пікселем і говорять, що растрове зображення складається із пікселів, хоча це і не зовсім вірно. Через постійне ототожнення точок і пікселів розміри зображень вимірюють в пікселях.

Перед початком сканування ми маємо зображення певного розширення $x=\text{width}$ і $y=\text{high}$ (найчастіше це 800×600) і ці відстані ми будемо використовувати як границі зображення, за якими сканування проводиться не буде.

Отже, на початку програми ми вибираємо систему координат з початком у точці $x=0$ і $y=0$. Далі йде умова — $\text{pixel}(x,y) < 255$, тобто якщо точка з координатами (x,y) , а в нашому випадку точка з координатами $(0,0)$, є чорного кольору (кожна точка зображення може мати один із 256 відтінків (градацій) відтінків сірого, від чорного(0) до білого(255), і цей діапазон називають сірою шкалою; інформація про яскравість пікселів зберігається у так званих каналах самого файлу зображення), то змінна $x1$ приймає значення координати точки x ($x1=x$) і точка з координатою $x1$ є крайньою лівою точкою. Якщо дана умова не виконується, то ми переміщаємося на один крок у верх відносно початку координат, тобто $y=y+1$ і перевіряємо умову $y \leq \text{high}$. Це означає, що ми будемо рухатися в верх поки не досягнемо границі, тобто межі зображення. Точка з координатою $y=\text{high}$ — це сама крайня точка зображення. Отже, якщо умова виконується, то ми ще не досягли краю малюнка і перевіряємо чи ця точка чорного кольору, тобто чи $\text{pixel}(x,y) < 255$.

Якщо умова знову не виконується, то ми далі рухаємося в верх, скануючи зображення по вертикалі, поки не досягнемо верхньої межі.

Якщо умова $y \leq \text{high}$ не виконується — ми досягли “вершини” зображення, то виконується крок вправо — $x=x+1$ і перевіряється умова $x \leq \text{width}$. Ця умова перевіряє чи не досягли ми правої межі малюнку, точка з координатою $x=\text{width}$ є крайньою правою точкою зображення краплі. При виконанні даної умови ми починаємо сканування знизу, тобто $y=0$ і знову перевіряємо умову на наявність

чорних точок — $\text{pixel}(x,y) < 255$. При невиконанні цієї умови ми повторюємо цикл вертикального сканування, переміщаючись тим самим у праву сторону відносно початку координат. Якщо ми досягли верхньої правої точки з координатами $x = \text{width}$ і $y = \text{high}$ і не знайшли чорних пікселів, що свідчить не виконання трьох умов - $\text{pixel}(x,y) < 255$, $y \leq \text{high}$ і $x \leq \text{width}$, то програма закінчує свою роботу, оскільки ми маємо біле зображення.

Якщо умова $\text{pixel}(x,y) < 255$ виконується, то це означає, що ми знайшли першу крайню точку кола, при скануванні у праву сторону від початку координат.

Далі йде процес пошуку крайньої правої точки кола, шляхом сканування зображення, починаючи від нижньої правої точки з координатами $x = \text{width}$ і $y = 0$. Перевіряється на умову $\text{pixel}(x,y) < 255$ попереднє точка і якщо умова не виконується, то ми переміщаємося вгору — $y = y + 1$, перевіряючи тим самим чи не досягли ми межі зображення — $y \leq \text{high}$. При досягненні верхньої межі ми переміщаємося на один крок вліво — $x = x - 1$ і вниз — $y = 0$, і і знову перевіряємо на наявність чорних точок. Поступово переміщаючись вліво, здійснюючи вертикальне сканування, ми знаходимо крайню праву точку. В цьому випадку не перевіряється умова - $x \leq 0$ оскільки ми вже знайшли одну точку і якщо немає інших чорних пікселів крім цього, то він буде і крайнім правим і крайнім лівим піксельом. Цикл пошуку крайньої правої точки складається із двох умов, виконання першої із яких є обов'язковим. Знайшовши крайню праву точку, ми присвоюємо її координаті x змінну x_2 — $x_2 = x$.

Далі йде процес горизонтального сканування краплі з метою пошуку крайньої нижньої і крайньої верхньої точок зображення краплі. Починається цей процес із початку координат — $x = 0$, $y = 0$. Далі перевіряється умова $\text{pixel}(x,y) < 255$ на наявність чорних точок. При невиконанні цієї умови ми здійснюємо один крок вправо — $x = x + 1$ і перевіряємо умову $x \leq \text{width}$ (чи не досягли ми правого краю малюнка). Якщо координата x задовольняє цю умову, то здійснюється наступна перевірка на наявність чорних пікселів поки не дійдемо до кінця рядка (тобто поки $x \leq \text{width}$). Коли ми просканували рядок до кінця і не знайшли потрібної точки,

то піднімаємося на один крок ввєрх – $y=y+1$ і далі скануємо до кінця рідка весь час перевіряючи основну умову програми - $\text{pixel}(x,y)<255$. Знайшовши чорну точку, при виконанні основної умови $\text{pixel}(x,y)<255$, ми записуємо її ординату – $y_1=y$.

При пошуку верхньої крайньої точки ми здійснюємо сканування із точки з координатою $x=0$, $y= \text{high}$, тобто із верхньої лівої точки. Аналогічно, кожен раз перевіряється умова - $\text{pixel}(x,y)<255$ при русі “сканера” зліва у право($x=x+1$) і зверху вниз($y=y-1$), перевіряючи також умову $x \leq \text{width}$ про досягнення до межі зображення. Знайшовши потрібний пік сель, записуємо його ординату – $y_2=y$.

Отже, в кінцевому варіанті ми отримуємо чотири крайніх точки зображення краплі, відстань між якими по горизонталі і вертикалі рівна діаметру краплі. Тобто $d_1 = x_2 - x_1$ і $d_2 = y_2 - y_1$. Кінцеве значення радіуса можна записати за допомогою такого виразу:

$$r_N = N_{pix} = \frac{d_1 + d_2}{4} = \frac{(x_2 + y_2) - (x_1 + y_1)}{4}. \quad (2.25)$$

Як зазначалося вище, підставляючи значення величини N_{pix} у формулу (2.20) ми отримуємо значення радіуса у міліметрах і підставляючи його у формулу (2.7) або (2.18) ми обчислимо крайовий кут.

2.2.4 Розробка алгоритму роботи програми мікропроцесора і програми комп'ютера

В ролі центрального процесора, який керує роботою всього приладу, ми вибрали мікропроцесор типу AT90S4433, який має 20 ніжок вводу/виводу загального призначення, 32 робочих регістра, а також необхідний для зв'язку з ЕОМ асинхронний прийомо-передатчик і можливість зовнішнього переривання від двох ніжок PD2 і PD3. Це основні параметри, якими повинен володіти мікропроцесор для правильної роботи всього приладу. Розглянемо алгоритм програми роботи мікропроцесора, який наведений у додатку Б.

Основна програма мікропроцесора (рис. Б.1) реалізує отримання і аналіз сигналів, які поступають від ЕОМ і відповідно до цих сигналів виконання тих чи інших підпрограм. Ця програма починає виконуватися зразу після ввімкнення живлення мікропроцесора і на початку своєї роботи виконує наступні функції: виставляє біти DDB0...DDB5 і DDC0...DDC5 в одиниці (настройка портів PB0-PB5 і PC0-PC5 як виходи), біти DDD5...DDD7 і DDD2 - в нулі(настройка портів PD5-PD7 і PD2 як входи), запис даних в регістр введення/виводу даних UART – UDR(передача даних ЕОМ) і запускається послідовність виявлення стартового біта(очікування даних від ЕОМ).

Після завершення процесу ініціалізація даних перевіряється умова - “завершення роботи”. Сигнал про звершення роботи основної програми може податися у випадку вимкнення живлення або від ЕОМ. У випадку не виконання умови слідує підпрограма отримання і аналіз сигналів від ЕОМ, в якій логічна схема приймача обробляє сигнал на ніжці RXD з частотою в 16 більше швидкості передачі (для обробки одного біта послідовності, що приймається, проводиться 16 вибірок вхідного сигналу). В стані очікування одна вибірка логічного нуля інтерпретується як спадаючий фронт стартового біта, після чого запускається послідовність виявлення стартового біта. Якщо в першій вибірці сигналу виявлений нульовий відлік, приймач обробляє 8, 9 і 10 вибірки сигналу на ніжці RXD. Якщо хоч би дві з трьох вибірок рівні логічній одиниці, стартовий біт вважається шумом і приймач чекає наступного переходу з 1 в 0. Якщо виявлений стартовий біт, починається обробка даних. Рішення про рівень даних також проводиться по 8, 9 і 10 вибіркам вхідного сигналу, рівень вхідного сигналу визначається по рівності двох вибірок. Після того, як рівень даних визначений, дані записуються в зсувний регістр приймача.

Після виконання підпрограми отримання і аналіз сигналів від ЕОМ знову перевіряється попередня умова і очікуються наступні сигнали від ЕОМ, таким чином даний цикл буде завжди працювати до моменту вимкнення живлення.

Підпрограма аналізу сигналів, які прийшли від ЕОМ (рис. Б.2) складається із чотирьох умов: отримання сигналу “підготовка до вимірювання”, сигналу

“виконання процесу вимірювання”, сигналу “переміщення столика” чи сигналу “фокусування камери”. Для цього використовується передача від ЕОМ 6-бітного коду, який аналізується мікропроцесором і виконується потрібна задача. Перші два біти аналізуються як стартові, а інші чотири як інформаційні. Якщо перший біт одиниця, то виконується перша умова, якщо другий одиниця, то друга умова і так далі.

При виконанні першої умови виконується підпрограма встановлення поршня, стола і камери у крайні положення (рис. Б.3), при виконанні другої умови – підпрограма видавлювання краплі (рис. Б.4), третьої умови – підпрограма руху столика на відстань l (рис. Б.6) і при виконанні четвертої умови – підпрограма вертикального переміщення відеокамери (рис. Б.7).

У разі невиконання чотирьох умов або після виконання однієї із них підпрограма аналізу сигналів закінчується.

Алгоритм підпрограми процесу встановлення поршня, стола і камери у крайні положення є однаковим для трьох крокових двигунів, тобто при закінченні руху поршня до крайнього положення починається рух столика, а потім і відеокамери. Відрізняються ці три підпрограми тільки процесом руху двигуна на один крок, оскільки три крокові двигуни підключення до різних портів мікропроцесора і при подачі імпульсів на обмотки двигунів будуть задіяні різні послідовності імпульсів. Опис подачі імпульсів для різних двигунів наведений нижче.

Підпрограма починається рухом двигуна на один крок ($0,9^\circ$) і послідуною перевіркою стану кнопки. Далі йде перевірка умови про отримання сигналу від кнопки, тобто якщо на порті PD5 (для двигунів столика і відеокамери – PD6 і PD7 відповідно) з'явиться стан логічної одиниці, то відбувається зупинка двигуна і подача сигналу ЕОМ про закінчення процесу підготовки до досліду. Якщо сигнал не буде отриманий, то рух двигуна буде продовжуватися до моменту натиснення кнопки SB1 (SB2 і SB3 для двигунів столика і відеокамери відповідно). Після зупинки трьох крокових двигунів дана підпрограма закінчиться і мікропроцесор буде перебувати у стані очікування сигналів від

ЕОМ.

Основною задачею підпрограми процесу видавлювання краплі є рух крокового двигуна до моменту падіння краплі з капіляра, про що буде сигналізувати фотодатчик. Отже, на початку програми буде здійснюватися процес корегування напрямку руху (в основному рух буде відбуватися вниз, проте при потребі наповнення капіляра досліджуваною рідиною рух буде здійснюватися і вгору), далі відбувається корегування порта РС, тобто виставлення на ніжці порта РС5 стану логічної одиниці, а на інших – логічного нуля. В цей момент двигун здійснить рух за годинниковою стрілкою (вниз) на один крок. Далі перевіряється умова - “остання обмотка”, тобто чи на порті РС2 є стан логічної одиниці. Так як рух двигуна є результатом операції зсуву регістра порта вліво, то в момент присутності логічної одиниці на останньому керуючому порті цього двигуна, в наступний момент часу, в результаті операції зсуву, ця логічна одиниця опиниться на керуючому порті іншого двигуна, що приведе до його руху, тому дана умова є необхідною. Якщо ця умова не виконується, то відбувається операція зсуву і двигун здійснить наступний крок. При виконанні умови відбувається знову корегування порта РС. Далі відбувається запис числа кроків, які вже зробив двигун і перевіряється умова - $n < n_{кр}$, тобто чи поршень не дійшов до крайнього нижнього положення. При виконанні умови програма закінчується, в іншому випадку продовжується рух двигуна до моменту настання переривання від фотодатчика (рис. Б.5).

Підпрограма переривання від фотодатчика запускається коли на ніжці PD2 з'явиться стан логічної одиниці, а це відбудеться в момент відриву краплі від капіляра, яка закрий світловий потік від світло діода VD1. Управління перериваннями проводиться регістрами маски переривань - GIMSK і TIMSK. Коли виникає переривання біт глобального дозволу переривань I скидається (нуль) і всі переривання забороняються. Програма користувача може встановити цей біт для дозволу переривань. Щоб дозволити виконання наступних переривань потрібно при виході з переривання виконати команду- RETI. INT0(порт PD2) – це шостий біт регістру переривань GIMSK. Коли цей біт

встановлений, а також встановлений біт I регістра стану, дозволяється переривання від зовнішнього виводу. Біти управління запуском переривання (ISC01 і ISC00) в регістрі управління мікроконтролером (MCUCR) визначають по якій події відбувається переривання - по спадаючому або наростаючому фронту або ж по рівню. Активність на виводі приводить до виникнення переривань навіть якщо вивід сконфігурований як вихід. При виникненні переривання виконується програма, що починається з адреси \$001 в пам'яті програм.

Отже, при виникненні переривання відбувається подача сигналів до ЕОМ про число кроків двигуна n і здійснюється зупинка крокового двигуна

шляхом виставляння у регістрі порта логічних нулів(коригування порта PC).

Підпрограма руху столика, головною задачею якої є переміщення столика на визначену відстань, починається із корегування напрямку руху, так як столик потрібно пересувати як вліво так і вправо. Далі йде процес формування $n2$ імпульсів на обмотках крокового двигуна, які попередньо записуються у програму, за допомогою керуючих портів PC1, PC0 і PB5, PB4. При русі столика вправо відбувається подача імпульсів, починаючи від PC1 і закінчуючи PB4, а при русі вліво – навпаки - від PB4 і до PC1. Після кожного кроку відбувається його запис - $m=m+1$ і порівняння з потрібною кількістю. Коли столик переміститься на потрібну відстань($n2$ кроків), тобто відбудеться виконання умови $n2=m$, то на портах PC1, PC0 і PB5, PB4 виставляться логічні нулі(корегування портів) і кроковий двигун зупиниться. Далі мікропроцесор “сповістить” ЕОМ про закінчення руху столика і дана підпрограма завершиться.

Підпрограма фокусування відеокамери запускається після отримання відповідного сигналу від ЕОМ і має за мету здійснювати рух відеокамери до моменту найкращої різкості зображення, аналіз якої здійснює ЕОМ. Спочатку здійснюється переміщення відеокамери на один крок вниз. Рух крокового двигуна на один крок відбувається так само як і першого тільки стан логічної одиниці спочатку виставляється на порті PB3 і потім в результаті операції зсуву

переміщається до порта РВ0(при русі камери вниз і навпаки при русі вверх). Після переміщення відеокамери на один крок посилається сигнал ЕОМ про даний рух і очікується відповіді від комп'ютера. У цей проміжок часу ЕОМ аналізує зображення краплі посилає імпульси про подальший рух або про зупинку і рух на один крок вверх. Детальне опис процесу фокусування відеокамери на ЕОМ наведений нижче.

Алгоритм програми на ЕОМ (рис. Б.8) починається із ініціалізації даних, де вводяться такі величини як n_2 , n_{kr} , c_{kr} , а також відбувається відкриття СОМ порту, яке здійснюється за допомогою функції GreateFile() для виконання операцій вводу/виводу у асинхронному режимі. Далі відбувається перевірка зв'язку із мікропроцесором щоб дізнатися чи готовий він отримувати і аналізувати дані від ЕОМ. Це реалізується наступним чином: комп'ютер встановлює сигнал на лінії TD щоб показати мікропроцесору, що він готовий до проведення сеансу зв'язку, у відповідь мікропроцесор також встановлює сигнал на лінії TD. Далі програма очікує сигнали від клавіатури, при надходженні яких відбувається виконання підпрограма команд від клавіатури ЕОМ (рис. Б.9). В кінці програми перевіряється умова - "завершення роботи", при виконанні якої дана програма завершується. Якщо ця умова не виконується, то цикл основної програми функціонує до моменту виключення живлення.

Підпрограма команд від клавіатури ЕОМ складається із чотирьох умов: натискання клавіші "P", натискання клавіші "V", натискання клавіші "S", натискання клавіші "K", при виконанні яких відбувається передача даних мікропроцесору про виконання тієї чи іншої операції. Операції, які виконує мікропроцесор описані вище у підпрограмі аналізу сигналів, які прийшли від ЕОМ. Якщо ніяка умова не виконується або після виконання якоїсь із умов підпрограма завершує свою роботу.

Підпрограма на ЕОМ процесу фокусування відеокамери (рис. Б.10) призначена для аналізу і вибору найліпшої різкості зображення краплі. Починається дана підпрограма із подачі сигналу до мікропроцесора про рух крокового двигуна на один крок, після чого мікропроцесор відповідає про

здійснення цього кроку і ЕОМ реєструє кількість кроків - $c=c+1$. Після цього перевіряється умова - $c < c_{kr}$, тобто чи відеокамера не перебуває у крайньому нижньому положенні. Якщо дана умова виконується, то двигун зупиняється, якщо ні, то відбувається аналіз різкості зображення. Даний аналіз полягає у визначенні ширини межі переходу білого у чорне у крайніх точках зображення. Чим менша ця ширина (d) тим краща різкість, тому далі перевіряється умова - $d^i > d^{i-1}$, тобто якщо в попередньому кроці відстань d була меншою за наступну, то різкість погіршилася і потрібно повернутися на крок вгору, що і виконується в результаті виконання умови. Якщо умова не виконується, то відбувається подальший рух до моменту виконання однієї із двох попередньо описаних умов. Після настроювання різкості підпрограма завершує свою роботу. Як правило, дана підпрограма виконується тільки один раз, оскільки при виконанні інших дослідів крапля буде приблизно тих самих розмірів і в тому самому місці.

Отже, в даному пункті було описано алгоритм роботи програми мікропроцесора і програми комп'ютера, який характеризує порядок роботи приладу в такій послідовності, в якій було зроблено опис.

2.2.5 Розроблення конструкції приладу для вимірювання крайового кута змочування за розмірами краплі

Оскільки даний прилад призначений для автоматизованого вимірювання крайового кута змочування, то розміщення всіх конструкторських елементів повинно сприяти автоматизації всіх процесів, що збільшує точність результатів дослідів. Конструкція приладу дозволяє проводити вимірювання крайового кута змочування у лабораторних умовах при наявності ЕОМ і загальної мережі живлення.

Основними вузлами і елементами приладу є: основа приладу, яка у процесі проведення дослідів повинна бути розміщена горизонтально і при відсутності вібрацій; контролер і блок живлення, які забезпечують роботу приладу;

відеокамера і поршень для утворення і реєстрації краплі; столик і мікропереключателі, а також крокові двигуни для руху поршня, фокусування відеокамери і переміщення столика із досліджуваною краплею.

Для забезпечення отримання контрастного зображення краплі досліджуваної рідини на поверхні твердого тіла використовується відеокамера типу CCD-TR940, у корпусі якої є вбудований USB порт, що дає можливість швидкого підключення до ЕОМ. Для збільшення точності аналізу зображення використовується освітлення краплі за допомогою монохроматичного світла, що сприяє усуненню аберацій. Якщо рідина непрозора, то використовують світлофільтри з врахуванням того, що колір рідини і колір світлофільтра повинні знаходитися в різних ділянках спектра. Для зручності освітлювач може живитись від регульованого блока живлення з метою регулювання яскравості світла.

Оскільки ми отримуємо краплю із капіляра, який розміщений на певній відстані від відеокамери, то для того, щоб центр краплі попадав у центр об'єктива відеокамери і відповідно щоб крапля вміщала на екрані монітора, необхідно щоб крапля на столику за допомогою крокового двигуна переміщувалася горизонтально. Кроковий двигун повинен забезпечувати плавність і відповідну точність переміщення столика без його вібрації, яка може привести до зміщення, розтікання краплі на поверхні досліджуваного твердого тіла. Кроковий двигун здійснює коловий рух зубчастого колеса, який з'єднаний із планкою, що у свою чергу приварена до столика, і відповідно, горизонтальний рух столика. Відстань від центра капіляра до оптичної осі відеокамери складає 105мм, діаметр зубчастого колеса - 10мм, і тому за один оберт двигун здатен перемістити столик на відстань 31,4 мм, а для "повного" переміщення столика двигуну потрібно зробити приблизно три із половиною оберти навколо власної осі або 1204 градуси. Оскільки крок двигуна становить $0,9^\circ$, то йому потрібно здійснити 1338 кроків щоб перемістити столик. Для переміщення столика і зручності розташування елементів кроковий двигун розміщений позаду столика, який здійснює рух за допомогою системи коліс і рейки.

Для отримання крапель малих розмірів використовується шприц із

капіляром діаметром 0,1мм, який розташований під кроковим двигуном, що забезпечує рух поршня, за допомогою спеціальних тримачів. Кроковий двигун кріпиться до верхньої планки за допомогою болтів і перебуває у нерухомому положенні відносно основи приладу.

Розрахуємо скільки кроковому двигуну потрібно зробити кроків для отримання краплі об'ємом V . Використовуючи формулу (2.22), об'єм краплі буде рівний:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot F}{\rho \cdot g} \quad (2.26)$$

Беручи значення величин для краплі води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\sigma_{20^\circ\text{C}} = 0,0725 \text{ Н/м}$ і $F=1$), отримаємо:

$$V = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0725 \cdot 1}{1000 \cdot 9,8} = 4,65 \text{ мм}^3 \approx 5 \text{ мкл.}$$

Оскільки площа поршня складає 121 мм^2 , а крок різьби осі – $0,5 \text{ мм}$, то щоб отримати краплю води об'ємом $4,65 \text{ мм}^3$ потрібно зробити приблизно $0,08$ оберта або $27,7^\circ$, або 31 крок по $0,9^\circ$.

Відеокамера за допомогою тримачів, що кріпляться до осі із різьбою, яка має можливість здійснювати коловий рух за допомогою крокового двигуна, здатна здійснювати вертикальне переміщення. Крок різьби 1 мм , що забезпечує поступовий рух відеокамери з наступним її фокусуванням. Сама відеокамера розміщена над столиком у тому місці де має бути крапля. Основна мета такої побудови приладу це одержання чіткого, контрастного зображення краплі. При чому це зображення повинно бути такої величини, що забезпечує достатню точність визначення крайового кута змочування. Кроковий двигун розташований під відеокамерою і кріпиться до основи приладу за допомогою гвинтів.

Для зручності виконання електричної схеми, а також конструювання приладу, три крокові двигуни, що використовуються у приладі, підібрані однакового типу – FL57STH56-1006MA. Цей двигун має момент $0,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$, що забезпечує рух відеокамери масою $0,3 \text{ кг}$ і переміщення столика масою $0,1 \text{ кг}$.

Обробка зображення краплі, отриманого із відеокамери, здійснюється за допомогою комп'ютера, який на загальному вигляді приладу не показаний і підключається до контролера через послідовний порт, а до відеокамери – через USB порт. В нашому випадку ЕОМ є ніби пультом керування, оскільки на приладі немає ніяких кнопок для керування його роботою, крім кнопок включення живлення і настройки відеокамери.

2.3 Розробка методики проведення контролю за допомогою спроектованого приладу

Для того, щоб можна було починати проведення досліду даним приладом перш за все потрібно провести ряд дій до початку контролю. Найперше треба провести перевірку всіх з'єднань вилок із гніздами щоб пересвідчитись у правильності всіх електричних контактів. Наступним кроком потрібно зняти шприц із тримача і через отвір наповнити його досліджуваною рідиною, і закріпити у тримачі. Далі необхідно перевірити поверхню столика та провести очищення його поверхні від бруду та інших об'єктів.

Після цього на поверхню столика треба встановити зразок твердого тіла у нерухомому положенні щоб під час руху столика він здійснював мінімальну кількість рухів(або взагалі їх не здійснював). Також потрібно провести настройку відеокамери (вибрати необхідне збільшення, режими роботи).

Після завершення усіх підготовчих операцій включається живлення приладу і ЕОМ і програмно перевіряється наявність зв'язку між контролером і ЕОМ, а також між ЕОМ і відеокамерою. Якщо зв'язок відсутній потрібно виключити живлення і перевірити ще раз стан електричних з'єднань.

Далі на комп'ютері запускають програму керування роботою приладу і виконують операції у наступній послідовності: на клавіатурі натискають клавішу "P", в результаті чого столик, поршень і відеокамера встановлюються у початкові положення, про що буде свідчити сигнал від контролера і на екрані монітора

з'явиться повідомлення про успішне виконання цієї операції; далі натискають клавішу “V” – йде процес утворення краплі, після завершення якого ми отримуємо відповідне повідомлення; наступну натискають клавішу “S” – переміщення столика, після завершення якого клавішу “K” – фокусування відеокамери. Як правило, фокусування відеокамери потрібно проводити тільки один раз, оскільки протягом інших дослідів крапля буде знаходитися на тому самому місці(з незначним відхиленням у її розмірах). Після кожної операції ми отримуємо підтвердження про її виконання у вигляді повідомлення на екрані монітора і тому оператор ЕОМ повинен слідкувати за поступаючою інформацією і виконувати необхідні дії.

Наступним кроком на ЕОМ запускається програма аналізу зображення. Перед запуском самої програми оператор повинен “відредагувати” зображення (очистити від лишніх чорних точок). Результат виконання двох попередніх програм заноситься у програму обчислення крайового кута змочування, після виконання якої ми отримуємо шукану величину у вигляді таблиці, де перший стовпчик це номер дослідів, другий – об'єм краплі, третій – радіус краплі і четвертий – крайовий кут.

Особливістю проведення вимірювань є те, що результатом першого дослідів потрібно ігнорувати, оскільки об'єм краплі буде визначений невірно (поршень на початку дослідів перебуває у крайньому верхньому положенні і об'єм буде залежати ще від відстані, яку він пройшов до контакту із рідиною), тому дані будуть заноситися починаючи від другого дослідів, що потрібно врахувати під час виконання вимірювань. Також рекомендується включати освітлення після операції переміщення столика(перед фокусуванням відеокамери) для більш точної роботи фотодатчика.

Отже, виконуючи всі операції вимірювання в зазначеній послідовності ми можемо провести дослід протягом короткого часу(декілька хвилин), що сприяє збільшенню точності результату, а також дає можливість проведення декілька серій вимірювань за незначний термін.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ЗА РОЗМІРАМИ КРАПЛІ

Метрологія – це вчення про вимірювання, методи та засоби, за допомогою яких досягається потрібна точність; це — наука з єдиними принципами, методами, засобами.

На сучасному етапі розрізняють теоретичну метрологію, яка розглядає загальні теоретичні проблеми вимірювання, історичну метрологію, законодавчу метрологію, прикладну метрологію, яка вирішує питання практичного застосування методів і засобів вимірювання.

Технічні вимірювання є складовою частиною прикладної метрології.

Метрологія — наукова основа контролю якості. Прикладні дисципліни цієї науки дозволяють нормувати кількісні характеристики якості продукції й процесів, виявляти ступінь точності й надійності результатів вимірювання, що необхідні для по елементного контролю якості продукції на всіх етапах її проектування, виготовлення і експлуатації.

3.1 Огляд метрологічних характеристик контролю

Основною задачею при проведенні неруйнівного контролю будь-яким методом є забезпечення точності та достовірності результатів контролю, тобто необхідно досягти того, щоб прогнозовані результати завжди “справджувалися”. Чим відповідальнішим, дорожчим є об’єкт контролю, тим вищими є вимоги до достовірності проведення діагностики.

Із усієї безлічі критеріїв доцільності метрологія для засобів вимірювання номінує такі метрологічні характеристики, від яких залежать точність і достовірність вимірювання:

– номінальну статичну характеристику перетворення вимірювального

пристрою;

- динамічні характеристики засобів вимірювання;
- характеристики сумарної або систематичної і випадкової складової, що становлять похибки засобів вимірювання;
- варіацію показників вимірювального приладу і сигналу вимірювального перетворювача;
- вхідний опір вимірювального пристрою;
- ціну поділки рівномірної шкали, мінімальну ціну поділки нерівномірної шкали і границі шкали вимірювального приладу;
- характеристики вихідного коду цифрових засобів вимірювання;
- неінформативні параметри вихідного сигналу вимірювального перетворювача і міри;
- функції впливу як залежності змін метрологічних характеристик засобів вимірювання від зовнішніх величин, які впливають, і неінформативних параметрів вхідного сигналу;
- характеристики похибки засобів вимірювання в інтервалі змін величини, що впливає, або неінформативного параметра вхідного сигналу;
- найбільші дозволені зміни метрологічних характеристик, спричинені змінами зовнішніх величин і неінформативних параметрів вхідного сигналу.

Нормування інших метрологічних характеристик підпорядковується нормуванню характеристик засобів вимірювання, їхніх похибок, яке здійснюється з підрозділом похибки Δ засобу вимірювання на систематичну Δ_s і випадкову Δ_e складові або без підрозділу [12].

Для систематичної складової Δ_s , нормують значення математичного сподівання $M(\Delta_s)$ і середнього квадратичного відхилення $\sigma_{|\Delta_s|}$. Нормованими характеристиками випадкової складової Δ_e є: середнє квадратичне відхилення $\sigma(\Delta_e)$, нормалізована автокореляційна функція $r_{\Delta}(\tau)$ або функція спектральної щільності $S_{\Delta}(\omega)$, випадкової складової похибки.

Для похибки Δ (без підрозділу на Δ_s і Δ_e) засобів вимірювання нормовані

характеристики ті самі, що і для похибки Δ_s .

Статичні характеристики засобів вимірювання відповідають статичному режиму застосування засобів вимірювання, при якому вимірювана величина не залежить від часу, а тривалість перетворення достатня для загасання перехідних процесів у вимірювальному колі.

Зв'язок між інформативним параметром x вхідного сигналу і інформативним параметром y вихідного сигналу виражається функцією перетворення:

$$y = f(x). \quad (3.1)$$

Засобу вимірювання присвоюється номінальна функція перетворення:

$$y_{sf} = f_{sf}(x), \quad (3.2)$$

що називається градуйованою характеристикою.

На основі залежностей (3.1) і (3.2) визначають коефіцієнти перетворення:

$$K = \frac{y}{x} \text{ і } K_{sf} = \frac{y_{sf}}{x}, \quad (3.3)$$

причому $K_{sf} = \text{const}$ тільки тоді, коли залежність (3.2) лінійна і проходить через початок системи координат.

Похідна від функції перетворення:

$$S = \frac{dy}{dx} = f'(x), \quad (3.4)$$

або в кінцевих приростах:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (3.5)$$

називається чутливістю засобу вимірювання.

Номінальна чутливість:

$$S_{sf}(x) = \frac{\Delta y_{sf}}{\Delta x}. \quad (3.6)$$

Розмірність чутливості визначається відношенням розмірностей вихідної і вхідної величин.

Характеристики, що відповідають динамічному режиму застосування

засобів вимірювання, при якому вимірювана величина залежить або не залежить від часу, але похибки вимірювання залежать від моменту часу відбору вимірювальної інформації, називають динамічними характеристиками.

Як динамічні характеристики засобів вимірювання використовується перехідна функція та імпульсна перехідна функція.

Перехідна функція $h(t)$ – відгук (реакція) лінійної динамічної системи на вхідний вплив у вигляді одиничної функції $I(t)$. За перехідною функцією можна визначати динамічні параметри системи: час реакції t_3 ; постійну часу T , яка характеризує інерційність системи; коефіцієнт перетворення K тощо.

Імпульсна перехідна функція $g(t)$ – відгук динамічної системи на вхідний вплив у вигляді дельта-функції $\delta(t)$.

Похибки вимірювань визначаються головним чином похибками засобів вимірювання, проте вони не тотожні їм. Так, похибки, пов'язані з методом вимірювання, і особисті похибки експериментатора слід відносити тільки до похибок вимірювання, але не до похибок засобів вимірювання. Залежно від характеру і причин їх появи похибки вимірювань засобів вимірювання поділяють на систематичні (детерміновані) і випадкові (індетерміновані, стохастичні). Розрізняють також грубі похибки і промахи.

Систематична похибка — складова похибки вимірювання, яка при повторенні рівноточних вимірювань незмінного розміру залишається постійною або закономірно змінюється. Систематичні похибки можуть бути вивченими, і результат вимірювання уточнюється або шляхом внесення поправок, якщо числові значення цих похибок визначені, або шляхом застосування таких способів вимірювання, які дають можливість виключити вплив систематичних похибок без їх визначення. Числові значення систематичних похибок визначаються шляхом вивірювання засобів вимірювання.

Випадкова похибка – складова похибки вимірювання, яка при повторенні вимірювання змінюється випадково. Випадкові похибки можуть бути виявленими при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини, коли отримуються неоднакові результати. Їх не можна виключити (тому що невідомі

причини, що їх викликали), але їхній вплив на результати вимірювання може бути теоретично врахованим при обробці результатів вимірювання методами теорії ймовірності та математичної статистики.

Груба похибка вимірювання – похибка, яка суттєво перебільшує очікувану. Результати з грубими похибками виявляють і виключають з розгляду.

Промех — наслідок несправності засобу вимірювання, помилкового зчитування показників, їхнього запису тощо. Результати з промехами просто відкидають.

Залежно від умов застосування засобів вимірювання їхні систематичні похибки підрозділяють на основні і додаткові.

Основною похибкою називається похибка засобів вимірювання в умовах, які встановлено нормативно-технічними документами як нормальні для даних засобів вимірювання. Ця похибка обумовлена головним чином факторами інструментальних похибок, що є наслідком недосконалості конструкції або принципу дії засобу вимірювання.

Додатковими похибками називають зміни похибки засобу вимірювання, викликані відхиленнями величин, які впливають, від нормальних значень.

Залежно від форми числового виразу похибки незалежно від виду (систематичні або випадкові) розрізняють: абсолютні та відносні – для вимірювання; абсолютні, відносні і приведені – для засобів вимірювання.

Абсолютна похибка Δx — це різниця між вимірюваною величиною $x_{ном}$ (показником приладу x_n) і дійсним значенням x вимірюваної величини, тобто для вимірювання:

$$\Delta x = x_{ном} - x, \quad (3.7)$$

а для приладу:

$$\Delta x = x_n - x. \quad (3.8)$$

Більш інформативною є відносна похибка, яка з урахуванням виразів (3.7) і (3.8) визначається як:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100. \quad (3.9)$$

Зручно використовувати вираз:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ном}}} \quad \text{або} \quad \delta x = \frac{\Delta x}{x_n}, \quad (3.10)$$

тому що значення $x_{\text{ном}}$ або x_n відомі, а різниця між (3.10) та (3.9) є величиною вищого порядку малості.

Наведена похибка виражається як відношення абсолютної похибки до нормувального значення x_n :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100. \quad (3.11)$$

При цьому x_n вибирають рівним:

- більшій межі вимірювання, якщо нульове значення x є початком шкали або знаходиться поза діапазоном вимірювання;
- більшому з модулів меж вимірювання, якщо нульове значення знаходиться всередині діапазону вимірювання (для електровимірювальних приладів - сумі модулів меж вимірювання);
- модулю різниці меж вимірювання, якщо шкалу прийнято з умовним нулем (шкала в °C);
- номінальному значенню для засобів вимірювання з номінальним значенням вимірювальної величини (частотомір з діапазоном вимірювання 45..55 Гц з $f_{\text{ном}} = 50$ Гц);
- всій довжині шкали або її частині, рівній діапазону вимірювання (при цьому абсолютну похибку виражають також в одиницях довжини).

3.2 Аналіз похибок при вимірюванні крайового кута змочування за розмірами краплі

Точність визначення крайового кута змочування залежить від точності

визначення об'єму і радіуса краплі, оскільки кінцева формула (формула (2.7) і (2.18)) для розрахунку ККЗ містить тільки ці дві змінні величини.

У свою чергу похибка визначення об'єму складається із двох складових – це похибка крокового двигуна (з якою точністю він здійснює один кутовий крок) і похибки формування краплі. При формуванні краплі (її видавлюванні із капіляра) вона розривається у самому тонкому місці, а точніше — у своїй шийці. Розтягуючись шийка приймає форму циліндра, при розриві якого утворюється певна сукупність малих крапель, які падають вслід за основною краплею. Основною особливістю цього процесу є те, що частина висячої краплі вище шийки взагалі нікуди не падає і в результаті вага упавшої краплі є дещо меншою ваги висячої краплі. Саме ця особливість і створює похибку, яка носить випадковий характер, оскільки нам буде невідомо, яка частина краплі залишилася. У таких випадках у формулу для розрахунку ваги краплі, що впала, вводять корегуючий множник, який вибирається із табличних даних і залежить від інших параметрів (як рідини так і капіляра).

Похибка визначення радіуса краплі також залежить від двох складових — це похибка, яка виникає при реєстрації зображення відеокамерою і похибки, яка виникає при розрахунку радіуса (аналізі зображення).

Похибка реєстрації зображення буде залежати від відеокамери, а саме від типу і розміру її матриці. Матриця відеокамери складається із певної кількості елементів (пікселів) як по вертикалі так і по горизонталі і в певний момент реєстрації може спрацювати один із двох крайніх елементів і тому точність буде залежати від розміру елемента матриці (похибка – плюс, мінус один елемент). Також дана похибка залежить від освітлення краплі, що робить певний вплив на якість зображення (його чіткість, контрастність і т.д.).

При розрахунку радіуса виникає похибка, яка буде залежати від типу змінної, що використовується для представлення певного числа у ЕОМ. Оскільки ми будемо використовувати тип змінної *real*, який дозволяє застосовувати 15 знаків після коми, то абсолютна похибка буде складати приблизно 10^{-14} , що буде робити несуттєвий вплив на результат досліду і якої можна нехтувати. Для

зменшення величини цієї похибки можна використовувати змінні іншого типу, що дозволяють вміщати більшу кількість знаків, але у цьому немає потреби, оскільки серед всіх інших складових похибки ця є найменшою.

3.3 Розробка методики стандартизації параметрів розроблюваного приладу

Основним параметром, для якого потрібно здійснити стандартизацію це є крайовий кут змочування, вимірювання якого проводиться даним приладом. Оскільки нам є відомими залежності між вхідними і вихідними величинами (формули (2.7) і (2.15)), то метрологічний аналіз приладу будемо проводити за допомогою диференційного методу. Даний метод полягає у визначенні часткових похідних похибок вимірюваних величин. Так як визначене значення крайового кута залежить від двох величин – об'єму і радіуса краплі, то часткові похідні будуть братися по цим величинам. Отже, абсолютна похибка приладу розраховується за формулою:

$$\Delta\theta = \frac{\partial\theta}{\partial R}\Delta R + \frac{\partial\theta}{\partial V}\Delta V, \quad (3.12)$$

де ΔR і ΔV — абсолютні похибки визначення радіуса і об'єму відповідно.

Абсолютна похибка визначення радіуса складається із похибки процесу реєстрації зображення відеокамерою і похибки розрахунку. Похибка відеокамери рівна розміру одного пікселя – 6,45 мкм, а похибка розрахунку рівна 10^{-14} м і цією незначною величиною ми нехтуємо. Отже, $\Delta R = 6,45 \cdot 10^{-6}$ м.

Абсолютна похибка визначення об'єму складається із похибки крокового двигуна, за допомогою якого відбувається формування краплі, а також похибки утворення краплі. Похибка крокового двигуна за паспортними даними становить 5% від одного кроку і так як крок двигуна становить $0,9^0$, то це буде $0,045^0$. Оскільки за один повний оберт поршень здатен просунути у вертикальному напрямі на 0,5мм, а площа поверхні колеса становить 121мм^2 , то за один крок

похибка формування краплі буде становити:

$$\Delta V_1 = \frac{0.045 \cdot 0.5 \cdot 121}{360} = 0,0075685 \text{ мм}^3.$$

Оскільки для визначення крайового кута змочування використовуються дві різні формули, то спочатку обчислимо похідні для кутів від 0 до 90°, а далі для кутів від 90° до 180°.

Визначимо часткові похідні по радіусу і об'єму:

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{(-36 \cdot r \cdot \sqrt[3]{\pi^4} \cdot V \cdot b - \sqrt[3]{\pi^8} \cdot r^6 - 18 \cdot V^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^2}) \cdot \sqrt[3]{a} + b \cdot r^4 \cdot \pi^2 + \sqrt[3]{a} \cdot [-r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^4} \cdot \sqrt[3]{a^2} + 3 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a} \cdot b + r^4 \cdot \pi^2]^2 \cdot b \times}{+ 3 \cdot r^4 \cdot \pi^2 \cdot V \cdot [-r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a^2} + 3 \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{a} \cdot b + r^4 \cdot \sqrt[3]{\pi^4}]} \quad (3.13)$$

$$\times [\sqrt[3]{a^2} \cdot r^2 \cdot (3 \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{a} \cdot b - 2 \cdot r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a^2} + r^4 \cdot \sqrt[3]{\pi^4})]^{\frac{1}{2}},$$

де $a = 3 \cdot V + b$,

$$b = \sqrt{r^6 \cdot \pi^2 + 9 \cdot V^2}.$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial V} = -2 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot [3 \cdot \sqrt[3]{\pi} \cdot \sqrt[3]{a^2} \cdot V + \sqrt[3]{\pi} \cdot \sqrt[3]{a^2} \cdot b + 3 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot V + r^2 \cdot \pi \cdot b] \times$$

$$\times \frac{-\sqrt[3]{\pi} \cdot \sqrt[3]{a^2} + r^2 \cdot \pi \times}{\sqrt[3]{a} \cdot [\sqrt[3]{a^2} \cdot r^2 \cdot (3 \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{a} \cdot b - 2 \cdot r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a^2} + r^4 \cdot \sqrt[3]{\pi^4})]^{\frac{1}{2}} \cdot b \times}$$

$$\frac{\times [-r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a^2} + 3 \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{a} \cdot b + r^4 \cdot \sqrt[3]{\pi^4}]}{\times [-r^2 \cdot \sqrt[3]{\pi^4} \cdot \sqrt[3]{a^2} + 3 \cdot \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a} \cdot V + \sqrt[3]{\pi^2} \cdot \sqrt[3]{a} \cdot b + r^4 \cdot \pi^2]^2}.$$

Підставляючи у формули (2.7), (3.13) і (3.14) значення $V=4,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ і $r=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, отримаємо: $\theta = 81,646^\circ$, $\partial \theta / \partial r = -1516$, $\partial \theta / \partial V = 1,522 \cdot 10^8$. Оскільки за один крок похибка по об'єму становить $0,0075685 \text{ мм}^3$, то за 31 крок вона буде становити — $\Delta V = 31 \cdot \Delta V_1 = 31 \cdot 0,0075685 = 0,2325 \text{ мм}^3$.

Тоді абсолютна похибка буде рівна:

$$\Delta \theta = 1516 \cdot 6,45 \cdot 10^{-6} + 1,522 \cdot 10^8 \cdot 0,2325 \cdot 10^{-9} = 0,045 \approx 0,05^\circ.$$

Тепер визначимо відносну похибку за формулою:

$$\delta \theta = \frac{\Delta \theta}{\theta} \cdot 100\%. \quad (3.15)$$

Підставивши числові значення отримаємо:

$$\delta\theta = \frac{0,045}{81,646} \cdot 100\% = 0,055\% .$$

Це ми визначили похибку приладу при вимірюванні ним гострих кутів, тобто для змочуючи рідин. Далі розрахуємо за таким самим методом абсолютну і відносну похибки для тупих куті (від 90° до 180°).

Підставляючи у формулу (2.15), значення $V=4,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ і $R=1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, отримаємо: $\theta = 123,063^\circ$, $\partial\theta/\partial R = 1,996 \cdot 10^3$, $\partial\theta/\partial V = -6,035 \cdot 10^8$.

Тоді абсолютна похибка буде рівна:

$$\Delta\theta = 1,996 \cdot 10^3 \cdot 6,45 \cdot 10^{-6} + 6,035 \cdot 10^8 \cdot 0,2325 \cdot 10^{-9} = 0,153 \approx 0,2^\circ .$$

Тепер визначимо відносну похибку за формулою (3.15):

$$\delta\theta = \frac{0,153}{123,063} \cdot 100\% = 0,12\% .$$

Така незначна величина похибки зумовлена тим, що ми не враховуємо похибку від процесу утворення краплі, визначити яку можна тільки провівши серію дослідів і здійснивши розрахунок похибки методом опосередкованого вимірювання з багатократним спостереженням аргументів.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було розглянуто і здійснено аналіз методів вимірювання крайового кута змочування, а також запропонований метод вимірювання крайового кута за розмірами краплі, який і покладений у основу роботи приладу.

В другому розділі було розроблено математичну модель методики вимірювання крайового кута краплі, проведено теоретичне обґрунтування методу вимірювання, а також були здійснені розроблено структурну і електричної принципові схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування рідиною поверхні твердого тіла. Оскільки під час виконання дослідів використовується ЕОМ, а також оскільки основним вузлом приладу є мікропроцесор, то розроблено алгоритм роботи програм, що задіяні під час виконання вимірювань. В останньому підрозділі даного розділу здійснено опис методики проведення дослідів за допомогою приладу для вимірювання крайового кута змочування.

В третьому розділі зроблено огляд метрологічних характеристик контролю, аналіз похибок при вимірюванні крайового кута змочування і розрахунок похибки приладу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

- 1 Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия. – 1974. – 416 с.
- 2 Гоковина М.П., Зайченко Л.П. Влияние ПАВ на краевой угол смачивания / Коллоидный журнал. 1978. – № 2. – 311 с.
- 3 Ребиндер П.А. и др. Физикохимия флотационных процессов. – М.: Металлуриздат. – 1933. – 230 с.
- 4 Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия. – 1976. – 232 с.
- 5 <http://kilm.by.ru/im/inter/rs232/index.html>. RS-232 для чайників. Опис RS-232.
- 6 <http://www1.rql.net.ua/library/16/3.htm>. Інтерфейси модемів.
- 7 Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Ниссельсон, В. И. Кулешова и др.; Под ред. С. В. Якубовского. - М.: Радио и связь, 1989. - 496 с.: ил.
- 8 Л. Грузов, Ю. А. Сабинин. Асинхронные маломощные приводы со статическими преобразователями. Л.: "Энергия", 1970, 136 с.
- 9 Расчёт электрических схем. Примеры и задачи: Учеб. Пособие для вузов по спец. эл. техн./ Под. ред. Гершунского.– М.: высшая школа, 1987.– 456с.
- 10 Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Под. ред. Г. С. Найвельта – М.: Радио и связь, 1985 – 576 с.
- 11 Кісінь І. С. Конструювання вимірювальних приладів. – Івано-Франківськ. Факел. – 2004. – 328 с.
- 12 Кісінь І.С. Метрологія і надійність засобів вимірювань. – Івано-Франківськ. Факел. – 2002. – 400 с.

ДОДАТОК А

Формування краплі і робота електричних елементів

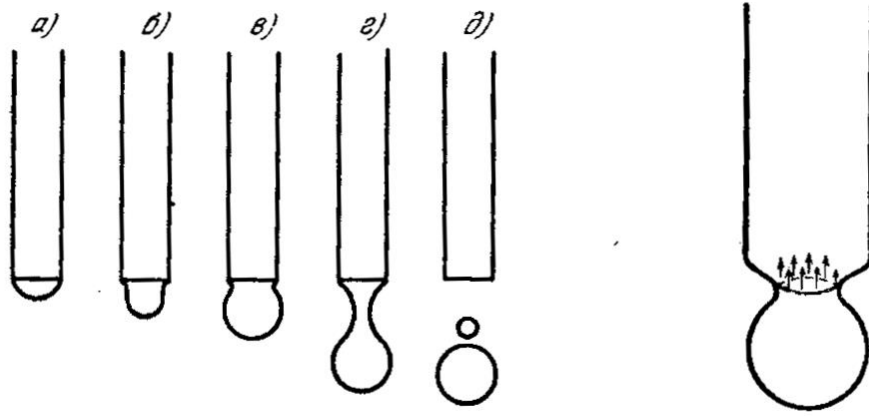


Рисунок А.1 – Механізм формування краплі

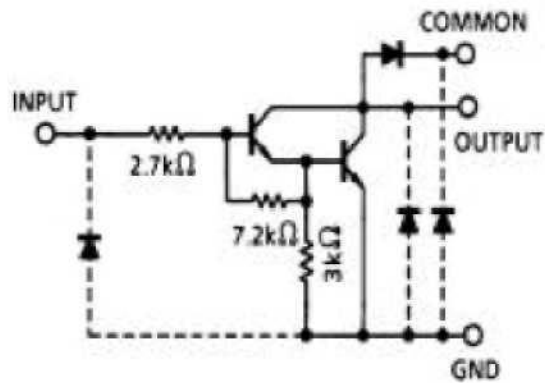
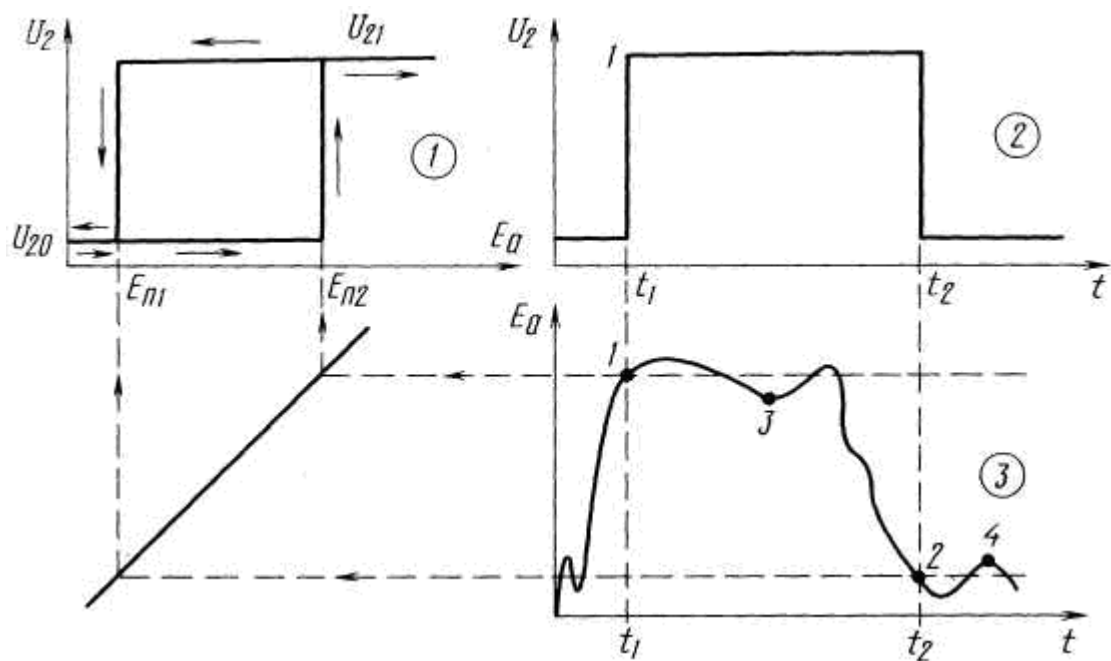


Рисунок А.2 – Схема елемента ключа для комутації струму котушки крокового двигуна

Продовження додатку А



1 – гістерезисна петля тригера Шмітта, 2 – сигнал на виході фотодатчика, 3 –
вхідний сигнал

Рисунок А.3 – Графік роботи фотодатчика

ДОДАТОК Б

Алгоритм програми роботи мікропроцесора і ЕОМ

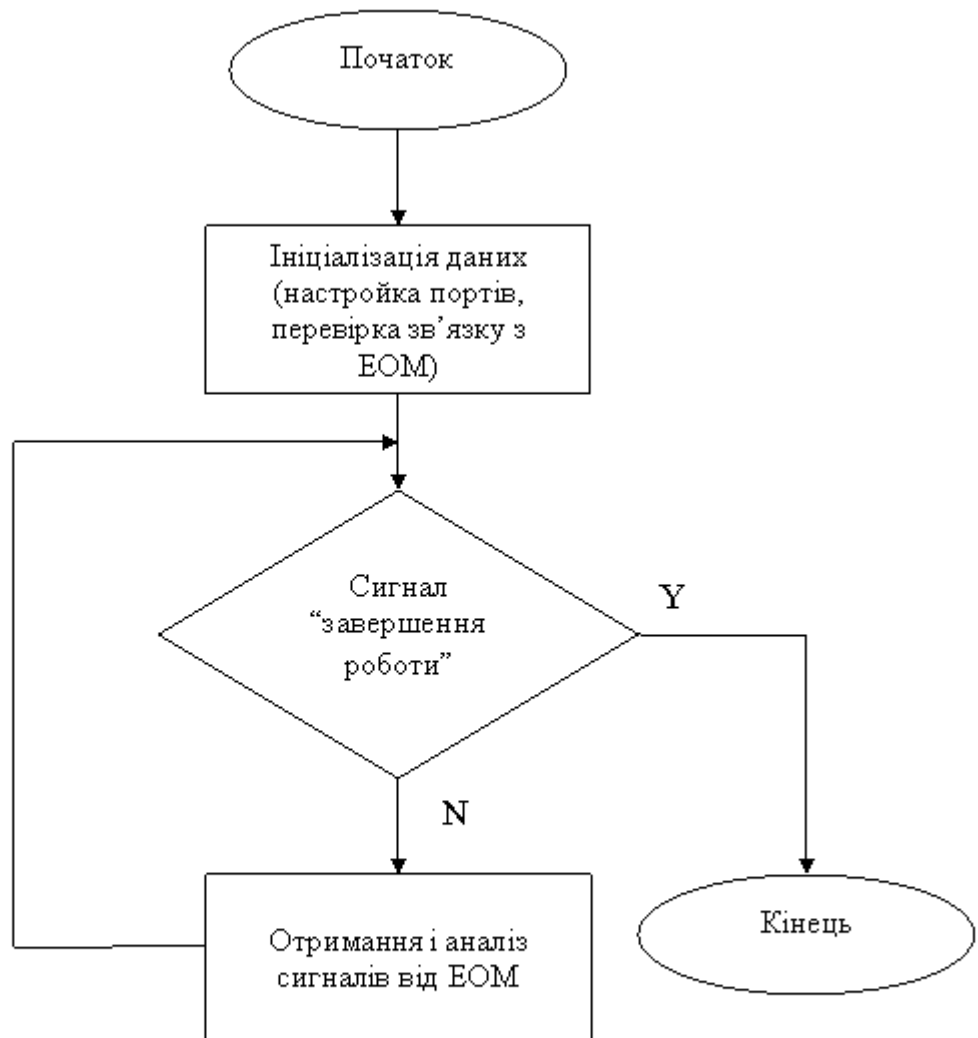


Рисунок Б.1 – Основна програма мікропроцесора

Продовження додатку Б

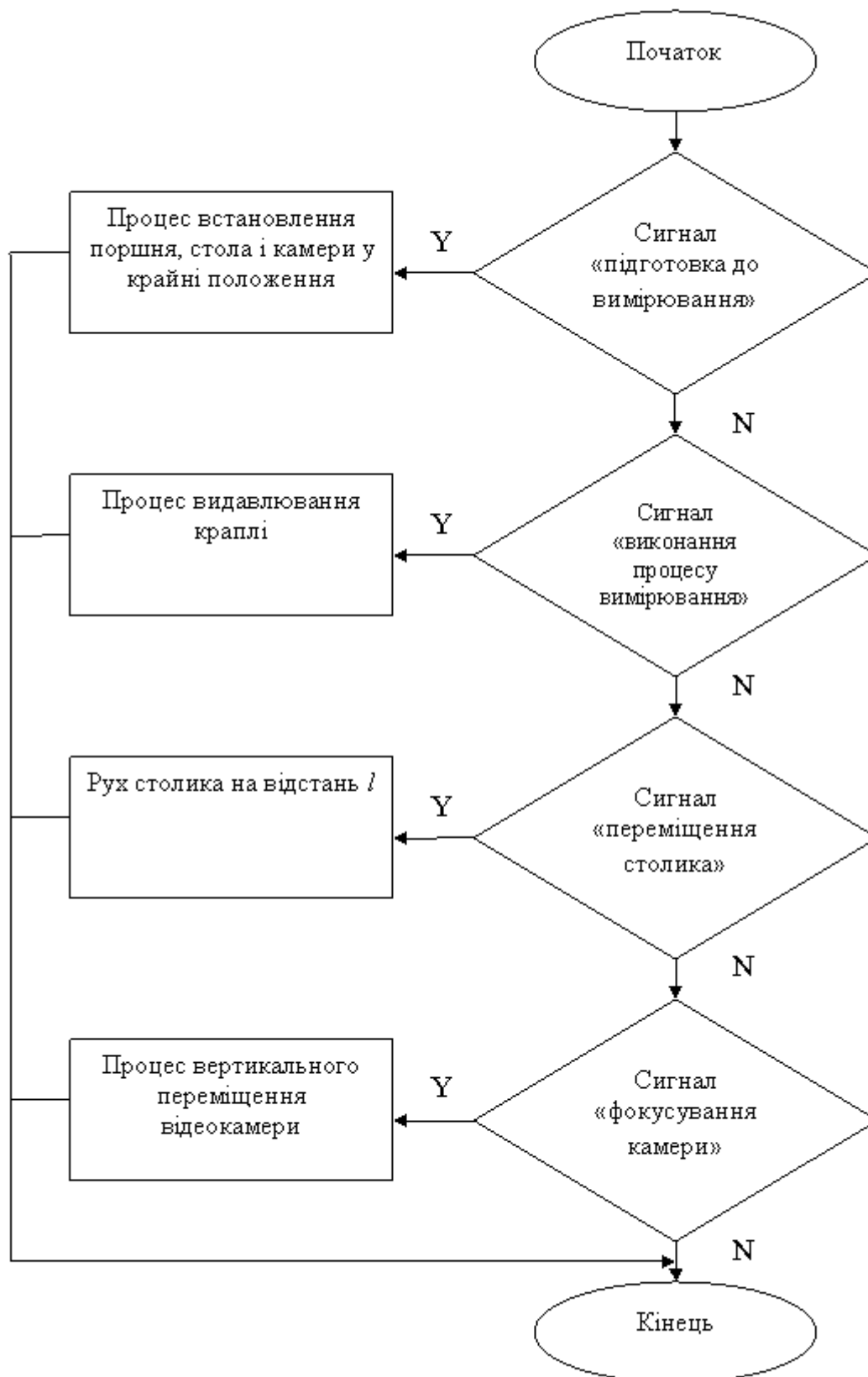


Рисунок Б.2 – Підпрограма аналізу сигналів, які прийшли від ЕОМ

Продовження додатку Б

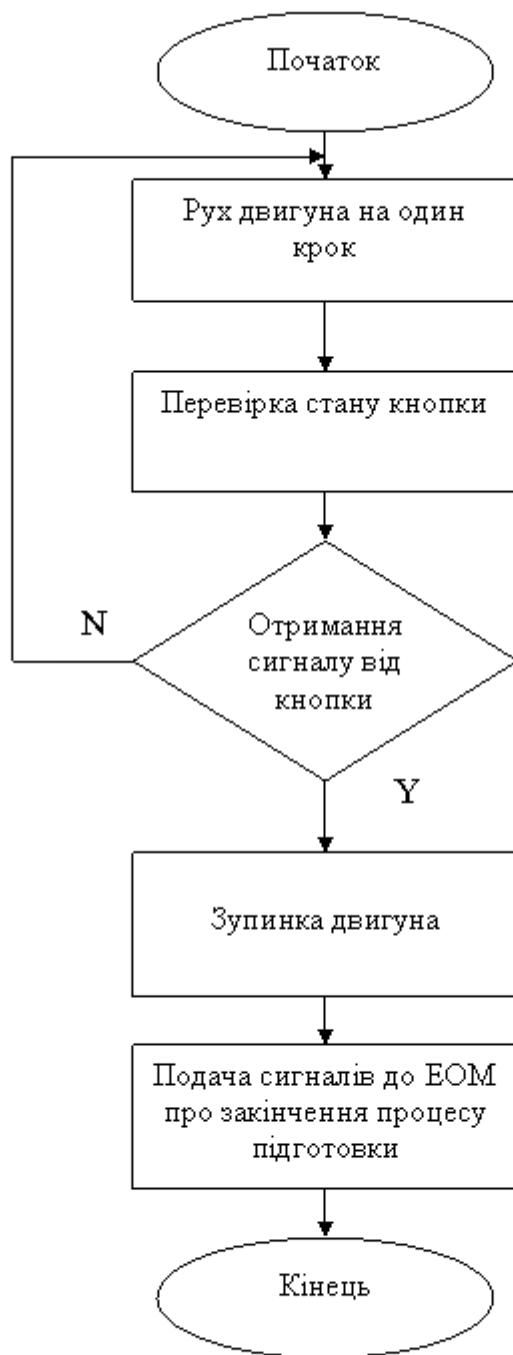


Рисунок Б.3 – Підпрограма процесу встановлення поршня, стола і камери у крайні положення

Продовження додатку Б

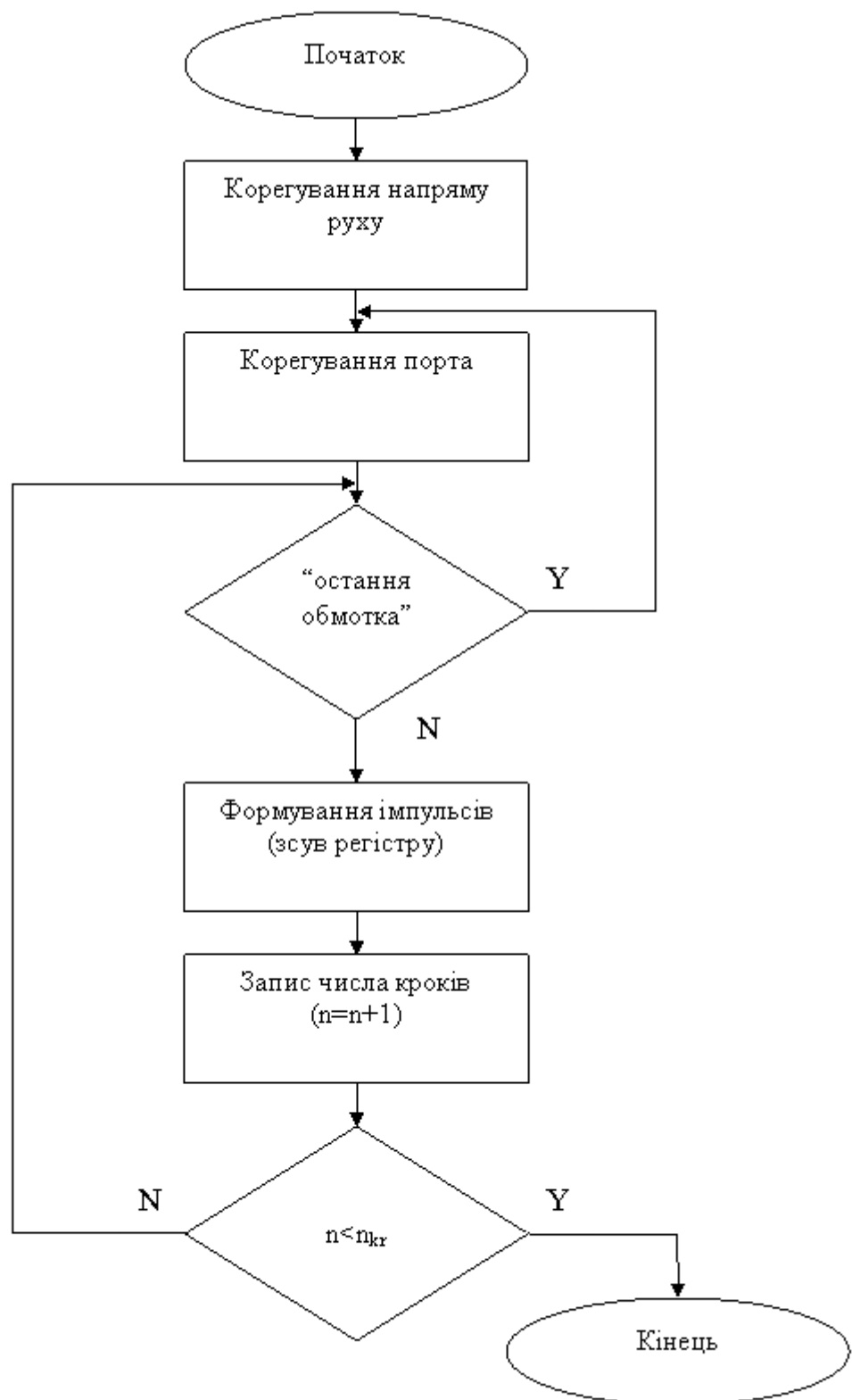


Рисунок Б.4 – Підпрограма процесу видавлювання краплі

Продовження додатку Б



Рисунок Б.5 – Підпрограма переривання від ФД

Продовження додатку Б

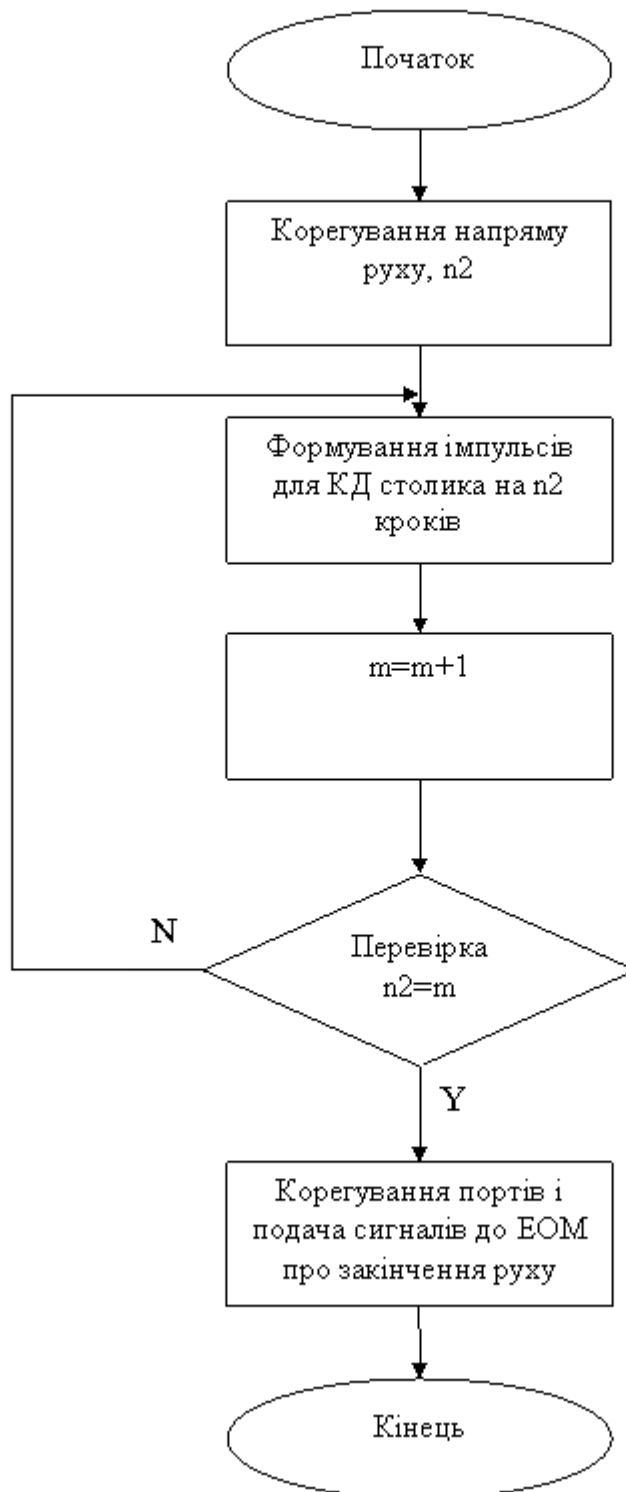


Рисунок Б.6 – Підпрограма руху столика

Продовження додатку Б

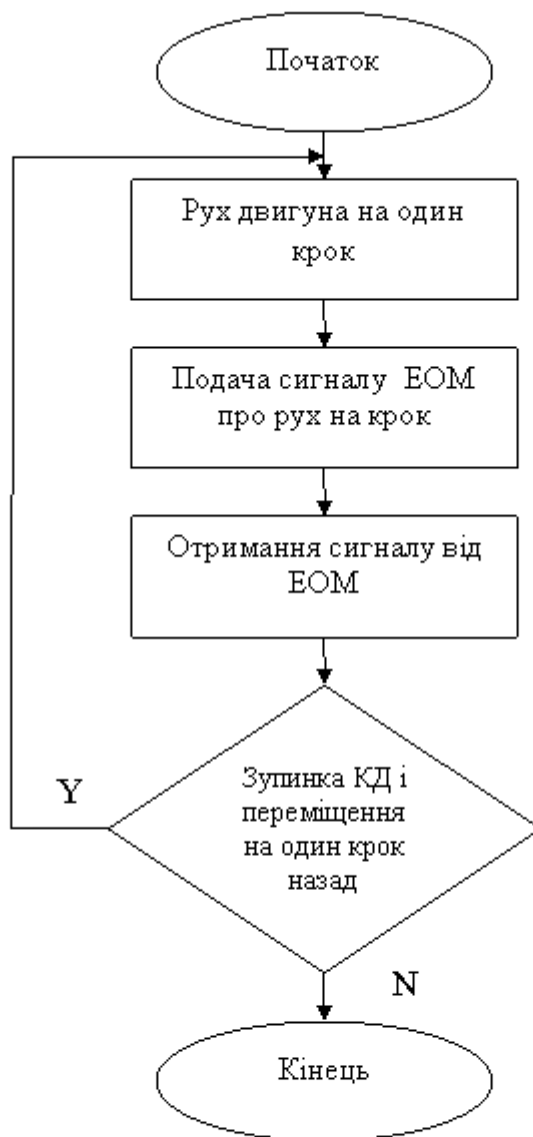


Рисунок Б.7 – Підпрограма фокусування відеокамери

Продовження додатку Б

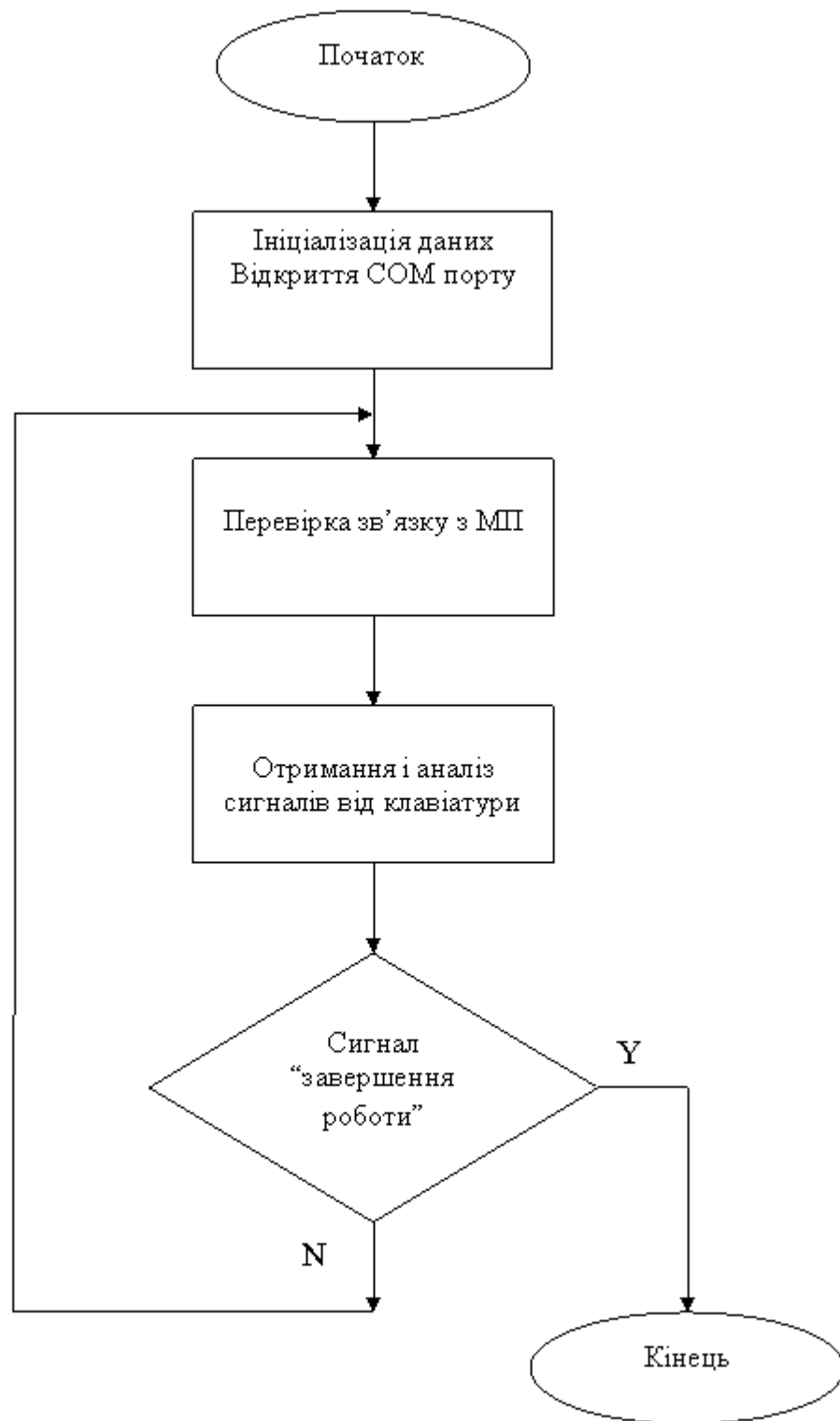


Рисунок Б.8 – Алгоритм програми на ЕОМ

Продовження додатку Б

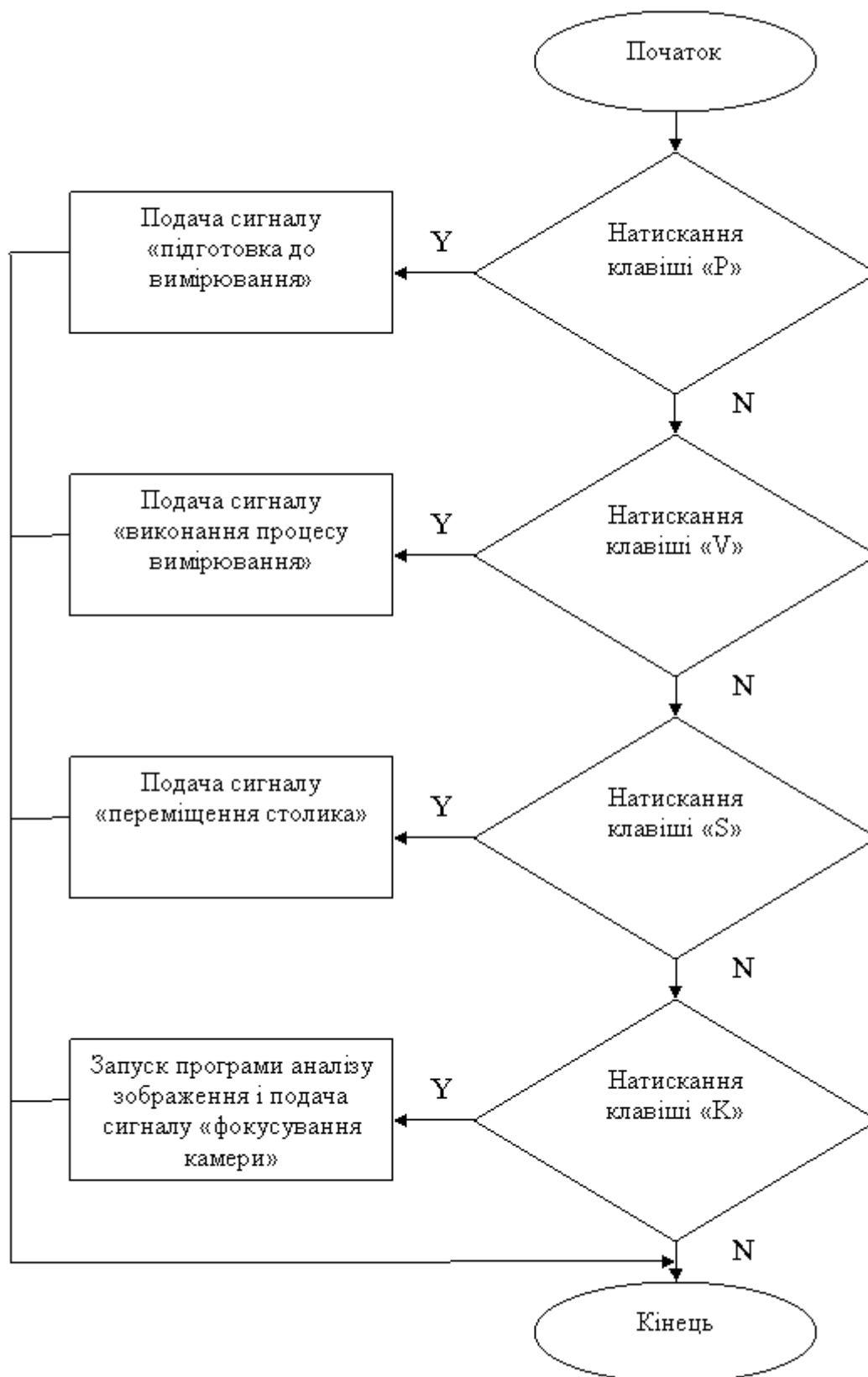


Рисунок Б.9 – Підпрограма команд від клавіатури ЕОМ

Продовження додатку Б

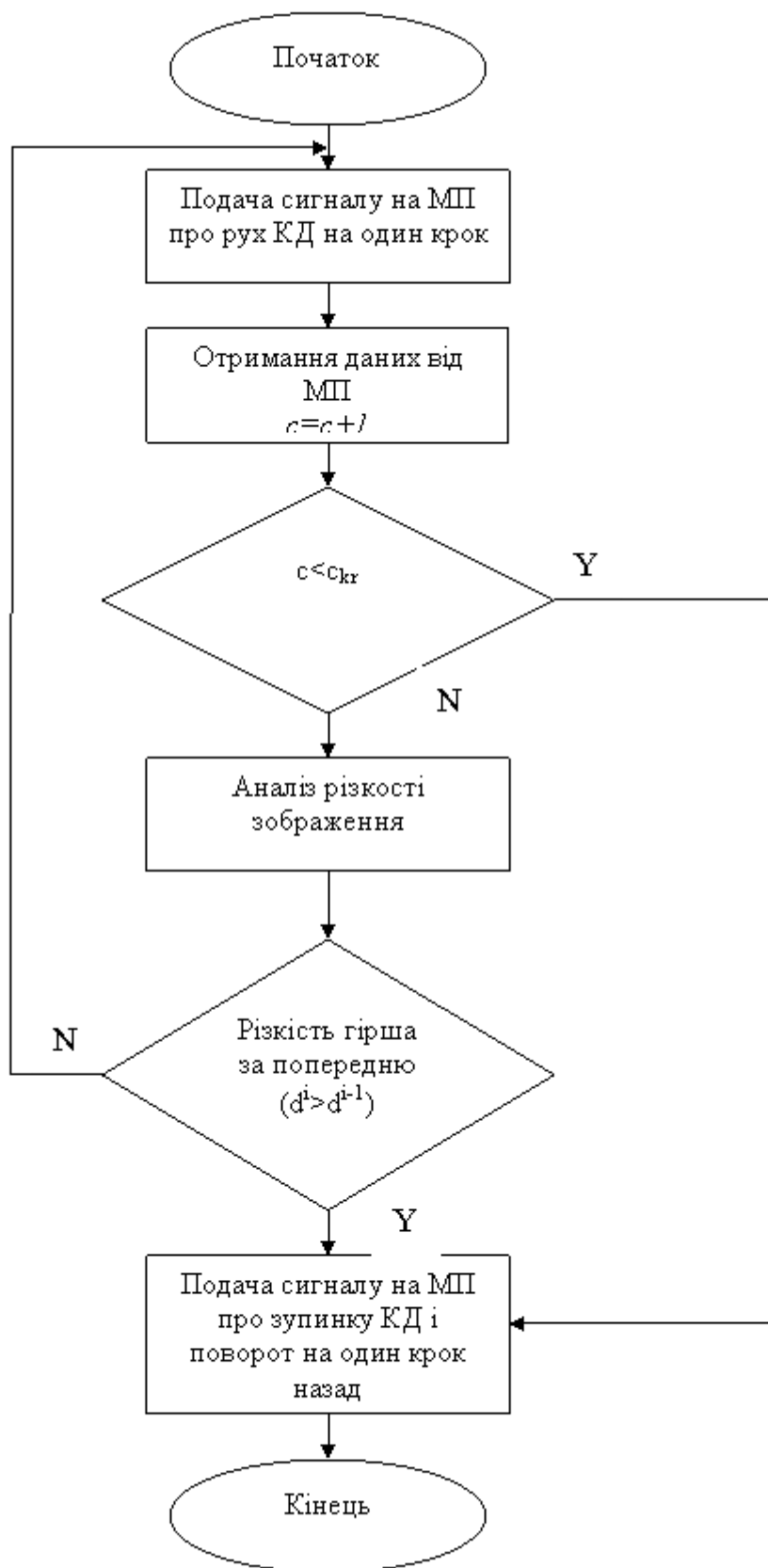


Рисунок Б.10 – Підпрограма на ЕОМ процесу фокусування відеокамери