

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій
Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

Завалка Роман Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК (662.612:662,769.21)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

"Розроблення та метрологічний аналіз удосконаленого методу і пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів при капілярній дефектоскопії"

(назва роботи)

Метрологія вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Р.Т. Завалка

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Витвицька Л.А., к.т.н. доцент каф. МІВТ

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

О.Є.Середюк

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

Рецензент

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

Івано-Франківськ

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МІВТ

Середюк О.Є.

« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Завалці Роману Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи "Розроблення та метрологічний аналіз удосконаленого методу і пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів при капілярній дефектоскопії"

Керівник роботи Витвицька Л.А., к.т.н. доцент каф. МІВТ,

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

затверджено наказом закладу вищої освіти від "15" грудня 2023 року №734/7

2. Строк подання студентом роботи 10.01.2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Діапазон вимірювання поверхневого натягу пенетрантів від 40 до 72 мН/м, метод вимірювання поверхневого натягу-підняття кільця

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

Вступ. 1. Обґрунтування необхідності та аналіз існуючих методів і засобів вимірювання поверхневого натягу пенетрантів. 2. Розроблення пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів. 3. Аналіз метрологічних характеристик пристрою для вимірювання поверхневого натягу методом кільця без руйнування поверхні розділу фаз

Висновки

Перелік посилань та джерела

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

1. Математичне моделювання процесу підняття кільця; 2. Залежність капілярної сталої від об'єму піднятої рідини для різних значень висоти підняття кільця; 3. Функціональна блок-схема пристрою ВПН-1; 4. Алгоритм роботи приладу ВПН-1; 5. МР.МТТм-11.00.00.000 СК - Електромеханічний блок; 6. Метрологічний аналіз розробленого пристрою;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Лютак З.П., професор		

7. Дата видачі завдання __ 15 квітня __.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	16.11.- 25.11.2023	
2.	1 Аналіз метрологічних характеристик пристрою для вимірювання поверхневого натягу методом кільця без руйнування поверхні розділу фаз	21.11.- 10.12.2023	
3.	2 Розроблення пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів	11.12.- 30.12.2023	
	3 Аналіз метрологічних характеристик пристрою для вимірювання поверхневого натягу методом кільця без руйнування поверхні розділу фаз	01.01.- 10.01.2024	
4.	Висновки	11.01.- 12.01.2024	
5	Оформлення пояснювальної записки	20.12.- 11.01.2024	

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Завалка Р.Т.

(прізвище та ініціали)

Витвицька Л.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 78 стор., 17 рис., 14 літер. джерел, 6 арк. граф. матеріалу

Мета роботи - Дослідження контролю якості проведення капілярної дефектоскопії на основі вимірювання поверхневого натягу пенетрантів удосконаленим методом, розроблення пристрою для реалізації удосконаленого методу.

Об'єкт дослідження – процес проникнення пенетранту у поверхневу тріщину та його вихід з тріщини після нанесення проявника

Предмет дослідження - поверхневий натяг пенетранта, який характеризує якість капілярної дефектоскопії.

Методи дослідження - математичні методи процесів підняття рідини в капілярі, підняття кільця з поверхні розділу рідина-газ, змочування рідиною поверхні твердого тіла .

В магістерській роботі проаналізовано існуючі методи вимірювання поверхневого натягу рідин, обгрунтовано вибір методу підняття кільця для розроблення удосконаленого методу без руйнування поверхні розділу фаз. Розроблено конструкцію пристрою, його алгоритм роботи, який реалізує удосконалений метод. Проведено метрологічний аналіз удосконаленого методу, розраховано сумарну похибку, яка підтверджує достовірність контролю.

Ключові слова та словосполучення: пенетрант, витягування кільця, поверхня розділу фаз, електромеханічний модуль, похибка вимірювання

ABSTRACT

Master's thesis: 78 pp., 17 fig., 14 letters. sources, 6 sheet earl. material

The purpose of the work is to study the quality control of capillary flaw detection based on the measurement of the surface tension of penetrants using an improved method, to develop a device for implementing the improved method.

The object of research is the process of penetration of the penetrant into the surface crack and its exit from the crack after applying the developer

The subject of research is the surface tension of the penetrant, which characterizes the quality of capillary defectoscopy.

Research methods - mathematical methods of the processes of raising the liquid in the capillary, raising the ring from the surface of the liquid-gas interface, wetting the surface of a solid body with liquid.

The master's thesis analyzed the existing methods of measuring the surface tension of liquids, justified the choice of the ring lifting method for the development of an improved method without destroying the phase interface. The design of the device, its work algorithm, which implements the improved method, has been developed. A metrological analysis of the improved method was carried out, the total error was calculated, which confirms the reliability of the control.

Key words and phrases: penetrant, ring pull, phase interface, electromechanical module, measurement error.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БУД – блок управління двигуном

ВПН – вимірювач поверхневого натягу

ДПН – динамічний поверхневий натяг

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

КД – кроковий двигун

ПАР – поверхнево активна речовина

ПН – поверхневий натяг

РПН – рівноважне значення поверхневого натягу

СКВ - середнє квадратичне відхилення

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	7
1 Обґрунтування необхідності та аналіз існуючих методів і засобів вимірювання поверхневого натягу пенетрантів.....	10
1.1 Вплив поверхневого натягу пенетранту на якість проведення капілярної ефектоскопії.....	10
1.2 Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання поверхневого натягу пенетрантів.....	15
1.2.1 Статичні методи.....	16
1.2.2 Напівстатичні методи	24
1.3 Постановка задачі на магістерську роботу	30
2. Розроблення пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів	32
2.1 Математичне моделювання процесу підняття кільця.....	32
2.2 Конструювання пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів	39
2.2.1 Основні технічні вимоги до конструкції пристрою	39
2.2.2 Розроблення і обґрунтування функціональної схеми пристрою.	40
2.3 Розроблення конструкції окремих вузлів пристрою.....	43
2.4 Опис режимів роботи пристрою.....	44
Висновки до розділу	48
3. Аналіз метрологічних характеристик пристрою для вимірювання поверхневого натягу методом кільця без руйнування поверхні розділу фаз	49
3.1 Загальний метрологічний аналіз пристрою.....	49
3.2 Дослідження окремих складових похибки пристрою.....	52
Висновки до розділу	66
Висновки	67
Перелік посилань на джерела	68

ВСТУП

Підвищення рівня надійності і збільшення ресурсу машин і інших об'єктів техніки можливо тільки за умови випуску продукції високої якості у всіх галузях машинобудування. Це вимагає неперервного вдосконалення технології виробництва і методів контролю якості. У ряді випадків вибіркового контролю початкового металу, заготовок, напівфабрикатів і готових виробів відповідального призначення на заводах не гарантує їх високу якість, особливо при серійному і масовому виготовленні. В даний час все більш широке розповсюдження отримує 100% -ний неруйнівний контроль продукції на окремих етапах виробництва. Для забезпечення високої експлуатаційної надійності машин і механізмів велике значення має також періодичний контроль їх стану без демонтажу або з обмеженим розбиранням, здійснюваний при обслуговуванні, в експлуатації або при ремонті.

У сучасних умовах стрімкого науково-технічного прогресу роль неруйнівного контролю значно зросла. Без цього високоефективного і продуктивного контролю неможливий, наприклад, розвиток космічної, авіаційної, атомної техніки і сучасної енергетики, а також забезпечення безпеки руху на транспорті.

Завдання істотного поліпшення якості промислової продукції, а отже, підвищення надійності і довговічності машин може бути успішно вирішене за умови вдосконалення виробництва і методів контролю якості продукції.

Контроль якості продукції полягає в перевірці відповідності показників її якості встановленим вимогам. Важливими критеріями високої якості деталей машин є фізичні, геометричні і функціональні показники, а також технологічні ознаки якості, наприклад, відсутність неприпустимих дефектів типу порушення суцільності матеріалу, відповідність фізико-механічних властивостей і структури основного матеріалу і покриття, геометричних розмірів і чистоти оброблення вимогам вказаним в технічній документації і ін.

В даний час у виробництві широко застосовують неруйнівний контроль (НК), що дозволяє перевірити якість продукції без порушення її придатності до використання за призначенням.

Контроль деталей методами капілярної дефектоскопії проводять із застосуванням комплектів матеріалів, що складаються з проникаючої і очищуючої рідин (або погасника) і проявника, які призначені для сумісного застосування.

При дослідженні властивостей проникаючих рідин і розробленні технології контролю з їх застосуванням визначають різні фізико-хімічні і технологічні властивості, зокрема поверхневий натяг, колір і яскравість люмінесценції, яскравісний коефіцієнт видимості, корозійну і хімічну активність по відношенню до об'єктів контролю, токсичність, пожежонебезпечність і інші властивості. Для вхідного і періодичного контролю якості вживаних рідин ТУ передбачають перевірку двох-трьох основних показників: зовнішнього вигляду; в'язкість; щільність; температури кипіння або замерзання; інтенсивність забарвлення або яскравості люмінесценції.

Актуальність магістерської роботи пов'язана з питанням контролю якості дефектоскопічних матеріалів і в першу чергу вимірювання поверхневого натягу пенетрантів, як основного показника, який впливає і на чутливість контролю, і на його продуктивність, і на його надійність, а значить може служити у великій мірі комплексним показником якості капілярної дефектоскопії. Причому є необхідним розглянути питання, які стосуються розроблення пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів не тільки в рівноважному (в усталеному) стані, але і в динамічному стані, коли границя розділу фаз тільки встановлюється. Це дає можливість визначити вплив різних складових розчинів пенетрантів на їх властивості.

Мета роботи - дослідження контролю якості проведення капілярної дефектоскопії на основі вимірювання поверхневого натягу пенетрантів

удосконаленим методом, розроблення пристрою для реалізації удосконаленого методу.

Об'єкт дослідження – процес проникнення пенетранту у поверхневу тріщину та його вихід з тріщини після нанесення проявника

Предмет дослідження - поверхневий натяг пенетранта, який характеризує якість капілярної дефектоскопії.

Методи дослідження - математичні методи процесів підняття рідини в капілярі, підняття кільця з поверхні розділу рідина-газ, змочування рідиною поверхні твердого тіла .

Наукова новизна - проведено теоретичне обґрунтування доцільності вимірювання поверхневого натягу на основі методу витягування кільця з поверхні на границі розділу пенетрант-повітря без відриву кільця з поверхні розділу.

Практична цінність - розроблено удосконалений пристрій, який реалізує розроблений удосконалений метод. Проведено його метрологічний аналіз.

1 ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ПЕНЕТРАНТІВ

В даному розділі розглянуті питання, що стосуються актуальності проблеми вимірювання поверхневого натягу пенетрантів, як основної властивості, яка визначає якість проведення дефектоскопії, а також проаналізовано існуючі методи та засоби для вимірювання поверхневого натягу рідин, сформульовано постановку задачі дипломного проектування.

1.1 Вплив поверхневого натягу пенетранту на якість проведення капілярної дефектоскопії

Капілярні методи контролю проникними речовинами використовують для знаходження дефектів, які, в основному, виходять на поверхню тріщин. Порожнини реальних тріщин найчастіше бувають тупиковими, мають форму вузького клина, вершина якого повернена в глиб матеріалу. Потрапляючи в таку тріщину, проникна речовина змочує стінки порожнини і продовжує проникати в глиб неї навіть після повного видалення з поверхні об'єкта контролю (надалі – ОК). У цьому випадку проникна рідина утворює в порожнині тріщини два меніски кривизни радіусів R_1 і R_2 , причому $R_2 > R_1$ (рис. 1.1, а). Ці меніски спричиняють появу двох капілярних тисків P_1 та P_2 , рівнодіюча яких повернена в глиб порожнини дефекту. Потрапляючи в порожнину дефекту, рідина утримується в ньому капілярними силами. Речовини, які проникають в порожнину дефекту, називають пенетрантами.

Якщо на меніск, розміщений у гирлі тріщини, накласти будь-яку пористу речовину, то він зникне і замість нього з'явиться система малих менісків різної форми і великої кривизни, кожний з яких створює свій капілярний тиск. Рівнодіюча ΔP створених менісками капілярних тисків

значно перевищує тиск P_1 і діє в протилежному напрямі. Під дією суми тисків $\sum P_T$ пенетрант із порожнини тріщини піднімається на поверхню ОК, трохи розпливаючись під дефектною ділянкою і утворюючи так званий індикаторний слід (візерунок), який можна спостерігати неозброєним оком або в лупу з невеличким збільшенням (рис. 1.1,б). Речовини, які витягують пенетранти з порожнин дефектів, називають проявниками.

На процес проявлення індикаторного візерунка дефектів істотно впливають сорбційні процеси. Під сорбцією мають на увазі процес поглинання пари та розчинних речовин твердими тілами або рідинами. Розрізняють абсорбцію і адсорбцію речовин. Адсорбція - поглинання речовин із розчинів на поверхні поділу двох середовищ (фаз) - твердого тіла та рідини. Абсорбція - поглинання речовини всім об'ємом рідини. Абсорбційні частки речовини утримуються на поверхні деякий час, який залежить від природи речовини, температури та тиску. При використанні як проявника сухих порошоків або суспензій на поверхні кожної частки проявника адсорбуються молекули пенетранта із порожнин нещільності матеріалу. При фізичній абсорбції ці молекули зберігають свою початкову будову, а при хімічній - створюють на поверхні проявника хімічну сполуку з ним. У разі користування як проявниками лаку або фарб спостерігається адсорбція пенетрантів і весь проявник, який міститься над порожниною дефекту, рівномірно поглинає пенетрант, який міститься в ній, розчиняє проявник і сам розчиняється в ньому.

Якщо для виявлення дефекту використовують пенетранти з високою леткістю і проявник швидко висихає, то над дефектом утворюється стійкий індикаторний візерунок, який довго зберігає свої форми та колір. При використанні малолетких пенетрантів або проявників, які повільно висихають, на поверхні контролю виникає нестабільний індикаторний візерунок.

Швидкість сорбційних процесів у проявнику залежить в основному від швидкості дифузії проникної рідини та розчинених у ній речовин у шар проявника.

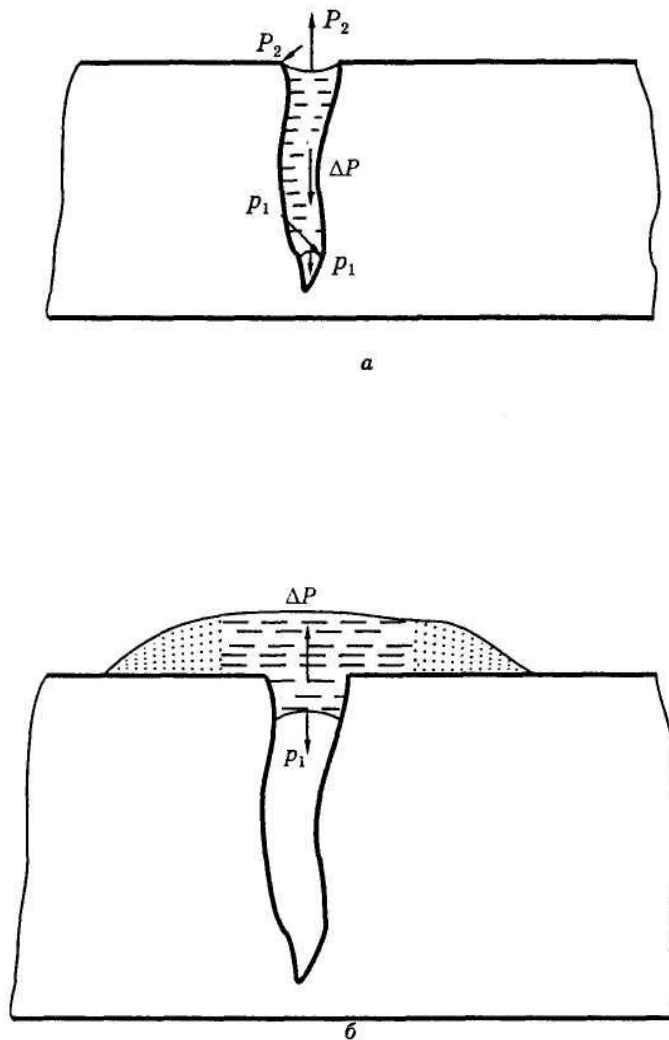


Рисунок 1.1 - Схема проникнення в глибину тупикової тріщини (а) та виявлення індикаторних слідів дефектів (б)

Кількість m дифундованої речовини, яка протікає за час Δt через площину F , визначають за формулою:

$$m = D \frac{c_1 - c_2}{l} F \Delta \tau_1, \quad (1.1)$$

де D - коефіцієнт дифузії; c_1 , c_2 - концентрації проникної рідини в двох шарах проявника, які розміщуються один від одного на відстані l .

При підвищенні температури коефіцієнт дифузії збільшується, що призводить до прискорення виявлення дефектів, якщо проникна рідина при цьому не випаровується. Витрата маси легкої рідини внаслідок

випаровування може перевищувати приріст її надходження в проявник, що призведе до погіршення виявлюваності або навіть невиявлюваності дефектів.

Індикаторні візерунки, які виникають при взаємодії пенетранта і проявника, або мають властивість люмінесцювати під дією УФ-випромінювання, мають кольорову забарвленість унаслідок вибіркового поглинання (відбиття) частини падаючих на них світлових променів. Лінії індикаторних слідів (візерунків) мають ширину 0,05..0,3 мм і високі яскраві та кольорові контрасти з фоном. Тому слід (візерунок) дефекту знайти значно легше, ніж сам дефект.

Контролюють вироби за допомогою дефектоскопічних матеріалів - наборів, компонентами кожного з яких є пенетрант, очисна рідина (погасник і очисник) і проявник.

Пенетрант - це розчин або суспензія барвника або люмінофора в суміші найчастіше органічних розчинників, гасу, масел із доданням ПАР, які знижують поверхневий натяг і покращують проникність пенетрантів у порожнини дефектів.

Як основу пенетрантів широко використовують гас, скипідар, ксилол та інші органічні речовини, які важко змиваються водою. Оптимальними для застосування вважають проникні речовини, які мають коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma = 26..28$ мН/м і динамічну в'язкість $\eta = 1...2$ мПа·с. Ацетон та бензол через велику леткість і високу токсичність рідко використовують у складі проникних речовин, застосовуючи тільки перший в основному процесі очищення виробів. Проте здатність інтенсивно розчинювати барвники та люмінофори у цих рідин обмежена. Більшість сучасних барвників органічного походження потребують застосування універсальніших розчинників, наприклад спиртів.

Якість дефектоскопічних матеріалів оцінюють тому, що через деякий час неодноразового застосування їх фізико-хімічні властивості можуть змінюватись. Якість матеріалів оцінюють або за окремими властивостями або комплексно за ефективністю виявлення дефектів відповідних типів

розмірів. Оцінка окремих властивостей найпростіша, хоча й не повністю характеризує дефектоскопічні якості матеріалів. Комплексна оцінка складніша, але вона відбиває остаточні результати контролю, оскільки дає можливість оцінювати як проникну здатність пенетрантів, так і виявлюваність дефектів. Звичайно перевіряють якість пенетрантів і проявників.

Досліджуючи властивості пенетрантів, в першу чергу визначають їх змочувальну здатність, яка залежить від величин поверхневиг натягів на границях розділу тверде тіло (об'єкт контролю) - повітря, рідина – повітря, тверде тіло – рідина. Основною з цих величин є величина поверхневого натягу рідини (пенетранту) на границі розділу з повітрям. Оскільки саме від значення цієї величини залежить і змочуваність поверхні, і інтенсивність та глибина проникнення пенетранту в порожнину тріщини, то виникає необхідність постійного контролю цієї властивості пенетрантів, як при їх виготовленні, так і при використанні. Довготривале використання пенетрантів приводить до змін їх фізичних властивостей, а значить і їх поверхневого натягу. Широкий спектр рецептур використовуваних на даний час пенетрантів, зокрема, внесення до їх складу поверхнево активних речовин, також зумовлює необхідність постійного контролю їх властивостей і в першу чергу величини поверхневого натягу. Причому на якість дефектоскопічного контролю значний вплив має час встановлення рівноважного значення поверхневого натягу (РПН), тобто величина димамічного поверхневого натягу (ДПН). На даний час існує велика кількість методів та засобів для вимірювання поверхневого натягу, однак всі вони є опосередкованими і не забезпечують достатньо високої точності. Тому доцільним є розглянути існуючі методи для вибору найбільш придатного для удосконалення.

1.2 Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання поверхневого натягу пенетрантів

Поверхнева енергія (точніше, питома вільна поверхнева енергія) – це робота ізотермічно-ізохорного і термодинамічного оборотного утворення додаткової одиниці поверхні розділу фаз; в системі SI вона має розмірність Дж/м². Якщо зробити часткове скорочення в цій розмірності, одержимо поверхневий натяг (Н/м). Математично жодна з цих величин не має переваг. Термін поверхневий натяг виник в аналогії в проведенні пружної плівки і поверхні розділу рухомих фаз. Але механізм скорочення такої поверхні і пружної плівки різний, оскільки при зменшенні або збільшенні площі поверхні розділу не відбувається стиснення або розтягнення поверхневої плівки, що пов'язані із зміною відстаней між молекулами, а молекули із поверхні втягуються в глибину або нові молекули (з об'єму фази) виходять на поверхню[5]. В залежності від типу поверхні розділу фаз рідина-газ чи рідин-рідина вживають відповідно терміни поверхневий натяг чи міжфазовий натяг.

Існування поверхневого натягу проявляється різноманітним чином. Саме цією обставиною, а також важливістю цього явища пояснюється велика кількість методів оцінки ПН. В даній роботі, обґрунтувавши необхідність вимірювання ПН пенетрантів, проведено порівняльну оцінку методів з точки зору можливості їх застосування для визначення ДПН і РПН чистих рідин і розчинів ПАР, звернуто увагу на загальні риси, відмінності і особливості різних методів та засобів, що їх реалізують.

В загальному випадку всі методи визначення ПН в залежності від швидкості зміни явищ і параметрів поверхні розділу фаз можна розділити на:

- статичні, тобто ті методи, в яких явища і параметри поверхні знаходяться в рівноважному стані;

- напівстатичні, тобто ті методи, в яких має місце процес зміни параметрів поверхні а вимірювання здійснюються для характерного моменту процесу, причому швидкість зміни поверхні можна регулювати;

1.2.1 Статичні методи

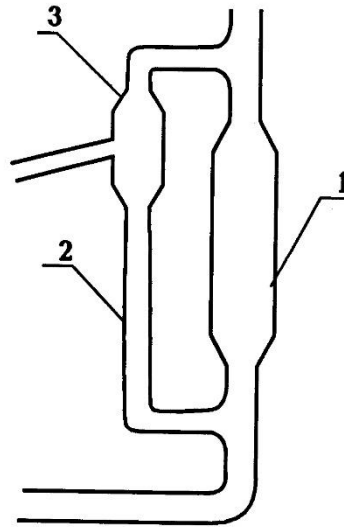
Метод капілярного підняття є одним із найбільш точних і простих методів як в експериментальному, так і в теоретичному відношенні. В основу цього методу закладено явище підняття під дією капілярних сил меніска досліджуваної рідини в капілярі, зануреному в рідину. В цьому випадку, допустивши, що меніск має сферичну форму, ПН розраховується за формулою [2]:

$$\sigma = h_m \cdot \Delta\gamma \cdot r_{вн} / 2 \cdot \cos \Theta, \quad (1.2)$$

де h_m - гранична висота підняття рідини в капілярі, $\Delta\gamma$ - різниця питомих ваг контактуючих фаз, $r_{вн}$ - внутрішній радіус капіляра, Θ - краєвий кут змочування матеріалу стінок капіляра рідиною

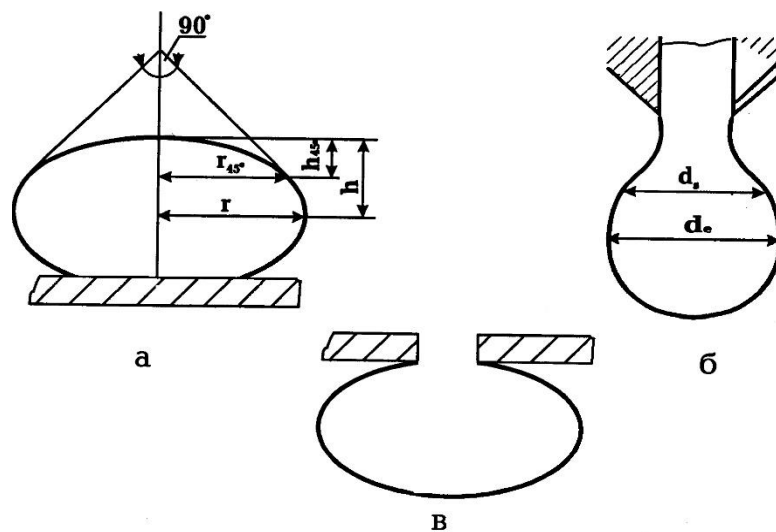
Найбільш простий, створений Юнгом і Гросом пристрій, який оснований на методі капілярного підняття, складається (рис. 1.2) із широкої трубки 1, верхній і нижній кінець якої з'єднаний із тонким каліброваним капіляром 2, у верхній частині якого є спеціальні розширення з відводом 3, що забезпечує створення нової поверхні розділу у випадку підняття рідини до верхнього краю капіляру. Підставляючи в формулу (1.2) виміряну через рівні проміжки часу різницю рівнів менісків в трубці і капілярі, розраховують значення ДНП. При цьому час існування поверхні розділу фаз відраховується від моменту появи нового меніска в капілярі до моменту кожного наступного виміру різниці висот.

Різновидностями даного методу є також методи підняття в кільцевому зазорі, між паралельними пластинами і між пластинами, які утворюють малий кут, між циліндром і площиною, метод меніска в конусі і т.п.



1 – трубка, 2- калібрований капіляр, 3-відвід.

Рисунок 1.2- Схема пристрою для визначення ПН рідин методом капілярного підняття



а- лежача капля, б- висяча капля, в- пухирець.

Рисунок 1.3 - Форми вільних поверхонь розділу фаз

Основними причинами обмеженого застосування методу капілярного підняття є залежність результатів вимірювання від крайового кута

змочування і густини досліджуваної рідини, складність виготовлення капілярів малих січень з постійним внутрішнім діаметром отвору і точного виміру висоти підняття меніска, складність автоматизації процесу вимірювання, а також неможливість точного встановлення моменту утворення поверхні розділу фаз. Якщо використовуються скляні капіляри чи пластини, то лужність досліджуваних рідин не повинна перевищувати деякого граничного значення.

Великий об'єм серед усіх методів вимірювання ПН займають методи, основані на визначенні форми нерухомих крапель або пухирців. Під дією поверхневих сил маленькі крапельки і пухирці намагаються прийняти сферичну форму. Якщо дії гравітаційних і поверхневих сил співрозмірні, то за формою крапель або пухирців, що є фігурами обертання навколо вертикальної осі, можна визначити ПН. Це твердження випливає із основного рівняння Юнга-Лапласа [2], згідно з яким для всіх капілярних поверхонь розділу між рідиною і газом або між двома незмішуваними рідинами існує залежність між функцією $Z = f(x, y)$, що описує поверхню через координати точок, які лежать на ній, і капілярною сталою a^2 , в яку входить ПН σ , різниця густин двох контактуючих фаз $\Delta\rho$ і прискорення вільного падіння g :

$$a^2 = \frac{\sigma}{\Delta\rho g} . \quad (1.3)$$

В загальному вигляді це рівняння записується:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\frac{\partial z}{\partial x}}{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}} = \frac{z}{a^2} + c . \quad (1.4)$$

Для менісків, які є фігурами обертання відносно вертикальної осі, при суміщенні початку координат з полюсами поверхонь, (омболічними точками) формула (1.4) запишеться так:

$$\frac{z''}{(1+z'^2)^{3/2}} + \frac{z'}{x(1+z'^2)^{1/2}} = \frac{z}{a^2}. \quad (1.5)$$

Інтегрування рівнянь (1.4) чи (1.5) можна отримати ряд кривих-меридіанів відповідних поверхонь обертання .

Основними методами визначення ПН, які ґрунтуються на вимірюванні геометричних розмірів вільних поверхонь роздвлу фаз, є: метод лежачої (рис. 1.3.а) і висячої (рис. 1.3.б) крапель, а також нерухомого пухирця (рис. 1.3.в).

На даний час існує декілька різновидностей методу лежачої краплі в залежності від методики знаходження ПН із геометрії краплі. Так, в установках Кінґері і Хюменіка , а також Смолдерса розміри лежачої краплі визначаються за фотографією її збільшеної тіні, яка утворюється на екрані, коли поблизу краплі розмістити джерело світла. Вимірюючи висоту h і діаметр $2r$ краплі в екваторі (рис. 1.3.а), можна розрахувати значення ПН за формулою:

$$\sigma = \frac{4r^2 \Delta \rho g}{H}, \quad (1.6)$$

де $\frac{1}{H}$ – табличний безрозмірний параметр, що однозначно залежить від h .

Техніку вимірювання розмірів крапель за допомогою катетометра вперше застосував Квінке з похибкою, що не перевищувала 10 мкм.

Іващенко та інші запропонували універсальний відносний спосіб розрахунку ПН за вимірянми на знімках двома будь-якими незалежними відрізками, які однозначно відносяться до меридіана лежачої краплі. При цьому кожний раз фіксується час від моменту утворення краплі до моменту фотографування. Точність вимірювання розмірів краплі повинна бути на порядок вищою від необхідної заданої точності визначення ПН.

Ще однією різновидністю методів, що ґрунтуються на визначенні форми крапель є метод обертової краплі (рис 1.4). Якщо краплю рідини з меншою густиною помістити в рідину з більшою густиною, то при обертанні всієї системи, як показано на рис 1.4. легша рідина йде до

центру, утворюючи краплю на осі обертання. Із збільшенням швидкості обертання крапля витягується, оскільки відцентрова сила все більше протидіє поверхневому натягу, який намагається зменшити до мінімуму поверхню розділу. Крапля деформується в продовгуватий еліпс. При достатньо великій швидкості обертання крапля стає подібна на витягнутий циліндр. В такому випадку ПН визначається за формулою [2]:

$$\sigma = \frac{\omega^2 \Delta \rho r_0}{4}, \quad (1.7)$$

де ω - швидкість обертання; r_0 - радіус утвореного циліндра.

Каяс та ін. [3] застосували даний метод для вивчення систем з дуже низьким ПН. Метод дозволяє легко і з досить великою точністю виміряти міжфазовий натяг рідин.

Методи висячої краплі і нерухомого пухирця є також досить поширені. Вони відрізняються лише способом формування краплі чи пухирця. Крапля, яка звисає з кінчика капіляра (або пухирець, який прилип до нього), витягуються по мірі свого росту, оскільки зміна гідростатичного тиску стає співрозмірною з тиском, зумовленим кривизною верхівки краплі.

Методи сидячої, висячої крапель і нерухомого пухирця використовуються при дослідженні в'язких рідин без необхідності врахування кута змочування ними твердих поверхонь, при підвищених температурах і тисках оточуючого середовища і для хімічно активних матеріалів. Однак, довго тривалість вираховування одного значення ПН, складність встановлення часу існування поверхні, необхідність створення умов для запобігання вібрації, випаровування і забруднення поверхні обмежують застосування даного методу для вимірювання ДПН і РПН пенетрантів.

Крім цього час встановлення РПН в обмеженому об'ємі краплі можуть бути відмінні від аналогічних показників в порівняно більшому об'ємі того ж розчину.

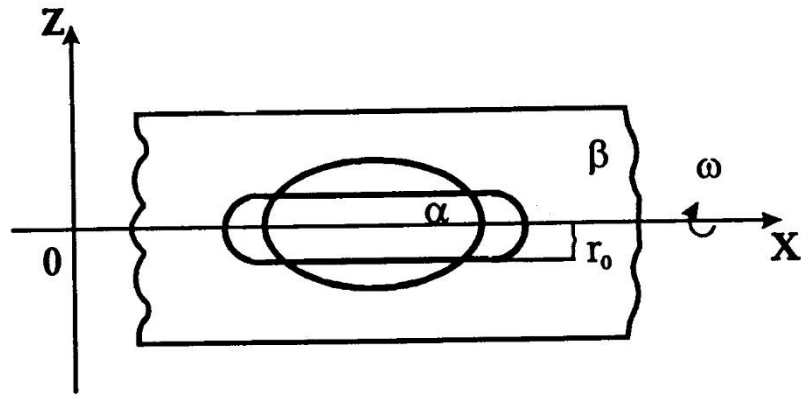


Рисунок 1.4 - Обертання капіляра з рідиною, в якій знаходиться крапля більш легкої рідини

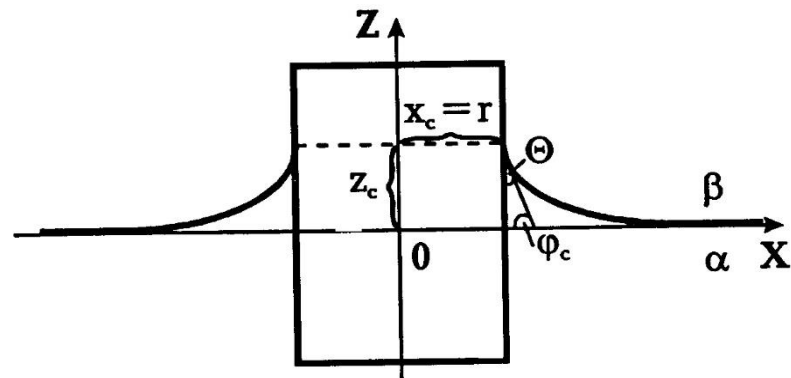


Рисунок 1.5. - Профіль розгорнутого меніска з лінією трьохфазного контакту на боковій поверхні циліндра

Методи розгорнутого меніска ґрунтуються на вимірюванні величин, які характеризують профіль фіксованої форми розгорнутого меніска. Такий меніск на практиці легко отримати, помістивши вертикально орієнтований круглий циліндр радіусом r в широку посудину з рідиною (рис 1.5). Для випадку повністю змочуваного циліндра з трифазною лінією контакту висотою Z була запропонована проста розрахункова формула :

$$\sigma = 0,198 \Delta \rho g [r \cdot \exp(z_c / r)] \quad (1.8)$$

При використанні даної формули повинна виконуватися умова малого радіуса циліндра $r \ll 0,27$ см, а значить і малої висоти z_c , що значно збільшує похибки при їх вимірюванні.

Методи розгорнутого меніска дозволяють з достатньо високою точністю (похибка не перевищує 0,2% при умові достатньо точного (± 2 мкм) вимірювання параметрів профілю меніска) визначати тільки рівноважний ПН, коли форма профілю стає незмінною. Тривалий час проведення одного вимірювання вказує на неможливість застосування даних методів для визначення ДПН розчинів.

В основу методу пластинки Вільгельмі закладено вимірювання сили, що діє по вертикалі на пластинку, яка знаходиться в деякому фіксованому положенні відносно горизонтальної поверхні рідини. Вага пластинки P і глибина її занурення h в досліджувану рідину при умові нульового кута змочування її поверхні рідиною пов'язані з ПН залежністю :

$$\sigma = \frac{P + sh\rho g}{2(l + b)}, \quad (1.9)$$

де S - площа поперечного січення зануреної пластинки; l, b - відповідно ширина і товщина пластинки.

Визначення ПН проводять вимірюючи вагу зануреної пластинки при постійній глибині її занурення або підтримуючи постійною її вагу, змінюють при цьому глибину занурення або одночасно вимірюють вагу пластинки і глибинну її занурення.

В загальному випадку схема пристрою для вимірювання ПН по методу Вільгельмі складається із таких основних елементів і вузлів (рис 1.6): частково зануреної пластинки 1, вузлів вимірювання її ваги 2 і глибини занурення 3, посудини з досліджуваною рідиною 4 і вторинного реєструючого пристрою 5.

Для вимірювання ваги занурених тіл використовуються різного типу ваги: торсійні, коромислові, електроваги, ваги Кулона, кварцеві спіралі. Глибина занурення предмета в досліджувану рідину визначається, як

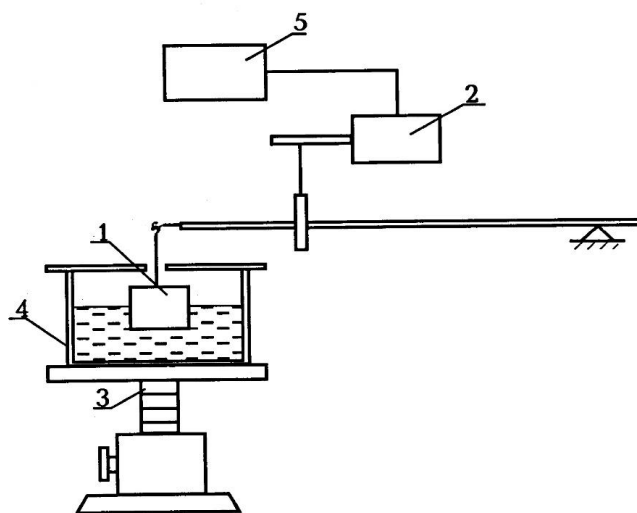
правило, за допомогою високоточних мікрогвинтів та катетометрів зі складними оптичними і електронними пристроями.

При визначенні ДПН даним методом час існування поверхні розділу фаз відлічується від моменту утворення поверхні до моменту кожного вимірювання ваги. При цьому цей час існування може змінюватися в широких межах. Нижня границя його обмежена 5-10 с, що визначається конструктивними особливостями пристрою.

Відомі модифікації даного методу, коли замість скляної чи платинової пластинок використовуються: рамка, лопасть, пластинка П-подібної форми. Для додаткової гарантії повного змочування цих предметів збільшують коефіцієнт шорсткості їхньої поверхні шляхом втирання дрібного абразивного порошку або обдування ним цієї поверхні.

Для підвищення точності визначення ПН були розроблені спеціальні поправки, що враховують розміри посудини з досліджуваною рідиною і кути змочування її стінок, а також зниження рівня рідини внаслідок утворення меніска біля пластинки.

Пристрої за методом Вільгельмі використовуються, в основному, для дослідження чистих рідин або розчинів, в яких поволі міняються поверхневі властивості.



1 - пластина; 2 - вузол вимірювання ваги; 3 - глибина; 4 – рідина;
5 – реєструючий пристрій

Рисунок 1.6 - Схема пристрою для вимірювання ПН методом Вільгельмі

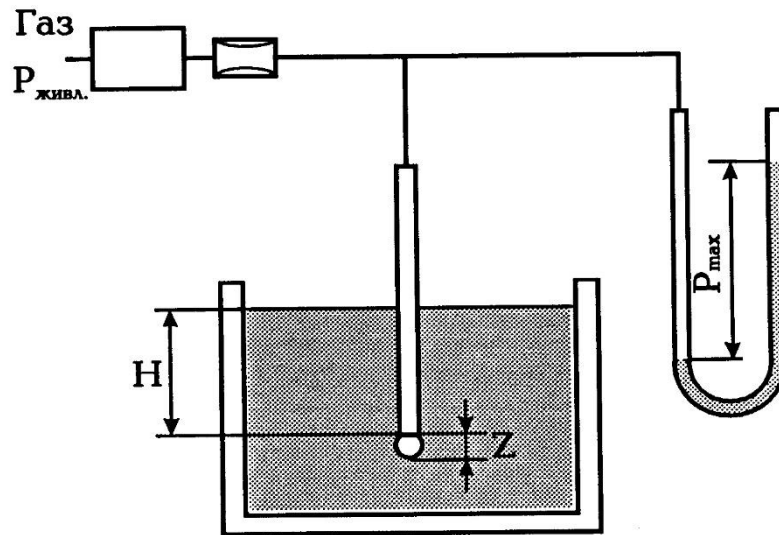


Рисунок 1.7 - Схема пристрою для вимірювання ПН методом максимального тиску в газовому пухирці

Складність і довготривалість процесу вимірювання, а також необхідність попереднього визначення величини крайового кута змочування поверхні пластинки обмежує використання даного методу для визначення швидкозмінних динамічних поверхневих характеристик. Крім того, точність вимірювання в значній мірі залежить від строгого дотримання стану спокою досліджуваної поверхні та заданого положення зануреної пластинки по відношенню до поверхні.

1.2.2 Напівстатичні методи

Метод максимального тиску в газовому пухирці, як показано на рис 1.7, полягає в повільному видуванні пухирців в досліджувану рідину. Пухирці видувають інертним газом за допомогою трубки, частково зануреної в рідину. В основу методу закладено існування однозначної залежності між максимально можливим тиском в газовому пухирці та ПН на поверхні розділу двох контактуючих фаз [2]. При цьому ПН визначається таким співвідношенням:

$$\sigma = [P_{\max} - \Delta\gamma(z + H)]R_0/2, \quad (1.10)$$

де P_{\max} - максимальний тиск газу в капілярі, при якому пухирець ще не відірвався від краю капіляру; $\Delta\gamma$ - різниця питомих ваг контактуючих фаз; z - відстань від вершини меніска газового пухирця в момент найбільшого тиску до площини зрізу вертикально вставленого капіляра; H - глибина занурення капіляра; R_0 - радіус кривизни в вершині меніска.

Величини z і R_0 безпосередньо важко визначити. Тому на основі чисельного інтегрування основного рівняння капілярності рядом авторів отримані наближені аналітичні залежності ПН від P_{\max} , в які входить величина внутрішнього радіуса капіляра.

Метод максимального тиску в газовому пухирці в даний час широко використовується в силу простоти реалізації, високої точності та широкого діапазону вимірювання, можливості автоматизації процесу. Особливо слід відмітити методику і прилад В.Б. Файнермана, який використовується для вимірювання ДПН в мілісекундному часі існування поверхні розділу фаз. Однак даний метод не дозволяє прецизійно вимірювати ДПН і РПН розчинів, оскільки кожне вимірювання супроводжується відривом пухирця від торця капіляра і виринанням на поверхню, що приводить до руйнування останньої і порушення адсорбційної рівноваги.

Суть методу зважування крапель (сталагмометричний метод) полягає у вимірюванні маси крапель, які, формуючись на кінці вертикальної трубки відомого радіуса $r_{\text{вн}}$, капають в контейнер, в якому вимірюється їхня вага (рис. 1.8а). Ідея даного методу була сформульована Тейтом у вигляді простої залежності між ПН та вагою краплі P :

$$\sigma = \frac{P}{2\pi r_{\text{вн}}}. \quad (1.11)$$

Однак, як було виявлено при детальному спостереженні процесу утворення краплі (рис.1.8б), фактично падає тільки частина краплі, котра досягла точки нестабільності. Тому Гаркінс і Браун вказали на необхідність врахування в формулі (1.11) поправочного коефіцієнта, що є

функцією радіуса трубки і об'єму краплі. На основі експериментальних даних ними були розроблені таблиці для знаходження поправочних коефіцієнтів. Однак знайдені таким чином поправки не дають результатів, ідентичних тим, що знаходять за поправками Лонштейна, які розраховуються по функціональній залежності об'єму краплі, що впала, від радіуса капіляра r та капілярної сталої a^2 .

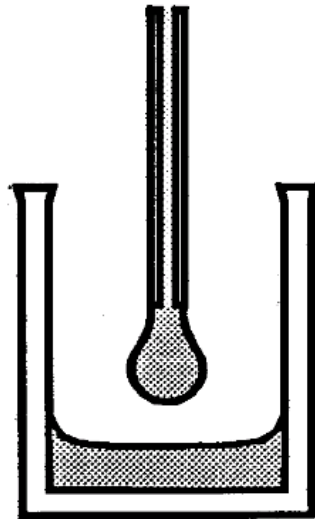
Слід відзначити, що сама стадія відриву є динамічним процесом. Тому даний метод відноситься до напівстатичних до моменту втрати стійкості висячої краплі. Сам процес відриву не є теоретично достатньо вивченим, зокрема, не з'ясований вплив в'язкості рідини на швидкість і характер цього процесу .

На даний час широке розповсюдження отримали методи, основані на вимірюванні максимального значення сили, прикладеної для витягування тіла з рідини. В основі цих методів лежить існування однозначної залежності між величиною ПН і максимальним значенням сили, яка вертикально прикладена до твердого тіла правильної геометричної форми для його витягування з рідини і проходження через досліджувану поверхню. В залежності від форми застосовуваного твердого тіла розрізняють методи витягування вертикального та горизонтального циліндра, кулі, конуса, пластинки, порожнистого циліндра та кільця.

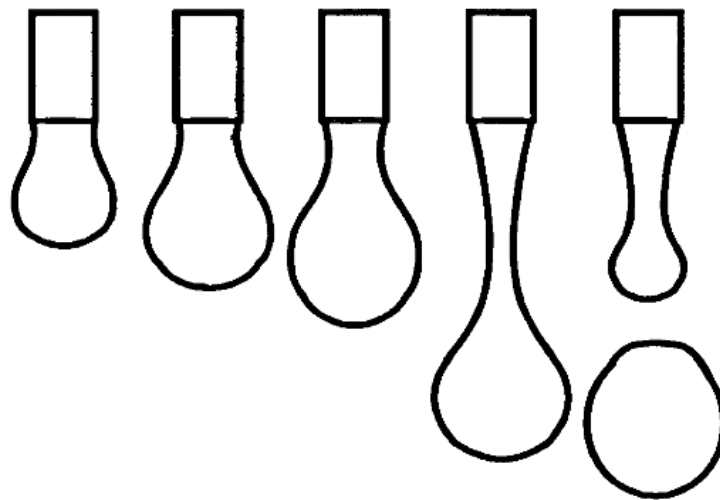
Якщо частково занурений вертикальний циліндр поступово витягувати з рідини, то буде зростати прикладена до нього сила F , яка в загальному випадку визначається виразом:

$$F = 2\pi r \sigma \sin \varphi_c + 2\pi r^2 h \Delta \rho g . \quad (1.12)$$

При витягуванні із рідини твердого тіла сферичної форми прикладена сила теж проходить через максимум і далі зменшується аж до руйнування меніска.



а



б

а - збільшений вигляд краплі і капіляра в контейнері;

б - високошвидкісне фотографування краплі.

Рисунок 1.8 - Метод ваги краплі

При русі кулі вгору лінія трифазного контакту зміщується по сферичній поверхні вниз, причому крайовий кут змочування є постійним, а

змінними величинами є: радіус контактної лінії, висота кулі, висота меніска, контактний кут між меніском і горизонтальною поверхнею.

Близькими один до одного за своєю суттю є методи витягування порожнинного циліндра, плоскопаралельної пластини, кільця або тороїда (рис.1.9). Найбільш використовуваним тілом є кільце. Сумарна сила F , яка діє вертикально на кільце з боку рідини, теж складається із сил ПН, гідростатичного тиску і, при умові занурення кільця, архімедової сили. Однак оскільки утворений кільцем меніск має більш складну конфігурацію в порівнянні з іншими тілами, то більш складною є функціональна залежність між параметрами згідно рис 1.9, які характеризують кільце з рідинним меніском:

$$F = \Delta\rho g f(h, \Theta, r, R, a^2) \quad (1.13)$$

Залежність (1.13) свідчить про однозначність визначення ПН із вимірних значень F_{\max} і h з врахуванням відомих $R, r, \Delta\rho, \Theta$.

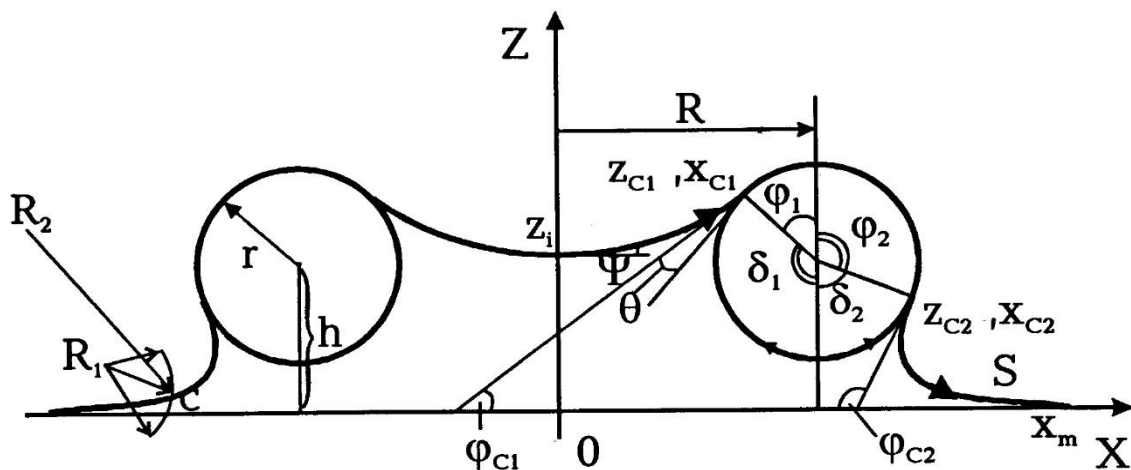


Рисунок 1.9 - Профіль кільця з внутрішнім і зовнішнім менісками

Метод кільця був започаткований ще на початку нашого століття. Незалежно один від одного Кантор, Лохнштейн, Ленард, Тіхановський, Мак Доугал встановили, що вимірявши силу, яку необхідно прикласти для відриву кільця від поверхні, можна знайти наближене значення ПН за такою формулою:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{4\pi R} , \quad (1.13)$$

де R - радіус кільця, відміряний від центра до осі дроту, з якого виготовлене кільце.

Слід відзначити, що метод кільця в порівнянні з іншими вище вказаними методами, основаними на вимірюванні максимального значення сили, прикладеної для витягування тіла з рідини, є найбільш точним методом, по якому у свій час був розроблений стандарт, оскільки довжина контактної лінії, а отже і сумарна сила у випадку кільця істотно більші.

Всі ці методи, в яких вимірюється прикладена до різної форми тіл сила, залежно від виду застосовуваного пристрою для вимірювання сили можна розділити на дві групи: методи відриву і методи витягування тіла. Методи відриву характеризуються застосуванням ваг, що працюють по відхиленню, в яких сила визначається як функція зміщення деякого пружного елемента, наприклад, пружини. Після досягнення F_{\max} вся система "меніск-тіло-пружний елемент ваги" стає нестійкою, оскільки при подальшому зниженні сили стискується пружний елемент (зворотня деформація), що приводить до неконтрольованого росту висоти підняття тіла і до відриву останнього від поверхні.

В методах витягування тіла, в яких вимірюються екстремальні значення параметрів, використовуються електроваги, в основі яких лежить нульовий принцип зрівноважування (при наявності практично миттєво діючого зворотного зв'язку). У цьому випадку руйнування меніска і відрив від поверхні відбувається за межами екстремальної точки (точки максимуму сили). На існування різниці в значеннях максимальної сили і сили при відриві кільця у свій час вказували Ленард і Фреундліх.

Технічно методи відриву реалізувати простіше ніж методи витягування, так як набагато легше і візуально і при допомозі датчика зафіксувати момент відриву тіла, ніж виявити момент досягнення максимальної сили. Однак, якщо визначається рівноважний ПН рідини, для якої встановлення хімічної (адсорбційно-десорбційної) рівноваги

вимагає достатнього часу, то навіть при дуже повільному наближенні до границі стійкості системи "меніск-тіло-елемент ваги" вимірне значення F_{\max} може не відповідати рівноважному стану рідини. Вимірювання ДПН розчинів, коли ще не настала адсорбційна рівновага, як методами витягування, так і методами відриву пов'язано з великою похибкою. Отже, виникає необхідність в розробці таких удосконалених методів, які забезпечували б проведення вимірювання з малими затратами часу без руйнування поверхні розділу фаз. Найбільш придатним для удосконалення є метод витягування кільця, оскільки в порівнянні з іншими розглянутими вище методами витягування тіл правильної геометричної форми сумарна прикладена до кільця сила і висота його підйому до руйнування меніска є значно більшими, що забезпечує високу точність вимірювання без руйнування поверхні розділу фаз. Крім того, простота реалізації і зручність обслуговування дає можливість створити прилад, який забезпечував би проведення вимірювання в автоматичному режимі.

1.3 Постановка задач магістерської роботи

На основі обґрунтування необхідності контролю дефектоскопічних матеріалів та аналізу існуючих методів та засобів вимірювання одного з основних показників якості проникаючих рідин – їх поверхневого натягу на границі розділу рідина-повітря встановлено, що доцільно розробити метод та пристрій, який би реалізував процес вимірювання поверхневого натягу без руйнування поверхні розділу фаз. Найбільш доцільно вибрати метод витягування тіла при проходженні ним границі розділу фаз. В якості тіла витягування найбільш доцільно вибрати кільце, яке забезпечує найбільшу площу меніскової поверхні порівняно з іншими тілами витягування.

Для розроблення удосконаленого методу та пристрою для вимірювання ДПН розчинів, які використовуються як пенетранти при капілярній дефектоскопії необхідно вирішити наступні задачі.

1. Дослідити фізичні процеси, які мають місце при витягуванні кільця і проходженні ним границі розділу фаз.
2. Теоретично обґрунтувати метод витягування кільця без руйнування поверхні розділу фаз для вимірювання поверхневого натягу.
3. Сформулювати вимоги до пристрою для реалізації методу витягування кільця.
4. Розробити функціональну схему пристрою для забезпечення поставлених вимог.
5. Розробити конструкцію окремих блоків та пристрою в цілому.
6. Розробити алгоритм роботи пристрою в автоматичному режимі.
7. Проаналізувати з метрологічної точки зору розроблений пристрій.

2 РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ТА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ПЕНЕТРАНТІВ

Розроблення пристрою передбачає теоретичне обґрунтування вибраного методу витягування кільця для вимірювання РПН і ДПН, визначення вимог до конструкції пристрою і розробку як конструкції пристрою в цілому, так і окремих його елементів. Тому в даному розділі проведено математичне моделювання процесу підняття кільця з поверхні пенетранту, а також розроблено функціональну схему пристрою на основі якої сконструйовані окремі його блоки та описано алгоритм роботи.

2.1 Математичне моделювання процесу підняття кільця

Для теоретичного обґрунтування вимірювання ПН методом кільцевої тензометрії без відриву кільця від досліджуваної поверхні доцільно спочатку проаналізувати характерні положення кільця і меніску на різних стадіях підняття кільця вертикально вгору і проходження через границю розділу фаз. Це полегшить розробку математичної моделі процесу підйому кільця для отримання залежності величини ПН від прикладеної до кільця сили і висоти його підняття.

Для спрощення аналізу допустимо, що розміри посудини з досліджуваною рідиною є набагато більші, ніж розміри кільця. Це дозволяє не враховувати вплив стінок посудини, а також вважати, що горизонтальний рівень поверхні рідини не змінюється в залежності від об'єму зануреної частини кільця і піднятої згодом разом з ним рідини. Спочатку розглянемо випадок, коли кільце повністю змочується рідиною (гідрофільне кільце), тобто кут змочування поверхні кільця близький до нуля (такий кут досягається при виготовленні кільця з платини або її сплаву з іридієм).

В момент дотику кільця з поверхнею рідини відбувається часткове занурення його в рідину за рахунок поверхневих сил і ваги кільця (рис. 2.1. а). Кільце буде утримуватися у відповідному положенні за рахунок прикладеної сили. На поверхні розділу кільце-рідина-повітря утворюються внутрішній (всередині кільця) і зовнішній (зовні кільця) меніски. По мірі піднімання кільця в результаті прикладеної зовнішньої сили рідина переміщується (відступає) по поверхні кільця. Кривизна менісків збільшується, причому форми внутрішнього і зовнішнього менісків будуть неоднаковими (рис.2.1,в). Це пояснюється тим, що рівень рідини всередині і в центрі кільця вищий від рівня незбуреної рідини зовні кільця, оскільки радіус кільця менший від радіуса посудини з досліджуваною рідиною. При підйомі кільця зростає об'єм піднятої ним рідини. При певному значенні висоти підняття об'єм піднятої рідини досягає максимального значення. Кільце при цьому ще не відірване від поверхні, тобто перебуває в стані рівноваги (рис.2.1.г). В цьому положенні досягне максимуму і прикладена сила, що є пропорційною об'єму піднятої рідини. При подальшому русі кільця вгору піднятий ним об'єм рідини буде зменшуватися, оскільки внутрішній і зовнішній меніски наближаються один до одного (рис.2.1.д). Кільце буде знаходитися в стані нестабільної рівноваги. Подальше незначне піднімання приведе до розриву тонкого перешийку між менісками і до відриву кільця від поверхні.

На відміну від гідрофільного, кут змочування поверхні гідрофобного кільця знаходиться в межах $90^\circ < \Theta < 180^\circ$. Так, для поліетиленового або тефлонового кільця $\Theta = 105^\circ$. Таке кільце на першій стадії його підняття занурюється в рідину меншою частиною свого об'єму, ніж гідрофільне кільце з утворенням внутрішнього і зовнішнього менісків. При подальшому піднятті кільця лінії контакту менісків з його поверхнею наближаються один до одного і з'єднуються між собою. Відрив гідрофобного кільця від поверхні настає на значно меншій висоті, ніж відрив гідрофільного кільця. Тому при використанні гідрофобного кільця доцільно вимірювати силу, прикладену до кільця при його витягуванні з

більш легкої фази у більш важчу (наприклад, з нафти у воду), тобто зверху-вниз.

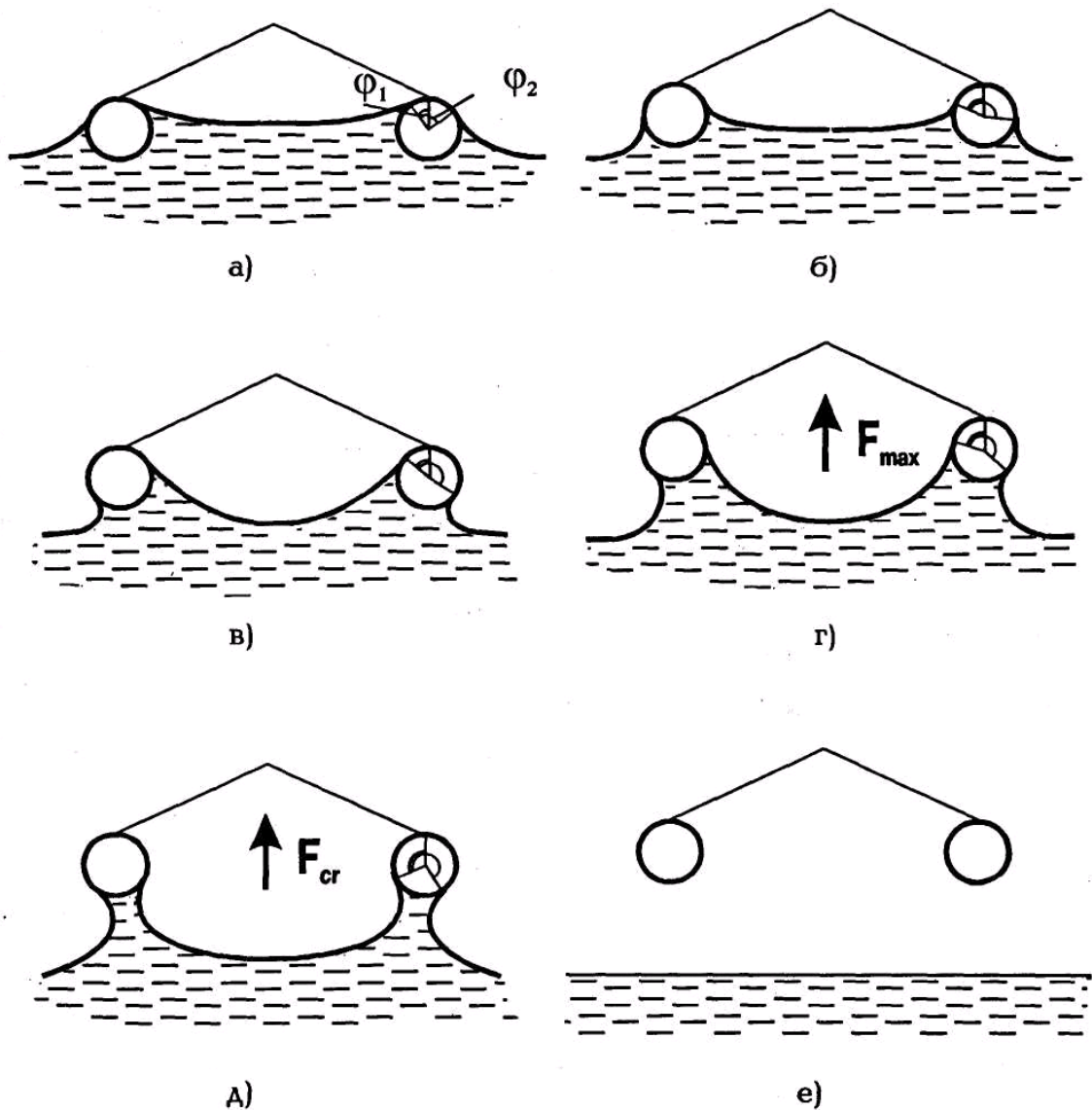


Рисунок 2.1- Профіль гідрофільного кільця з менісками на різних стадіях його підняття

Для розробки математичної моделі необхідно проаналізувати всі складові сили, які діють на кільце з боку рідини з моменту його дотику до досліджуваної поверхні. Максимум сили при витягуванні кільця (до руйнування меніска) зумовлений різним характером зміни її компонент в процесі підняття. Зовнішня сила, яка прикладена до кільця для його

підйому, направлена вертикально вгору, тому саме вертикальні складові сили, прикладені до кільця з боку рідини, разом із вагою кільця, протидіють цьому підйомові і в сукупності рівні за величиною, але протилежні за знаком зовнішній силі. Оскільки утворюються внутрішній і зовнішній меніски, то і складові сили розглядатимуться окремо для кожного меніска. Згідно з рис.1.9 всі величини з індексом“1” відносяться до внутрішнього, а з індексом “2”- до зовнішнього меніска. Всі параметри, які відносяться до точок контакту менісків з поверхнею кільця, позначатимуться з індексом “с”.

Розробка математичної моделі передбачає поетапне вирішення таких основних задач:

- математичний опис конфігурацій внутрішнього і зовнішнього менісків;
- визначення координат ліній контакту рідини з поверхнею кільця;
- визначення залежності об'єму піднятої кільцем рідини від положення кільця;
- визначення з наперед заданою точністю максимального об'єму рідини, а, значить, і максимального значення прикладеної сили і відповідного їй положення кільця;
- отримання залежності $a^2 = f(V, h)$

Математична модель внутрішнього і зовнішнього контурів розділу фаз може бути отриманою на основі рівняння Юнга-Лапласа [4] для визначення перепаду тиску через поверхню в будь якій її точці (точка С на рис. 1.9):

$$\Delta P_c = P_\beta - P_\alpha = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.1)$$

де P_β, P_α - величини тисків у верхній і нижній фазах в точці С; R_1, R_2 - основні радіуси кривизни поверхні розділу в даній точці у взаємоперпендикулярних січеннях.

Як видно з рис.1.9, ці радіуси можуть бути визначені геометрично таким чином:

$$R_1 = \frac{dS}{d\psi}, \quad R_2 = \frac{x}{\sin \psi}, \quad (2.2)$$

де ψ - кут, утворений дотичною до поверхні розділу в певній точці і позитивним напрямком осі x .

Для уникнення складних перетворень в рівняннях при співставленні різних розмірних величин слід скласти рівняння в безрозмірній формі. Для цього, скориставшись капілярною сталою, введемо такі безрозмірні величини:

$$x^* = \frac{x}{a}, \quad z^* = \frac{z}{a}, \quad S^* = \frac{S}{a}, \quad R^* = \frac{R}{a}, \quad r^* = \frac{r}{a}. \quad (2.3)$$

Тоді рівняння (2. 1) з врахуванням (2.2) і (2.3) матиме такий вигляд:

$$\frac{d\psi}{dS^*} = z^* - \frac{\sin \psi}{x^*} \quad (2.4)$$

Користуючись простими геометричними викладками (рис.1.9), можна знайти таку залежність між координатами точок поверхні та її кривизною:

$$\frac{dx^*}{dS^*} = \cos \psi, \quad \frac{dz^*}{dS^*} = \sin \psi \quad (2.5)$$

Система рівнянь (2.4), (2.5) описує внутрішній і зовнішній профілі поверхні розділу фаз. Однак, для випадку зовнішнього профілю необхідно врахувати від'ємний радіус кривизни R_2 і протилежний, в порівнянні з внутрішнім профілем, напрямок інтегрування диференційного рівняння (2.4) (для внутрішнього профілю від осі симетрії до поверхні кільця, для зовнішнього від кільця до рівня незбуреної поверхні). Тому для зовнішнього профілю в рівняння (2.4) необхідно ввести від'ємну початкову кривизну K^* :

$$\frac{d\psi}{dS^*} = -K^* + z^* - \frac{\sin \psi}{x^*}. \quad (2.6)$$

Безрозмірний об'єм $V^* = \frac{V}{a^3}$, утворений обертанням навколо осі симетрії кривої профілю розділу фаз в диференційній формі можна подати таким чином:

$$\frac{dV^*}{dS^*} = \pi x^{*2} \sin \psi. \quad (2.7)$$

Безрозмірну площу $S_m^* = \frac{S_m}{a^2}$ меніскової поверхні можна знайти з рівняння

$$S_m^* = 2\pi x^* . \quad (2.8)$$

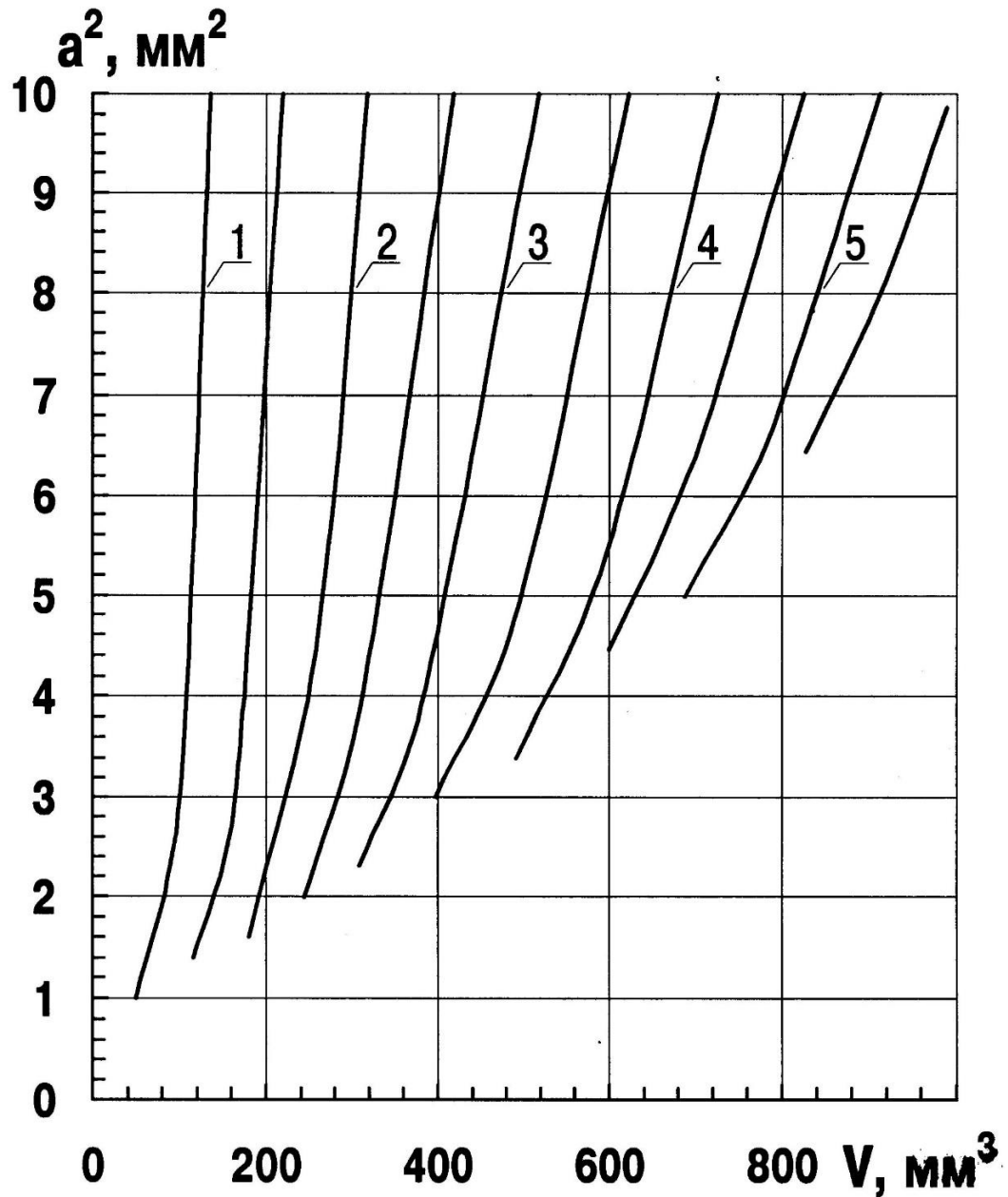
Розрахунок сили, прикладеної до кільця, можна проводити шляхом визначення об'єму піднятої кільцем рідини, оскільки при відомій питомій густині пенетранту можна відразу ж визначити силу тяжіння піднятої рідини. Об'єм рідини визначається за розрахованими координатами точок дотику внутрішнього і зовнішнього менісків з поверхнею кільця і з рівнем незбуреної поверхні рідини при різних значеннях висоти підняття кільця. Даний об'єм можна розкласти на об'єми простих фігур обертання.

Пошук з заданою точністю об'єму піднятої кільцем рідини доцільно проводити підбором різних значень z_i^* - висоти внутрішнього меніска на осі обертання і φ_2 - кута контакту зовнішнього меніска з поверхнею кільця. Диференціальні рівняння, що описують внутрішній і зовнішній меніски, доцільно розв'язувати числовим інтегруванням за методом Рунге-Кутта-Мерсона, що забезпечує високу точність розв'язку. В результаті розрахунку об'єму піднятої кільцем рідини, який наведений в [4] були встановлені залежності капілярної сталої a^2 для різних теоретичних рідин від величини об'єму V піднятої кільцем рідини, при різних значеннях висоти h підняття кільця.

Як видно з рис. 2.2, де графічно подані отримані залежності, криві $a^2 = f(V)$ для різних значень h не перетинаються між собою і монотонно зростають. Це вказує на можливість однозначного визначення a^2 за відомими V та h . Тому можна записати функціональну залежність між величиною поверхневого натягу, об'ємом піднятої кільцем рідини та різницею питомих ваг пенетранту і повітря у вигляді регресійного рівняння третього степеня:

$$\sigma = (A + BV + CV^2 + DV^3)\Delta\gamma , \quad (2.9)$$

де $\Delta\gamma$ - різниця питомих ваг рідини та газу, поверхня розділу яких досліджується.



1 - висота підняття кільця $h=0,25$ мм; 2 - висота підняття кільця $h=1,0$ мм; 3 - висота підняття кільця $h=1,8$ мм; 4 - висота підняття кільця $h=2,6$ мм; 5 - висота підняття кільця $h=3.4$ мм

Рисунок 2.2-Залежність капілярної сталої від об'єму піднятої рідини для різних значень висоти підняття кільця:

Отже, дане рівняння теоретично обґрунтовує метод [4], згідно з яким за вимірним значенням об'єму піднятої кільцем рідини при його витягуванні з неї і заданій висоті його підняття до досягнення

максимального об'єму і до відриву від поверхні розраховується величина ПН рідини при відомій різниці питомих ваг контактуючих фаз.

2.2 Конструювання удосконаленого пристрою для вимірювання поверхневого натягу пенетрантів

Отримані в попередньому підрозділі теоретичні залежності ПН від прикладеної до кільця сили і висоти його підняття можуть бути реалізовані в пристрої для вимірювання динамічного (змінного в часі) і рівноважного поверхневих натягів (скорочено ДПН і РПН) пенетрантів методом кільця. Розробку такого пристрою доцільно здійснити керуючись основними вимогами, що пред'являються до приладів даного типу.

2.2.1 Основні технічні вимоги до конструкції пристрою

Виготовлення приладу не повинно бути пов'язане з великими економічними затратами.

Специфічні вимоги, що стосуються безпосередньо методу кільця, визначаються в найбільшій мірі особливостями дотримання геометричних розмірів вимірювального вузла, оскільки при проведенні вимірювання необхідно дотримуватися таких правил:

- кільце повинно знаходитись в строго горизонтальній площині;
- посудина з досліджуваною рідиною повинна бути достатньо широкою, щоб кривизна вільної поверхні в посудині не впливала на форму поверхні, яку піднімає кільце:
 - поверхня рідини повинна бути захищена від випаровування, забруднення і охолодження:
 - кільце в процесі вимірювання не повинно зміщуватися, за виключенням повільного руху вгору.

З врахуванням всіх вищевказаних вимог можна сформулювати такі характерні особливості, яких необхідно дотримуватися при розробці приладу.

Для забезпечення високої точності вимірювання необхідно передбачити можливість запобігання впливу зміни температури оточуючого середовища і електричної напруги живлення на результати вимірювання.

Електричне живлення приладу повинно здійснюватися від мережі змінного струму напругою 220_{-33}^{+22} В і частотою 50 ± 1 Гц.

Діапазон вимірювання ПН повинен складати від 10 до 100 мН/м.

Управління всім процесом вимірювання, а також розрахунок ПН за закладеними теоретичними залежностями повинні здійснюватися за допомогою ЕОМ з висвітленням на екрані дисплея всіх команд і результатів вимірювання. Програма для роботи приладу повинна забезпечувати можливість покрокового ручного контролю за роботою пристрою.

Елементи пристрою, які контактують з досліджуваними рідинами, повинні бути виконані із корозійностійких матеріалів і їх конструкція повинна забезпечувати можливість легкого доступу до них для промивання і очищення.

Пристрій повинен давати можливість вимірювати ДПН і РПН пенетрантів, а також досліджувати залежність вимірюваного ПН від температури.

2.2.2 Розроблення і обґрунтування функціональної схеми пристрою

Виходячи із викладених в попередньому підрозділі вимог, розроблений пристрій (умовно названий ВПН-1 – вимірювач поверхневого натягу), функціональна схема якого подана на рис. 2.3. Основними вузлами пристрою є: 1 - вузол прецизійного переміщення посудини з досліджуваною рідиною; 2 - вузол вимірювання прикладеної до кільця

сили; 3 - вузол розрахунку ПН за отриманими залежностями; 4 - блок живлення приладу.

У вузол 1 входить чотириобмотковий кроковий двигун КД, який через передавальний механізм ПМ дискретно переміщує вгору-вниз столик С, що на ньому розміщена посудина П з досліджуваною рідиною. Робота двигуна керується ЕОМ через блок управління двигуном БУД почерговою подачею на його обмотки імпульсів напруги 5В, сили струму 1А і довжиною близько 10мс. Застосований в пристрої кроковий двигун при подачі одного імпульса на відповідну обмотку дає можливість отримати мінімальний кут обертання на його валу рівний 108 кутових хвилин.

Блок БУД по команді ЕОМ здійснює перемикання обмоток двигуна для його вмикання, реверсу чи зупинки, а також запобігає проходженню в інші блоки приладу імпульсних перешкод внаслідок роботи сильно струмових обмоток двигуна. ПМ призначений для передачі обертового руху валу двигуна в поступальний рух столика (при оберті валу на 360° столик переміщується на 0,5 мм). Давач нульового положення ДНП, що є, по суті, кнопковим вимикачем, призначений для подачі на ЕОМ сигналу про те, що столик з посудиною знаходиться в крайньому нижньому положенні.

Вузол 2 складається із модифікованого давача тиску МДТ, сигнал з якого через підсилювач П подається на аналого-цифровий перетворювач АЦП.

Давач МДТ створений на базі давача перепаду тиску і є, по суті, електровагою, призначеною для вимірювання прикладеного до кільця зусилля. Чутливим елементом МДТ є ввімкнений у мостову схему тензорезистор. Нитка підвісу кільця К жорстко з'єднана зі штоком (скляною балкою) датчика тиску, напружений стан якого вимірюється тензорезистором.

Ввід в ЕОМ інформації про прикладену силу здійснюється в цифровій формі. Тому АЦП перетворює постійну напругу, величина якої еквівалентна прикладеному зусиллю, в двійковий код.

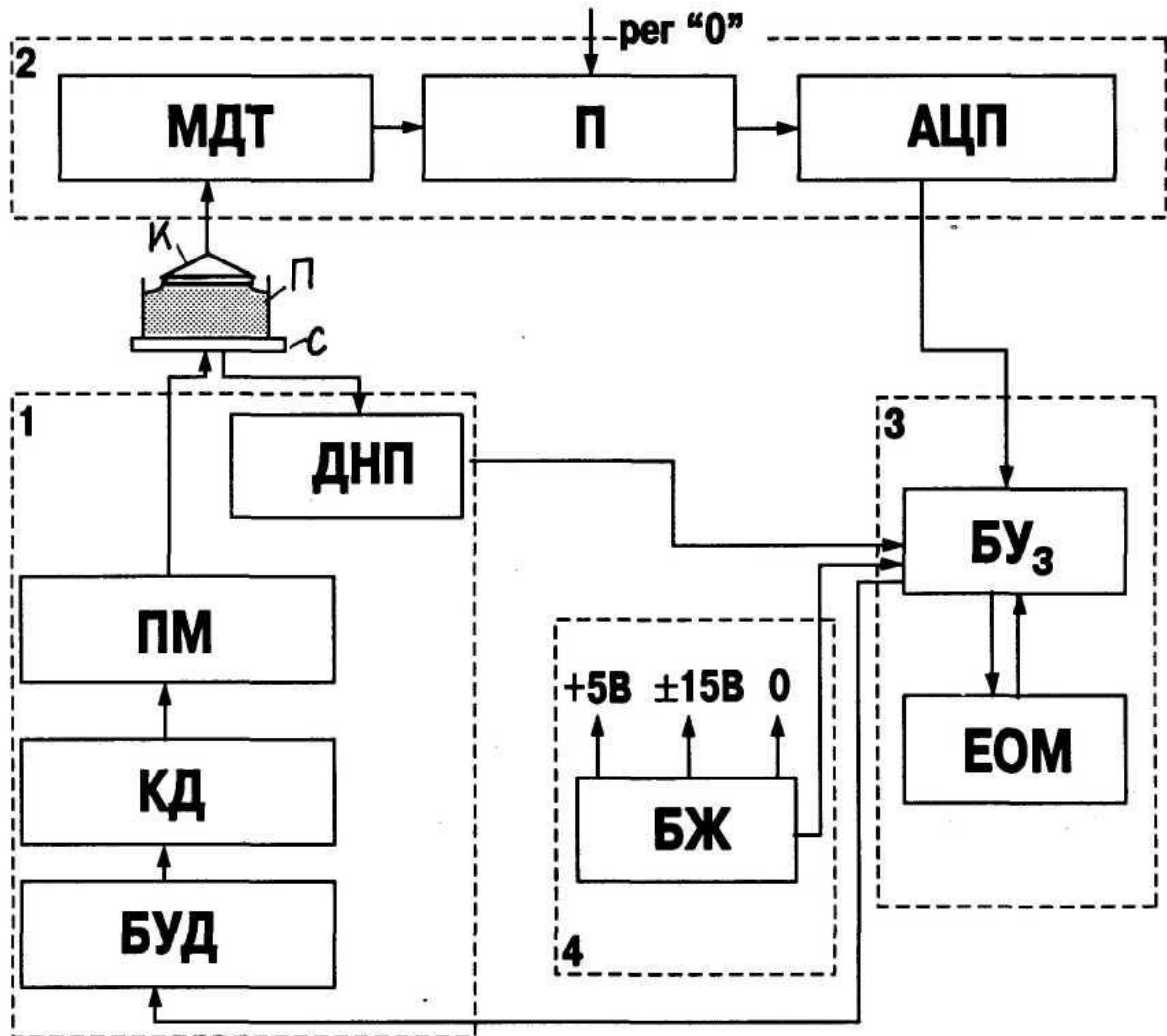


Рисунок 2.3 - Функціональна блок-схема пристрою ВПН-1

При цьому значення напруги паралельно висвічується на цифровому чотирирозрядному табло. Живиться пристрій від мережі напругою 220_{-33}^{+22} В і частотою 50 ± 1 Гц.

Оскільки стандартною напругою, яка перетворюється в АЦП в код, є 1 В, то для підсилення сигналу з МДТ, що змінюється в межах декількох мВ, використано високолінійний підсилювач з коефіцієнтом підсилення від 1000 до 5000.

Вузол 3 - це персональна ЕОМ з блоком узгодження БУЗ. ЕОМ призначена для керування всією роботою приладу, а також для розрахунку ПН за закладеними в її пам'ять теоретичними залежностями $a^2 = f(V, h)$ при надходженні інформації про висоту кільця і виміряну силу. блок БУЗ

призначений для забезпечення двостороннього зв'язку між ЕОМ та іншими блоками приладу. Він дозволяє комутувати сигнали від різних джерел і передавати їх по восьмибітному каналі вводу, узгоджує рівні всіх сигналів з прийнятими в ЕОМ, здійснює буферизацію шини даних.

Спеціально розроблений універсальний блок живлення БЖ (вузол 4) призначений для живлення всіх блоків приладу, що потребують низьких значень постійної напруги (+5В; ± 15 В).

Конструктивно пристрій виконаний у вигляді трьох окремих, кабельно з'єднаних між собою, модулів: вимірювального електромеханічного 1, електричного 2 та ЕОМ 3.

Управління всім процесом вимірювання ПН здійснюється за допомогою ЕОМ за закладеною в її пам'ять програмою. Значення густини досліджуваної рідини, а також всі необхідні команди про початок і кінець вимірювання вводяться через клавіатуру. На екрані монітора висвічується інформація про хід виконання програми, а також результати вимірювання і час існування поверхні розділу фаз.

2.3 Розроблення конструкції окремих вузлів пристрою

У вимірювальному електромеханічному модулі 1 відбувається переміщення посудини з досліджуваною рідиною на задану висоту та вимірювання прикладеної до кільця сили. Конструктивно модуль виконано у циліндричній формі (МР.МТТм-11.00.00.000 СК) і вага його досягає 3 кг. Він складається з крокового двигуна 1, закріпленого на масивній основі 2. Обертний момент з валу двигуна через муфтове з'єднання 3 типу "квадрат" передається на гайку гвинтового з'єднання 4 з малим кроком різьби, де перетворюється в поступальний рух штока 5. Кулька 6 кінематично зв'язує шток 5 з плунжером 7, що рухається в направляючих 8, і жорстко з'єднаний зі столиком 9, на якому розташовується посудина 10 з досліджуваною рідиною. Посудина знаходиться в термостаційному циліндрі 11, до якого під'єднана циркуляційна система рідинного

термостата. Штирі 12, що кріпляться в основі крокового двигуна і втулках 13, надають стійкість конструкції, а також зменшують осьове навантаження на вал двигуна. На платформі 14, закріпленій на трьох штирях 15, розміщені давач 16, що вимірює прикладене до кільця 17 зусилля, а також підсилювач вихідного сигналу давача 18. Безпосередня близькість датчика і підсилювача дозволяє різко зменшити паразитні струми наводки в з'єднювальних провідниках. Корпус 19 з термоізоляційною підкладкою захищає вимірювальний модуль від впливів вібрації і змін температури навколишнього середовища. На корпус виведено гвинт 20 для корекції "0" підсилювача. Закріплення втулок 13 і платформи 14 відповідно на штирях 12 і 15 через різьбові з'єднання дає можливість регулювати за допомогою нівеліра горизонтальність столика 11 і давача 16 для усунення похибки, викликані негоризонтальністю площини кільця по відношенню до поверхні рідини.

2.4 Опис режимів роботи пристрою

Робота пристрою передбачається в двох режимах: настроювання і безпосереднього вимірювання. Пристрій працює за закладеною в пам'ять ЕОМ програмою, наведеною в додатку А, блок-схема програми подана на рис.2.4. Програма реалізована на мові Paskal. В ЕОМ введені також залежності $a^2 = (V, h)$.

Перед проведенням вимірювання ПН кожної нової рідини необхідно з клавіатури ЕОМ ввести значення попередньо виміряних питомих ваг середовищ, поверхня розділу яких досліджується.

В режимі настроювання столик з посудиною відводиться в крайнє нижнє положення до спрацювання кнопкового вимикача (давача нульового положення), який подає відповідний сигнал на ЕОМ (блок 3). Настроювання пристрою, яке необхідно проводити кожен раз перед початком вимірювання у зв'язку з великою чутливістю модифікованого

давача тиску до температури навколишнього середовища, передбачає визначення коефіцієнтів b і b_0 лінійної залежності:

$$U = bP + b_0, \quad (2.10)$$

де U - вихідна напруга модифікованого датчика тиску; P - навантаження, прикладене до підвішеного кільця.

Величина вихідної напруги (вже підсиленої і перетвореної в двійковий код висвічується на табло електронного блоку і на екрані монітора. Неідентичність показів на табло і на екрані свідчить про збої в програмі ЕОМ або про поломку АЦП. Налаштування проводиться по двох контрольних точках: при мінімальному навантаженні, коли кільце, вага P_k якого заздалегідь відома, не зазнає ніякого додаткового зусилля, і при близькому до максимального навантаженні, коли до кільця підвішується тягарець вагою $P_m = 7 \cdot 10^{-3}$ Н, що є близькою до максимальної ваги піднятої рідини, якщо капілярна стала останньої наближено рівна 7 мм² (блок 4).

За виміряними при цьому відповідними значеннями напруг U_k, U_m визначаються коефіцієнти b і b_0 за формулами :

$$b = \frac{U_k - U_m}{P_k - P_m}, \quad (2.11)$$

$$b_0 = U_m - bP_m, \quad (2.12)$$

Після проведення налаштування пристрій переходить в режим вимірювання.

Натискуванням клавіші "Enter" на клавіатурі ЕОМ розпочинається підйом посудини. Переміщення посудини здійснюється покроково подачею імпульсів з ЕОМ на блок управління двигуном (один імпульс відповідає переміщенню в 0,5/256 мм). ЕОМ в цей час контролює рівень сигналу з МДТ (блок 6).

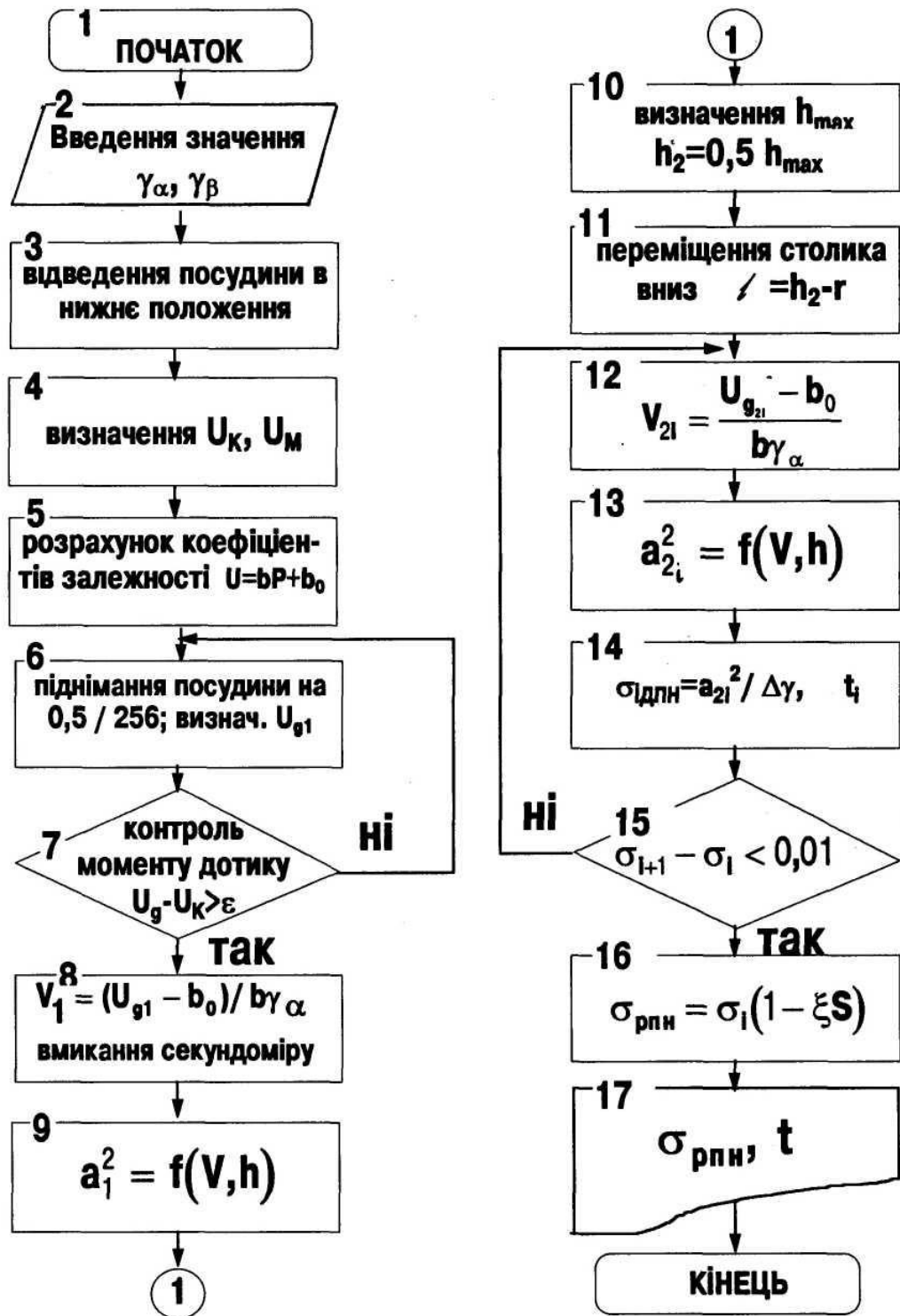


Рисунок 2.4- Алгоритм роботи приладу ВПН-1

В момент дотику кільця з досліджуваною поверхнею під дією сил поверхневого натягу і в результаті утворення менісків всередині і зовні кільця сигнал на виході МДТ стрибкоподібно зростає. Подача імпульсів з ЕОМ припиняється, і столик з посудиною перестає рухатися (блок 7). Слід

врахувати, що в момент дотику висота кільця, яка відлічується від центра кільця до поверхні рідини, рівна величині радіуса дроту, з якого виготовлене кільце ($h_1 = r$). В момент зупинки двигуна на ЕОМ вмикається відлік часу і значення часу існування поверхні розділу фаз висвічується на моніторі. На цій першій висоті розраховується об'єм піднятої кільцем рідини за формулою (блок 8):

$$V_1 = \frac{U_s - b_0}{b\gamma_\alpha}, \quad (2.13)$$

де $\gamma_\alpha = \rho_\alpha g$ - питома вага досліджуваної рідини.

Визначається наближене значення капілярної сталої за закладеними в пам'ять ЕОМ залежностями $a = f(V, h)$ (блок 9). Для цього значення a за даними залежностями визначається висота кільця h при максимальному об'ємі піднятої рідини V_{\max} (блок 10). Розраховується висота кільця h_2 , що становить 50% від максимальної висоти h , тому на ній ще не відбувається відрив кільця (блок 11)

$$h_2 = 0,5h_{(\max)}. \quad (2.14)$$

Після цього посудина опускається на висоту h_2 , пройшовши відстань $l = h_2 - r$. Знову вимірюється об'єм піднятої рідини V_2 (блок 12). На даній висоті за залежностями $a^2 = f(V, h)$ визначається уточнене значення капілярної сталої a^2 для конкретних значень V_2 , h_2 і розраховується величина ПН за формулою (блок 13):

$$\sigma = \frac{a^2}{\gamma_\alpha - \gamma_\beta}. \quad (2.15)$$

На цій же висоті з інтервалом Δt проводиться визначення об'єму піднятої рідини і розраховується динамічний поверхневий натяг, значення якого, а також час існування поверхні розділу фаз висвічуються на екрані (блок 14). Розрахунок ДПН повторюється до тих пір, поки два останніх значення не будуть відрізнятися на достатньо малу наперед введenu величину $\varepsilon = 0,01$, яка буде визначати точність знаходження РПН (блок 15).

Для розрахованого значення РПН вводиться поправка для врахування зміни площі меніскової поверхні ξ_s , згідно з формулою [дисертація]:

$$\xi_S = \frac{S_M}{S_B}, \quad (2.16)$$

де S_M - площа меніска утвореного кільцем;

S_B - площа вільної поверхні рідини.

Скоректоване значення РПН і час існування поверхні висвічуються на екрані (блок 17).

Висновок до розділу

Проведено математичне моделювання процесу витягування кільця з поверхні розділу фаз пенетрант-повітря, на основі якого розроблено удосконалений метод вимірювання поверхневого натягу пенетрантів без руйнування границі розділу фаз. Розроблено конструкцію пристрою, який реалізує удосконалений метод. Розроблене програмне забезпечення роботи пристрою в автоматизованому режимі.

3 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ КІЛЬЦЯ БЕЗ РУЙНУВАННЯ ПОВЕРХНІ РОЗДІЛУ ФАЗ

Аналіз метрологічних характеристик здійснюється з метою визначення похибки пристрою і встановлення його класу точності. Аттестувати розроблений пристрій шляхом порівняння з результатами вимірювання приладом вищого класу точності неможливо по причині відсутності останнього. Тому для метрологічних досліджень використаний метод структурного аналізу, що полягає в розкладанні сумарної похибки на окремі складові, які визначаються аналітично або експериментально.

3.1 Загальний метрологічний аналіз

Необхідно відмітити, що вимірювання поверхневого натягу за допомогою пристрою ВПН є непрямим методом вимірювання. При цьому похибки вимірювання прикладеного до кільця зусилля і висоти підняття кільця (двох основних вимірюваних величин, на основі яких проводиться подальший розрахунок ПН), є некорельованими.

Основними факторами, що впливають на сумарну похибку вимірювання поверхневого натягу пристроєм ВПН є:

- похибка перетворення прикладеного до кільця зусилля (ваги піднятої рідини) в електричний сигнал ΔP_{pid} , що складається з похибок давача Δ_d , підсилювача Δ_n і аналого-цифрового перетворювача $\Delta_{АЦП}$;

- похибка задавання висоти кільця над рівнем незбуреної рідини, що складається з похибки визначення нульового рівня рідини Δh_0 , зумовленої нестабільністю поверхні внаслідок роботи двигуна та похибки, викликані наявністю "мертвого ходу" крокового двигуна з передавальним механізмом Δh ;

- похибка вимірювання питомих ваг рідини і повітря $\Delta \gamma_\alpha, \Delta \gamma_\beta$;

- похибка, зумовлена нахилом кільця $\Delta \alpha$;

- похибка від зміни площі меніскової поверхні $\Delta S_{мен}$;
- похибка відхилення дійсних розмірів кільця від теоретично заданих $\Delta R, \Delta r$;
- похибка, зумовлена відхиленням від 0 кута змочування поверхні кільця $\Delta \Theta$;
- похибка від впливу стінки посудини з рідиною $\Delta R_{нос}$;
- методична похибка розрахунків δ_p .

В результаті аналізу складових сумарної похибки розроблена схема нагромадження похибок, наведена на рис. 3.1. Дана схема дає лиш загальне уявлення про можливі джерела похибок. Для визначення їх числових значень необхідно в процесі метрологічних досліджень виявити природу і знайти значення кожної окремої складової, встановити можливість і доцільність введення поправок на систематичні похибки, а також встановити закон розподілу випадкових складових. При цьому необхідно враховувати взаємнокореляційні зв'язки різних складових.

Найбільш доцільно для кожної складової похибки спочатку знайти її середнє квадратичне відхилення (СКВ) δ_i .

Основною перевагою СКВ є те, що незалежно від різноманітності законів розподілу кожної із n некорельованих складових по їхніх СКВ δ_i можна знайти значення СКВ сумарної похибки за формулою:

$$\delta_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 . \quad (3.1)$$

Так розраховуються корельовані складові похибок, тобто такі, які викликаються однією і тією ж причиною і додаються алгебраїчно.

За залежністю величини похибки від значення вхідної величини всі складові розділяються на адитивні і мультиплікативні. Для визначення СКВ при нульовому значенні вхідної величини додаються лиш адитивні складові, а при граничному значенні (вкінці діапазону) - всі складові.

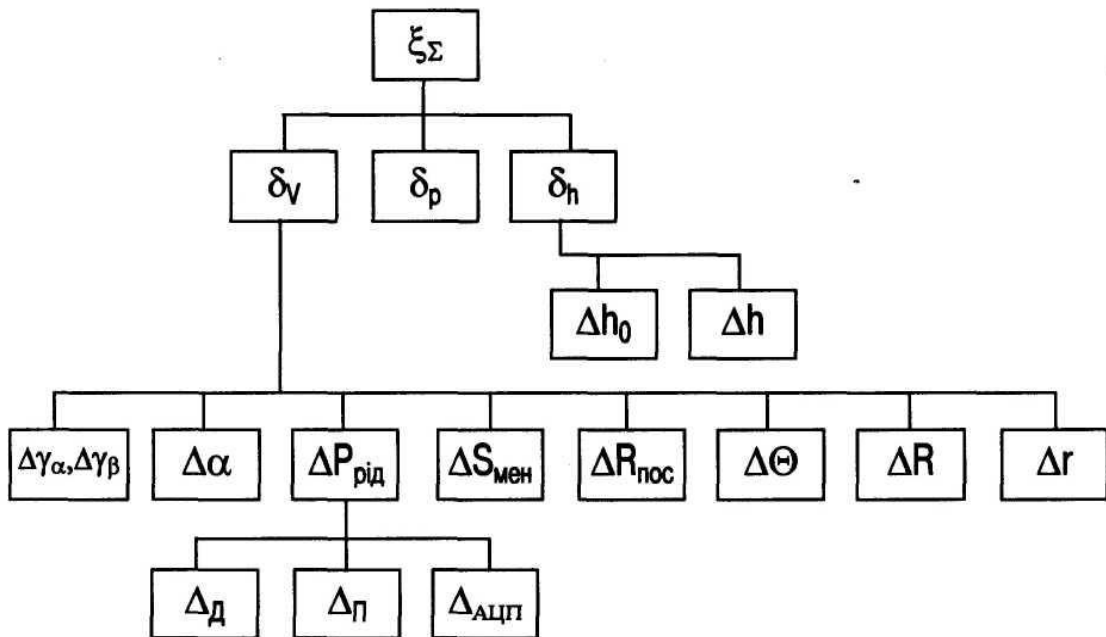


Рисунок 3.1 - Узагальнена схема нагромадження похибок пристрою
ВПН-1

Величина сумарної похибки результату вимірювання виражається або через інтервал довіри або через ентропійний інтервал (інтервал невизначеності). Основна перевага ентропійного інтервалу в порівнянні з інтервалом довіри є та, що величина першого може бути строго математично вирахована для будь-якого закону розподілу на відміну від необхідності довільно (вольовим рішенням) приймати значення ймовірності попадання результату в заданий інтервал при визначенні інтервалу довіри. Значення зведеної сумарної похибки може бути однозначно знайдене через розраховане значення СКВ при визначеному законі розподілу сумарної похибки:

$$\xi_{\Sigma} = k_e \delta_{\Sigma}, \quad (3.2)$$

де k_e - ентропійний коефіцієнт, значення якого для різних законів розподілу подано в [12].

Значення довірчої ймовірності P_e при якому ентропійне і довірче значення похибки співпадають, знаходиться за формулою [15]:

$$P_e = 0,899 + \frac{0,1818}{\varepsilon}, \quad (3.3)$$

де ε - коефіцієнт ексцеса, який залежить від виду закону розподілу

3.2. Дослідження окремих складових похибки пристрою

Як видно з рис. 3.1, складовими частинами каналу вимірювання ваги піднятої рідини є модифікований датчик тиску МДТ, підсилювач П і аналого-цифровий перетворювач АЦП. Необхідні вихідні дані для проведення теоретичних розрахунків похибки були отримані в ході експериментальних досліджень даного каналу. Для імітації ваги піднятої рідини до кільця підвішувались тягарці різних номіналів від 10 до 1000 мг. При цьому по табло АЦП зчитувались відповідні їм значення вихідної напруги.

Давач МДТ створений на базі напівпровідникового перетворювача тиску ПДП-1000МА. Основна зведена похибка датчика нормована по паспорту максимальним значенням $\xi_D = 0,5\%$. Для того, щоб від цього значення перейти до СКВ, потрібно знати вид закону розподілу похибки. Основу цієї похибки складає похибка від нелінійності перетворення вхідної величини (прикладеного до кільця зусилля, тобто ваги піднятої рідини) у вихідну напругу. Як вказано в [14], похибкам від нелінійності статичної характеристики первинних перетворювачів тиску властивий нормальний закон розподілу, для якого ентропійний коефіцієнт $k_e = 2,07$:

$$\delta_D = \frac{\xi_D}{k_{en}} = \frac{0,5}{2,07} = 0,24\%. \quad (3.4)$$

Температурна похибка датчика в його паспорті не вказана, оскільки у самого датчика тиску вона відсутня. Однак в процесі модифікації датчика, тобто зміні його конструкції з метою використання як датчика ваги була

знята частина його корпусу разом з мембраною, що сприймає вхідний тиск. Це дозволило з'єднати нитку підвісу кільця зі скляним штоком, який передавав деформацію мембрани на тензорезистор, що ввімкнений в мостову схему. Тому без частини корпусу датчик став більш чутливішим до зміни температури навколишнього середовища, в зв'язку з чим перед початком кожного вимірювання проводиться його настройка. Як показали дослідження максимальне значення зведеної похибки досягається при 24°C і рівне $\xi_{dT} = 0,5\%$. Закон розподілу температурної похибки датчика повторює закон розподілу температури в лабораторії, де експлуатується прилад ВПН. Як сказано в [11], закон розподілу температури в лабораторії в межах від 18 до 24°C можна вважати нормальним з середнім значенням 21°C. Тому СКВ даної похибки буде рівним:

$$\delta_{dT} = \frac{\xi_{dT}}{k_{en}} = \frac{0,5}{2,07} = 0,24\%. \quad (3.4)$$

Похибка датчика від коливань напруги живлення є чисто мультиплікативною, на відміну від двох розглянутих вище складових похибки датчика, що є адитивними. Датчик живиться напругою +5 В від універсального блока живлення (рис.3.2) з нестабільністю напруги +0,1%. Тому максимальна зведена похибка датчика від коливань напруги рівна $\xi_{DU} = 0,1\%$. Закон розподілу даної похибки є близький до трикутного, як і закон розподілу нестабільності напруги мережі 220 В, 50 Гц. СКВ для трикутного розподілу:

$$\delta_{DU} = \frac{\xi_{DU}}{k_{eT}} = \frac{0,1}{\sqrt{6}} = 0,0415\%. \quad (3.5)$$

Похибка зміщення нуля підсилювача при коливаннях температури в лабораторії є адитивною, а закон її розподілу вважається нормальним, як і для температурної похибки датчика. Термоізоляційна підкладка корпусу 19 (див. рис. 3.4), в якому розміщені датчик і підсилювач, дозволяє різко зменшити величину цієї похибки до максимального значення $\xi_{IT} = 0,15\%$. Тоді СКВ буде рівним:

$$\delta_{\text{ПТ}} = \frac{\xi_{\text{ПТ}}}{k_{\text{ен}}} = \frac{0,15}{2,07} = 0,073\%. \quad (3.6)$$

Похибка, яка виникає від наводки паразитних струмів в з'єднувальних провідниках, є адитивно-мультиплікативною. Оскільки датчик і підсилювач знаходяться в безпосередній близькості один від одного, то доцільно розглянути тільки наводку в провідниках між підсилювачем і АЦП, котрі розміщені в різних модулях. При максимальному сигналі з підсилювача, рівному 4,0 В, падіння напруги від наводки паразитних струмів, виміряне при допомозі електронного вольтметра, не перевищує 0,2 мВ. Тому зведена максимальна похибка від наводки паразитних струмів рівна:

$$\xi_{\text{нав}} = \frac{0,2}{4000} = 5 \cdot 10^{-5} \%$$

Закон розподілу даної похибки - арксинусоїдальний. Скв рівне:

$$\delta_{\text{нав}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{k_{\text{еаар}}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,11} = 4,5 \cdot 10^{-5} \%. \quad (3.7)$$

Похибка коефіцієнта підсилення підсилювача є мультиплікативною і розподілена по трикутному закону, так як викликається коливаннями напруги живлення. Її максимальне зведене значення досягає $\xi_{\text{ПУ}} = 0,2\%$, а СКВ

$$\delta_{\text{ПУ}} = \frac{\xi_{\text{ПУ}}}{k_{\text{еТ}}} = \frac{0,2}{\sqrt{6}} = 0,082\%. \quad (3.8)$$

Похибка стандартного аналого-цифрового перетворювача нормована двочленною формулою:

$$\pm [0,1 + 0,06 \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right)], \quad (3.9)$$

де X_k - границя вимірювання.

Однак, в даному цифровому приладі з діапазоном вимірювань від 0 до 10В використовується лиш частина цього діапазону від 0 до 4 В. Особливість розрахунку похибки в даному випадку полягає в тому, що зведене значення похибки повинно розраховуватися для границі вимірювання саме $X_{\text{кАЦП}}=4\text{В}$, в той час як зведена похибка цифрового

вольтметра дана для границі вимірювання $X_{кВ} = 10$ В. Тому необхідно вирахувати абсолютну похибку вольтметра в точках початку і кінця цього діапазону і віднести до його кінця. Абсолютна похибка на початку шкали рівна:

$$\Delta_{0АЦП} = \frac{0,04}{100} X_{кВ} = 0,004В, \quad (3.10)$$

а її значення, зведене до границі вимірювань $X_{кАЦП}$, даного каналу:

$$\xi_{почАЦП} = \frac{0,004}{4} = 0,1\%$$

Абсолютна похибка кінця шкали каналу

$$\Delta_{кінАЦП} = \Delta_{0АЦП} + \frac{0,1 - 0,04}{100} \cdot 4 = 0,0064В, \quad (3.11)$$

а її значення, зведене до границь вимірювання каналу:

$$\xi_{кінАЦП} = \frac{0,0064}{4} = 0,16\%$$

Для переходу від максимальної похибки АЦП до СКВ необхідно знання закону розподілу цієї похибки. Як сказано в [11], цей розподіл є композицією рівномірного розподілу похибки квантування і дуже полого спадного експоненціального розподілу суми похибок нуля-органу, аналогових вузлів і розкидів окремих ступенів кодууючої сітки. Дисперсію експоненціальної складової можна в середньому прийняти 8% або 1/13 загальної дисперсії. Тому якщо узагальнено прийняти тільки рівномірний закон розподілу, то скв початку і кінця шкали будуть відповідно рівні:

$$\delta_{почАЦП} = \frac{\xi_{почАЦП}}{k_{ер}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,058\%, \quad (3.12)$$

$$\delta_{кінАЦП} = \frac{0,16}{\sqrt{3}} = 0,092\%$$

З врахуванням експоненціальної складової, похибка АЦП буде складатися з двох частин: на початку шкали:

$$\delta_{почАЦПрівн} = \sqrt{0,058^2 \frac{12}{13}} = 0,056\%$$

$$\delta_{почАЦПекс} = \sqrt{0,058^2 \frac{1}{13}} = 0,002\%$$

вкінці діапазону вимірювань каналу:

$$\delta_{\text{кінАЦПрівн}} = \sqrt{0,092^2 \frac{12}{13}} = 0,088\%$$

$$\delta_{\text{кінАЦПекс}} = \sqrt{0,092^2 \frac{1}{13}} = 0,003\%$$

Отже, всі складові похибки каналу вимірювання ваги піднятої рідини поділені на адитивні і мультиплікативні, визначені їх закони розподілу і розраховані скв. На рис. 3.2 наведені результати вищенаведених розрахунків, які дозволяють перейти до розрахунку сумарної похибки каналу вимірювання ваги.

Розрахунок результуючої похибки каналу зводиться до розрахунку зведеної похибки при $x=0$, яка складається тільки із адитивних складових, і в кінці діапазону, яка складається із всіх складових.

Корельованими похибками, СКВ яких можна сумувати алгебраїчно, є попарно похибки датчика і підсилювача від коливань напруги живлення, а також від коливань температури в лабораторії. Причому коефіцієнти впливу цих коливань на всі ці похибки є позитивними. Тому результуючі значення цих похибок будуть рівні:

зі збереженням трикутного закону розподілу;

- від коливань температури:

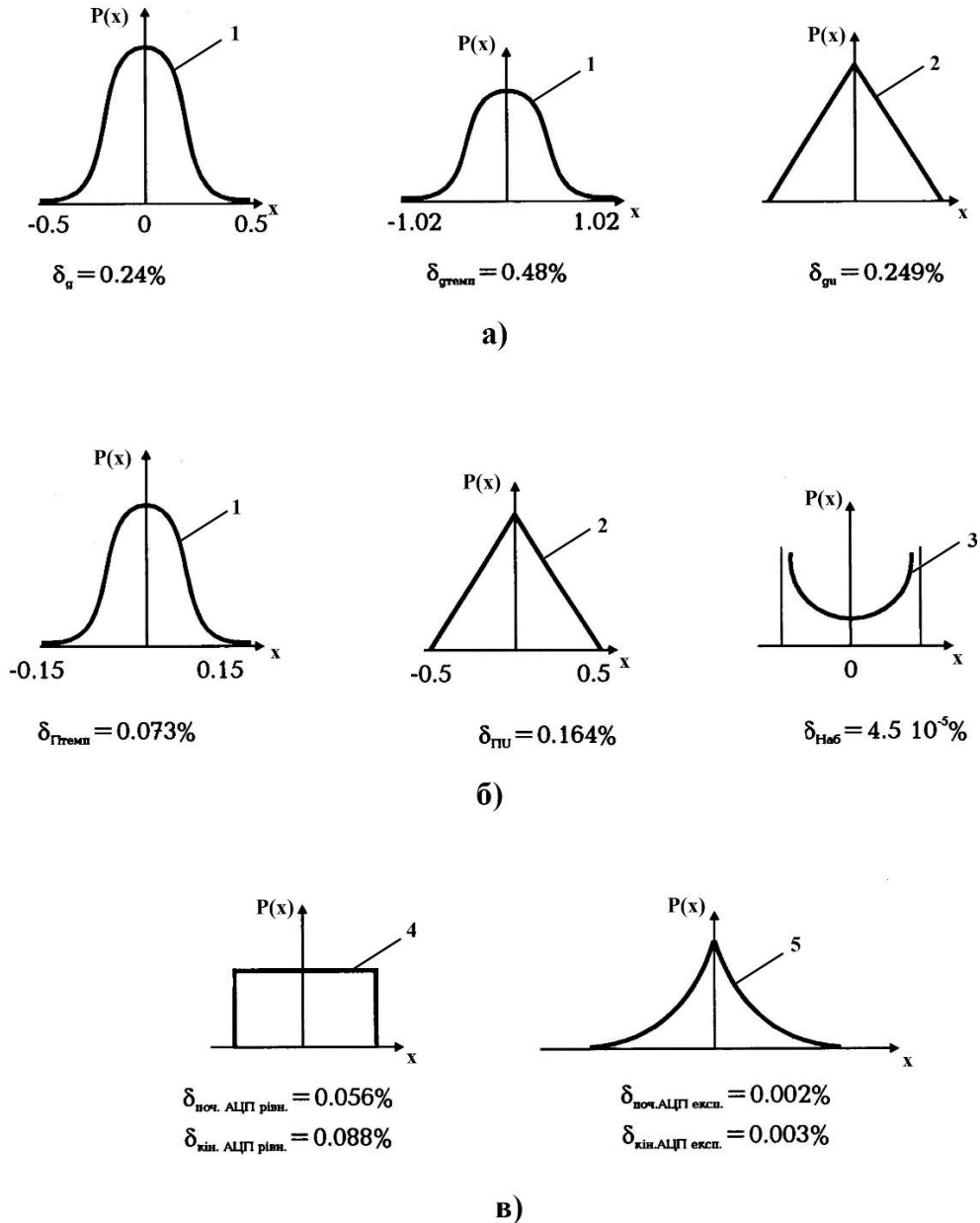
$$\delta_{(д+П)T} = 0,24 + 0,073 = 0,313\%$$

зі збереженням нормального закону розподілу.

- від коливань напруги:

$$\delta_{(д+П)U} = 0,0415 + 0,082 = 0,1235\%$$

Всі решту складових похибки вимірювального каналу сумуються як незалежні.



1 – нормальний; 2 – трикутний; 3 – арксинусоїдальний; 4 – рівномірний; 5 – експоненціальний; а – давач; б – підсилювач; в - АЦП

Рисунок 3.2. Закони розподілу і СКВ складових похибки каналу вимірювання ваги піднятої рідини.

Похибка каналу при $x=0$ складається із таких складових: похибки АЦП з рівномірним $\delta_{\text{поч.АЦПрівн}}$ експоненціальним $\delta_{\text{поч.АЦПекс}}$ розподілами, похибки датчика і температурної похибки датчика і підсилювача $\delta_{(Д+П)Т}$:

$$\delta_{\text{поч}} = \sqrt{0,056^2 + 0,002^2 + 0,313^2 + 0,24^2} = 0,462\%$$

Для всіх складових, що входять в розрахунок $\delta_{поч}$ найбільшою є вага складових з нормальним законом розподілу.

Для визначення похибки в кінці діапазону каналу потрібно до складових похибки АЦП з рівномірним $\delta_{кінАЦПрівн}$ і з експоненціальним $\delta_{кінАЦПекс}$ розподілами додати мультиплікативні похибки від коливань напруги живлення $\delta_{(д+п)у}$ з трикутним розподілом і похибку від наведення $\delta_{нав}$ з арксинусоїдальним розподілом. СКВ похибки в кінці діапазону рівне:

$$\delta_{кін} = \sqrt{0,088^2 + 0,003^2 + 0,1235^2 + (4,5 \cdot 10^{-5})^2} = 0,331\%$$

Отже, значення СКВ загальної похибки каналу вимірювання ваги піднятої рідини може бути записане у вигляді:

$$\delta_{кан} = \sqrt{\delta_{поч}^2 + \delta_{кін}^2} = 0,551\%, \quad (3.13)$$

з близьким до нормального закону розподілу, що властивий похибкам датчика і підсилювача від коливань температури, але оскільки вага складової похибки від коливань напруги з трикутним законом розподілу є досить великою, то ентропійний коефіцієнт для загальної похибки каналу буде рівний:

$$k_{енорм} + k_{ентрик} = 2,04. \quad (3.14)$$

В приладі ВПН процесом задавання висоти кільця керує ЕОМ, подаючи по лініях передачі управляючі імпульси на кроковий двигун, який через передавальний механізм здійснює переміщення вгору-вниз посудини з досліджуваною рідиною. Слід відмітити, що не всі названі вузли вносять похибку при визначенні дійсної висоти кільця. ЕОМ та лінія передачі, які працюють з цифровими даними, не спотворюють сигнали. Системи захисту ЕОМ від коливань напруги живлення і температури навколишнього середовища забезпечують відсутність похибок ЕОМ від цих факторів. Як показали дослідження, похибка може виникати внаслідок наявності "мертвого ходу" крокового двигуна з передавальним механізмом. Це проявляється в різній величині переміщення столика з посудиною вгору і вниз при однаковій кількості імпульсів, поданих з ЕОМ на блок управління двигуном (напрямо переміщення залежить тільки від

послідовності чотирифазних імпульсів). "Мертвий хід" виникає при наявності люфту вихідного валу двигуна, а також внаслідок тертя об внутрішні поверхні відповідних направляючих поверхонь ходових частин передавального механізму: муфтового з'єднання 3, гвинтового з'єднання 4, штока, кульки 6, плунжера 7 (рис.3.3). Дана похибка є адитивною і для невеликої кількості вимірювань, проведених на протязі короткого часу, її можна вважати систематичною. Однак при тривалому використанні приладу вона є випадковою.

Ця похибка є невеликою при умові абсолютно нового двигуна, який не має люфту, при високій чистоті обробки і частому змазуванні мастильними матеріалами поверхонь ходових частин, що не мають зазорів та при підпружиненні підіймального столика.

Для знаходження величини цієї похибки були проведені експериментальні дослідження, які полягали у визначенні залежності переміщення столика від кількості імпульсів, поданих з ЕОМ на блок управління двигуна. Величина переміщення столика вимірювалась при допомозі універсального вимірювального мікроскопа УИМ-216, абсолютна похибка якого дорівнює 4 мкм. Кількість поданих імпульсів, перерахованих при допомозі ЕОМ у величину переміщення, висвічувалась на екрані дисплея. Перерахування здійснювалось з таких відомих співвідношень: при подачі 256 імпульсів здійснюється повний оберт валу двигуна, що спричинює до переміщення столика на 0,5мм. Як видно максимальна зведена похибка рівна $\xi_{M.X} = 0,162\%$. Як сказано в [13], похибки кінематичних пар механізмів підлягають рівномірному закону розподілу, тому СКВ даної похибки рівне:

$$\delta_{M.X} = \frac{\xi_{M.X}}{k_{ep}} = \frac{0,162}{\sqrt{3}} = 0,0935\%. \quad (3.15)$$

Ще однією складовою похибки визначення висоти кільця є похибка від вібрації підйомного столика, викликаної імпульсною роботою крокового двигуна. Ця вібрація спричинює появу брижів на поверхні досліджуваної рідини, що створює похибку при фіксуванні незбуреного

(нульового) рівня поверхні. Для експериментального дослідження цієї похибки проводився багатократний підйом столика з посудиною (рідина в посудині не мінялась) з крайнього нижнього положення, коли спрацьовував кнопковий вимикач, до крайнього верхнього положення, коли сигнал на виході датчика стрибкоподібно зростав, сигналізуючи момент зіткнення кільця з поверхнею рідини.

Вимірювання проводились при допомозі мікроскопа УММ-21. Поскільки опис закону розподілу такого виду похибки не зустрічався в літературних джерелах, то за методикою поданою в [13], було проведено перевірку відповідності результатів спостережень нормальному закону розподілу, що найбільш часто зустрічається. Для цього використовувалась статистична функція розподілу результатів:

$$F_n(h_{ok}) = \frac{N_k}{n+1} - 0,5, \quad (3.16)$$

де n - число вимірювань; N_k - число степенів свободи, що рівне кількості нерівнозначних спостережень від першого до k -ого спостереження.

Для визначення статистичної функції результати вимірювань попередньо групувались в варіаційний ряд h_{ok} , члени якого розташовувались в порядку їх зростання. Вважаючи, що дана статистична функція рівна інтегральній функції розподілу:

$$\Phi(Z_k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = F_n(h_{ok}), \quad (3.17)$$

що подана в [13] у вигляді табличних залежностей, були знайдені значення аргумента цієї функції. Оскільки при нормальному законі розподілу має місце залежність:

$$Z_k = \frac{h_{ok} - m_{h0}}{\delta_{h0}}, \quad (3.18)$$

де m_{h0}, δ_{h0} - відповідно математичне сподівання і СКВ результатів спостережень, перевірка на нормальність в цьому випадку зводиться до оцінки лінійності залежності $Z_k = f(h_{ok})$.

Залежність $Z_k = f(h_{ok})$ з достатньою точністю можна вважати лінійною, що вказує на близький до нормального закон розподілу похибки Δh_0 . Оскільки максимальна зведена похибка рівна 0,59%, то її СКВ буде рівне:

$$\delta_{h_0} = \frac{\xi_{h_0}}{k_{ен}} = \frac{0,59}{2,07} = 0,285\% . \quad (3.19)$$

СКВ сумарної похибки визначення висоти підняття кільця, яка складається з $h_{M.X.}, h_0$ похибок, буде рівне:

$$\delta_h = \sqrt{\delta_{M.X.}^2 + \delta_{h_0}^2} = 0,299\% . \quad (3.20)$$

Закон розподілу сумарної похибки визначення висоти кільця є композицією рівномірно розподіленої складової і нормально розподіленої складової. Тому сумарна похибка має розподіл у формі трапеції, причому підйом і спад по краях відбувається по кривій інтегрального закону нормального розподілу. Ентропійний коефіцієнт такої композиції, згідно, розраховується за формулою:

$$k_{енорм+рїен} = \sqrt{\frac{3 \left(\frac{\pi e}{3} \right)^{\sqrt{P_H}}}{1 + P_H}} = 2,05, \quad (3.21)$$

$$\text{де } P_H = \frac{\delta_{норм}^2}{\delta_{норм}^2 + \delta_{рїен}^2} = 0,9109.$$

Нахил кільця може бути зумовлений двома причинами: дріт, з якого зроблене тороїдальне кільце, не лежить в одній площині, а також площина кільця є негоризонтальною. Ця похибка може бути викликана неправильним підвішуванням кільця або механічним його пошкодженням і відноситися як до систематичних так і до випадкових складових. Для уникнення систематичної складової даної похибки необхідно періодично здійснювати ретельний огляд кільця з перевіркою горизонтальності його площини. Для цього, як сказано в, необхідно встановивши кільце на дзеркальну плоску поверхню, досліджувати просвіт між цією площиною і нижньою частиною кільця по всьому периметру останнього. У випадку

виявлення просвіту необхідно легким натискуванням кільця у місці появи просвіту повернути площину кільця в горизонтальне положення.

Для дослідження похибки, зумовленої нахилом кільця, експериментально визначалась залежність максимальної прикладеної до кільця сили від кута його нахилу. Дослідження проводились при допомозі торсійної ваги типу PRLT75 (границя вимірювання - 1 г, максимальна похибка - 0,1%), до коромисла якої підвішувалось кільце. Скоба утримуючих ниток кільця згиналася так, щоб площина кільця не була горизонтальною. Кут відхилення від горизонталі визначався через виміряну при допомозі мікроскопа різницю висот між протилежними сторонами кільця в місцях приєднання утримуючих ниток. В додатку наведені результати визначення максимальної ваги піднятої кільцем рідини при його витягуванні з поверхні дистильованої води для різних значень кута нахилу площини кільця. із рис. 3.3, де графічно подані дані результати, випливає, що для невеликих значень кутів відхилення різниця величини максимальної ваги від отриманої при відсутності нахилу є прямо пропорційним квадрату кута нахилу, тобто:

$$\Delta P_p = 0,36\alpha^2.$$

Отже, для того, щоб похибка, зумовлена нахилом кільця, була менша, ніж 1,5%, його нахил повинен бути меншим 2,1 град.

Для досягнення такого малого кута нахилу кут згину утримуючих ниток у точці підвісу кільця повинен бути якомога гострішим. Кільце, що входить в прилад ВПН-1, відповідає цим вимогам. Як було встановлено по результатах вимірювання кута нахилу кільця при багатократному його підвішуванні до штоку датчика, максимальне відхилення не перевищує 1,5%.

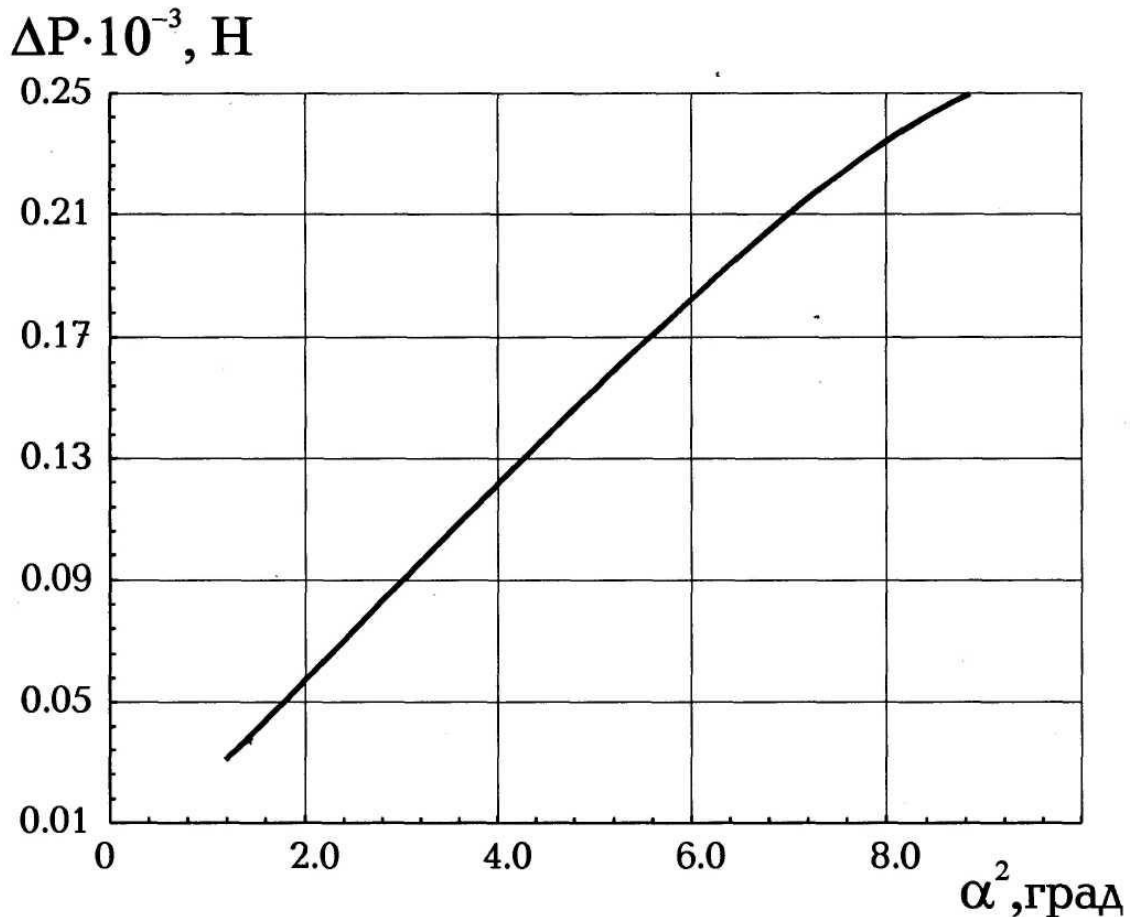


Рисунок 3.3 - Залежність зміни максимальної ваги піднятої рідини від квадрату кута нахилу кільця

Тому максимальну зведену похибку приймаємо рівною $\xi_{\alpha} = 0,8\%$. Закон розподілу даної похибки з достатнім ступенем точності можна вважати трикутним, оскільки, як сказано в [1], похибки відхилення геометричних розмірів тіл підлягають трикутному закону розподілу. Отже, СКВ даної похибки рівне:

$$\delta_{\alpha} = \frac{\xi_{\alpha}}{k_{eT}} = \frac{0,8}{\sqrt{6}} = 0,341\%. \quad (3.22)$$

Теоретичні та експериментальні дослідження складових похибки приладу дозволяють перейти до розрахунку сумарної похибки. Всі складові поділені на систематичні та випадкові. Для систематичних похибок від зміни площі меніскових поверхонь $\Delta S_{мен}$, а також від ненульового кута змочування $\Delta \Theta$ розраховані відповідні поправки, внесення яких в результат вимірювання дозволяє виключити дані похибки

при розрахунку сумарної похибки. Розрахований оптимальний радіус посудини дає можливість не враховувати похибку від впливу стінки посудини на величину об'єму піднятої кільцем рідини. Описане експериментальне дослідження відхилення дійсних розмірів кільця від заданих і теоретичний розрахунок виникаючої в зв'язку з цим систематичної похибки дають підстави не враховувати дану похибку внаслідок дуже малого її значення. Для всіх решти складових, наведених на рис. 3.4, що є випадковими похибками, визначені закони їх розподілу, розраховані їх СКВ та ентропійні коефіцієнти.

Максимальне значення СКВ похибки розрахунків, згідно даних рівне 0,187. Ця похибка є випадковою величиною і підлягає рівномірному закону розподілу, для якого ентропійний коефіцієнт рівний $k_e = 1,73$. Тому максимальне значення похибки від розрахунків буде рівне:

$$\xi_p = 0,187 \cdot 1,73 = 0,32\%.$$

Похибкою числового інтегрування за методом Рунге-Кутта четвертого порядку диференціальних рівнянь можна знехтувати, оскільки згідно величина похибки рівна піднесеному в п'яту степінь значенню кроку інтегрування і складає число порядку 10^{-5} .

Результати досліджень випадкових складових дають можливість розрахувати сумарну похибку приладу, попередньо знайшовши її СКВ δ_Σ та ентропійний коефіцієнт.

Оскільки всі вказані на рис. 3.4 складові похибки є некорельовані між собою, то СКВ сумарної похибки знаходиться за формулою (3.1):

$$\delta_\Sigma = \sqrt{\delta_{кан}^2 + \delta_h^2 + \delta_\alpha^2 + \delta_\gamma^2 + \delta_p^2} = \sqrt{0,551^2 + 0,299^2 + 0,3418^2 + 0,144^2 + 0,187^2} = 0,711\%.$$

Для визначення за формулою (3.2) ентропійного інтервалу довіри результату вимірювання ПН, що і буде зведеною сумарною похибкою приладу, необхідно, дослідивши її закон розподілу, визначити відповідний ентропійний коефіцієнт.

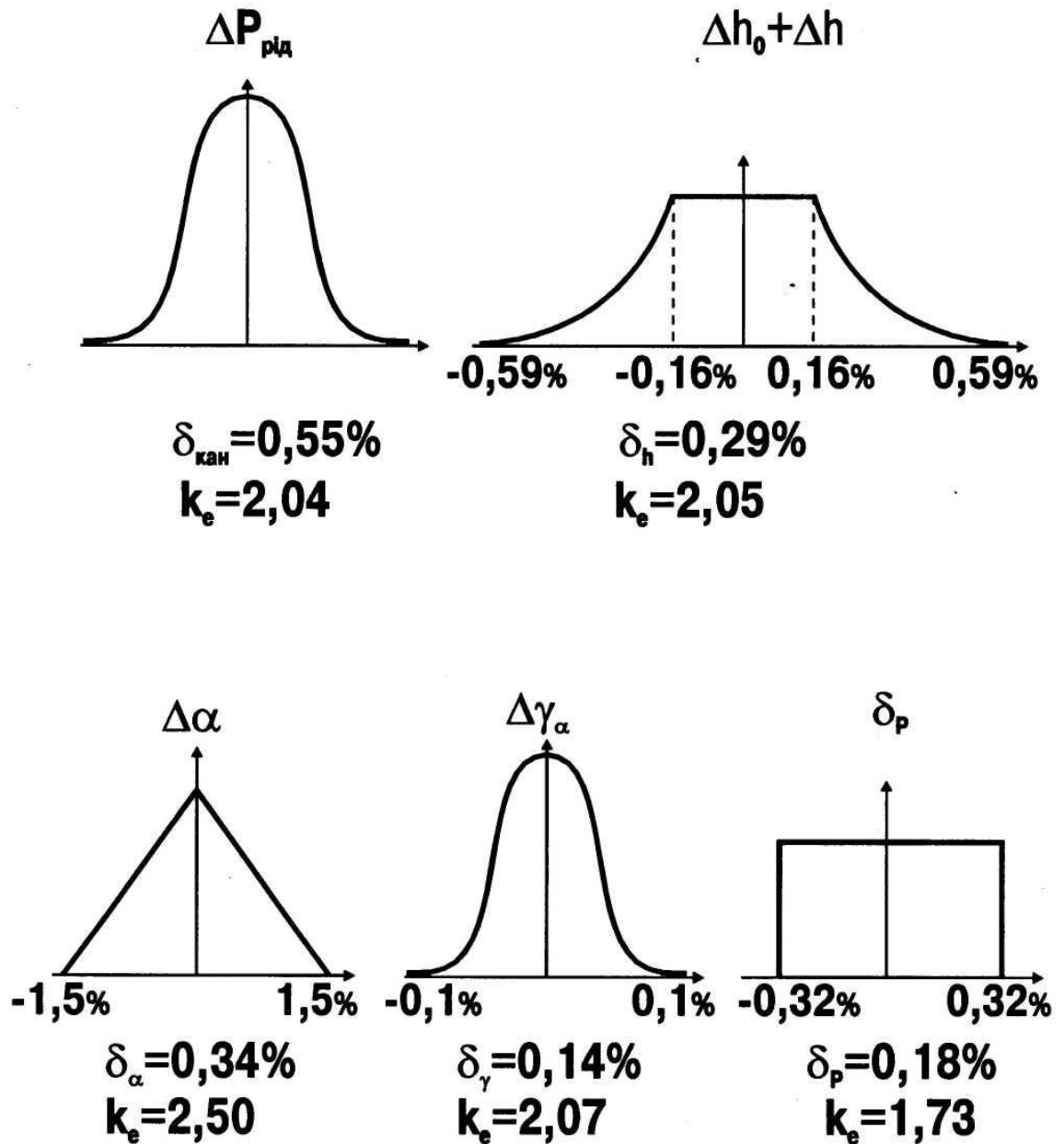


Рисунок 3.4 - Закони розподілу, СКВ і ентропійні коефіцієнти випадкових складових похибки приладу

Як видно з рис.3.4, більшість законів розподілу випадкових складових похибок, які визначені через δ і ентропійний коефіцієнт k_e мають експоненціальний вид. Найбільшу вагу дисперсії має похибка каналу вимірювання ваги піднятої кільцем рідини $\delta_{\text{кан}} = 0,551\%$, що підлягає нормальному закону розподілу. Крім того, для визначення k_e слід скористатися узагальненням, що в теорії ймовірності носить назву

центральної граничної теореми. Згідно даного узагальнення, по мірі сумування все більшої кількості похибок (не менше чотирьох) ексцес результуючих композицій законів розподілу все більше і більше наближається до нормального закону розподілу. Тому згідно з даними, наведеними в [12], $k_e = 2,066$, а коефіцієнт ексцеса для нормального закону розподілу рівний: $\varepsilon = 3$.

Отже, ентропійне значення зведеної сумарної похибки:

$$\xi_{\Sigma} = k_e \delta_{\Sigma} = 0,711 \cdot 2,066 = 1,468\% . \quad (3.23)$$

Значення довірчої ймовірності P_e , при якому ентропійне та довірче значення похибки співпадають:

$$P_e = 0,899 + \frac{0,1818}{\varepsilon} = 0,9596$$

Таким чином, при ймовірності 0,96, максимальне значення сумарної похибки приладу рівне 1,468%, що дозволяє пристрій ВПН віднести до класу точності - 1,5.

Висновок до розділу

Проаналізовано фактори впливу на точність вимірювання, за якими визначені складові похибки з врахуванням їх законів розподілу, визначено їхню кореляцію або незалежність одна від одної. Розраховано сумарну похибку та ентропійне її значення, яке підтвердило достовірність контролю та необхідність розроблення пристрою для контролю якості пенетрантів.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано процес капілярної дефектоскопії і обґрунтована необхідність вимірювання поверхневого натягу пенетрантів для контролю достовірності проведення дефектоскопії.

Здійснено аналіз різних методів вимірювання поверхневого натягу на границі розділу рідина-газ і обґрунтовано доцільність удосконалення методу витягування кільця, що здійснюється без руйнування поверхні розділу фаз.

Досліджено фізичні процеси, які мають місце при витягуванні кільця і проходженні ним границі розділу фаз.

Розроблено математичну модель процесу витягування кільця, на основі якої розроблено удосконалений метод вимірювання поверхневого натягу на границі розділу рідина-газ.

Сформульовано вимоги до пристрою для реалізації методу витягування кільця.

Розроблено функціональну схему пристрою для забезпечення поставлених вимог.

Розроблено конструкцію окремих блоків та пристрою в цілому. Розроблено алгоритм роботи пристрою в автоматичному режимі. Проаналізувано з метрологічної точки зору розроблений пристрій, який підтвердив доцільність його розроблення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. 1 Кісіль І.С., Середюк О.Є., Витвицька Л.А. Основи вимірювальної техніки. – Івано-Франківськ: Факел, 2009.-150 с.
2. Zhao Y. Characterization of amorphous and crystalline rough surface: principles and applications / Yiping Zhao, Gwo-Ching Wang, Ton-Ming Lu. – N. Y. :Academic Press, 2001. – Vol. 37. – 417 p.
3. V.B. Fainermana, R. Miller. Maximum bubble pressure tensiometry— an analysis of experimental constraints. *Advances in Colloid and Interface Science* 108 –109 (2004) 287–301.
4. Островська Л.Ю. Капілярні властивості мікро- та наноструктурних плівок вуглецю// *Фізика і хімія твердого тіла.* –т.8. - №2.. – 2007. С357-365.
5. V. Kazakov, O.Sinyachenko, V. Fainerman, U.Pison, R.Miller, *Dynamic surface tensiometry in medicine*, 2010, Elseiver, Netherlands, 388 pages.
6. Кісіль І. С., Кісіль Р.І. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. – Івано-Франківськ: Факел, 2010. – 275 с.
7. Витвицька Л.А. Розробка методу і приладу для вимірювання поверхневого натягу розчинів ПАР.- Івано-Франківськ:Факел, 1996.-148с
8. Пат.64013 U Україна МПК(2011.01) G01N 13/00. Пристрій для контролю змочуваності рідиною поверхні твердого тіла / Чуйко М.М., Витвицька Л.А.-№и2011 04224; заявл. 07.04.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.
9. Кісіль І.С. Конструювання вимірювальних приладів. – Івано-Франківськ: Факел, 2004.-327с.
10. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів ВУЗів. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
11. Полішко СП., Трубенюк О.Д. Точність засобів вимірювань. -К.: Вища школа, 1992. - 174 с.

12. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник.- Вінниця: Велес, 2001.- 185 с.

13. Основи метрології та вимірювань / Д.Б. Головка, К.Г. Реґо, Ю.О. Скрипник.- К.: Либідь, 2001.-408 с.

14. Чеховський С.А., Сердюк О.Є., Петришин І.С.,Піндус Н.М.,Ващишак С.П.,Витвицька Л.А.,Кононенко М.А., Романів В.М. Метрологія і технологічні вимірювану внафтогазовій промисловості. Навч. посібник Факел, 2010, с. 500.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
Програма роботи приладу ВПН

```

uses Objects, App, Views, Dialogs, Menus, Drivers, MsgBox, Validate, Dos, StdDlg, TextView,
Crt; const NMax = 50; type
  PV_Zk = ~TV_Zk;
  PDepCollection = TDepCollection;
  PMotor = ^ TMotor;
  PDep = ^ Dep;
  PArr = ^Arr;
  Arr = array CO. [NMax] of real;
  TMyApp = objectCTApplication)
  DataPresent : boolean;
  PData      : PDepCollection;
  PM         : PMotor;
  PMax2k     : PDep;
  constructor Init;
  procedure GreetingBox;
  procedure HandleEventCvar Event: TEvent); virtual;
  procedure InitStatusLine; virtual;
  procedure OptionsDialog;
  procedure GoProcess;
  procedure DataOpenCUildCard: PathStr);
  procedure DataInitCFileName : FNameStr);
  destructor Done; virtual;
end;
Config = objectCTObject)
Delay:  word;
Mass:   word;
Radius: real;
UO:     integer;
constructor Init;
constructor LoadCvar S: TStream);
procedure  StoreCvar S: TStream);
end;
  ConfigRec = record
    Delay:  stringC4D;
    Mass:   stringC4D;
    Radius: stringC4D;
    UO:     stringC4]; end;
DataRec = record Name  :
stringC80]; Temp  :
stringC43; Ro    :
stringH63; end;
Dep = objectCTObject) N :
integer; Px,Py,Pc : PArr;

```

Продовження додатку А

```

constructor InitCLast : integer; Pxf,Pyf : PArr); destructor Done;
virtual;
function Value Cx : real; dr : byte) : real; end;
TV_2k = objectCDEP) a2,
MinSk, MaxZk : real;
constructor IsitCa2v : real; Last : integer; Pxf, Pyf : PArr);

function ValueCx : real; dr : byte) : real; end;
TDepCollection = objectCTSortedCollection) function
CompareCKey1,Key2 : pointer): integer; virtual; function Value CZk. V :
real): real;
end;
PhaseType = C A, B, C,D); TMotor =
objectCObject) Last : PhaseType;
constructor Init; procedure MoveCLen :
real); procedure SendCPhase :
PhaseType); procedure OneUp; end; const
    ConfigFileName : FNameStr = ' aparat. cfg';
    cmOptions = 1000; cmGo = 1003;
    cmGreeting = 1004; cmData - 1005;
    ObjType: 100;
UratLink: ofsCTypeOfCConfig)4); Load:
©Config. Load; Store: @Config. Store var
Configuration : Config; Exper
: DataRec; ConfigFile :
TDosStream; procedure
Registration; begin
    RegisterTypeCRConfi
g); end;
function ReadADC : integer;
var
r1000, r100, r10, r1 : integer;
begin
r1000 := C not port C19]) and 15; if r1000 >9 then r1000
:= r1000-8; r100 := CCnot portE18]) and 240) shr 4; if
r100 >9 then r100 := r100-8; r10 := not portC18] and
15; if r10 > 9 then r10 := r10-8; r1 := C C not portC19]) and
240) shr 4; if r1 >9 then r1 := r1-8; REadADC :=
r1000*1000+r100x100+r10*10+r1; end;
procedure TMyApp.InitStatusLine;
var R: TRect; begin
    GetExtentCR);
    R.A.Y :=R.B.Y;
    StatusLine := newCPStatusLine, InitCR,
    NewStatusDefCO, SFFFF,

```

Продовження додатку А

```

NewStatusKeyC'~Alt-X~ Вихід'. kbAltX, cmQuit,
NewStatusKeyC'~F2~ Вимірювання', kbF2, cmGo,
NewStatusKeyC'~Alt-O~ Параметри', kbAltO, cmOptions,
NewStatusKeyC'~F3~ Дані', kbF3, cmData,
NewStatusKeyC'~Alt-Spase~ Про програму', kbAltSpace, cmGreeting nil))))), nil)))
end;
procedure TMyApp. GreetingBox;
var Control : word; begin

    Control := MessageBoxC#3+'Програма визначення
поверхневого натягу', nil, mfInformation+mfOkButton); end;
procedure TMyApp. HandleEvent;
begin
    inherited HandleEvent(CEvent); if
    Event. Uhat = evCommand then
    begin
        case Event. Command of
            cmGreeting : GreetingBox;
            cmOptions  : OptionsDialog;
            cmGo       : GoProcess; cmData
            : DataOpenC '*.*') end;
        ClearEvent(CEvent); end;
end;
procedure TMyApp. OptionsDialog;
var
Dialog:
PDialog; R:
TRect; B:
PInputLine;
Control: word;
C: ConfigRec; st:
string; begin
    R. AssignC19,6,61,17);
    Dialog := newCPDialog, InitCR, 'Параметри приладу')); with
    Dialogl do begin
        R. AssignC22,8,29,10);
        InsertCNewCPButton. InitCR, '~0~k', c mOk, bf Default) )); R.
        AssignC31,8,40,10);
        InsertCNewCPButton. InitCR, '~C~ancel', cmCancel, bfNormal)); R.
        AssignC34,2,40,3); B := NewCPIInputLine, InitCR,4));
        Bl. SetValidatorCNewCPRangeValidator, InitCO, 2000) ));
        InsertCB); R. AssignC2,2,33,3);
        InsertCNewCPLabel, InitCR,'Тривалість між імпульсами Cmc)',B)); R.
        AssignC34,4,40,5); B := NewCPIInputLine, InitCR,4));

```

Продовження додатку А

```

B~. SetValidatorCNewCPRRangeValidator, InitCO, 9999) ));
InsertCB); R. AssignC2,4,33,5);
InsertCNewCPLLabel, InitCR,'Маса кільця Смг'),B)); R.
AssignC34,6,40,7); B := NewCPInputLine, InitCR, 4));
BП. SetValidatorCNewCPPXPictureUalidator, InitC '#. СШЕЙ] ', TRUE)););
InsertCB); R. AssignC2,6,33,7);
InsertCNewCPLLabel, InitCR,'Радіус кільця (мм)'),B)););
SelectNextCFalse); SelectNextCFalse); SelectNextCFalse); end;
Conf2StrCConfiguration, C);
Dialog^. SetDataCc);

```

```

Control := DeskTop"*4. ExecViewCDialog); if Control =
cmOk then Dialog4. GetDataCc); Str2ConfCC,
Configuration); if Control = cmOk then begin
    Configuration. UO := ReadADC;
    strCConfiguration. UO: 4, st);
    MessageBoxCtt3+'Нульове значення UO = '+st,NIL,
    mfInformation+mfOkButton);end;end;

```

```

procedure TMyApp. GoProcess;

```

```

var

```

```

Dialog : PDialog;

```

```

R      : TRect;

```

```

B      : PInputLine;

```

```

i          : integer;

```

```

Control   : word;

```

```

UO, Uv    : integer;

```

```

Touch,Cancel : boolean;

```

```

Event     : TEvent;

```

```

Zk,Ro,UO,a20,ZkO,dZ: real;

```

```

ac,be          : real;

```

```

a20s,s        : stringC53;

```

```

begin

```

```

    if DataPresent then

```

```

        begin

```

```

            R. AssignC19, 6, 62,19);

```

```

            Dialog := newCPDialog, InitCR, 'Параметри'); with

```

```

            Dialogs do begin

```

```

                R. AssignC22,10, 29,12);

```

```

                InsertCNewCPButton, InitCR, '~0~k', cmOk, bfDefault) )); R.

```

```

                AssignC31,10,41,12); InsertCNewCPButton, InitCR, '~C~ancel', cmCancel,
                bfNormal)););

```

```

            R. AssignC2.2,40,3);

```

```

            B := NewCPInputLine, InitCR,80));

```

```

            InsertCB);

```

Продовження додатку А

```

R. AssignC2,1,17, 2);
  InsertCNewCPLabel, InitCR,'Назва речовини',B));
R. AssignC15,4,21,5);
B := NewCPInputLine, InitCR,4));
Bп. SetValidatorCNewCPPXPictureValidator,
      InitC' <#[ Ш ]>.<{<[>}>', TRUE));
InsertCB);
R. AssignC2, 4,14, 5);
  InsertCNewCPLabel, InitCR,'Температура',B));
R. AssignC24,4,42,5);
R. AssignC15,6,23,7);
B := NewCPInputLine, InitCR,6));
Bп. SetValidatorCNewCPPXPictureUalidator,
      InitC'-СЯНИ] СШ СШ>. ЯШ)' ,TRUE));
InsertCB);

R. AssignC2,6,10,7);
  InsertCNewCPLabel, InitCR, 'Густина', B));
R. AssignC24,6,42,7);
  InsertCNewCPStaticText, InitCR,'в кг/м3'));
SelectNextCFalse);
SelectNextCFalse);
SelectNextCFalse);
SetDataC Exper);
end;
Control := DeskTop^. ExecViewCDialog); if
Control = cmOk then begin
  Dialog^. GetDataCExper);
  valCExper. Ro, Ro, i); end;
if Control = cmOk then
begin
  Control := MessageBoxC#3+'Відведіть посудину
вниз',nil,mfConfirmation+mfOKCancel); if Control = cmOK then
begin
  UO := ReadADC; Uv :=
  UO; Touch := FALSE;
  Cancel := FALSE;
  while C not Touch) and C not Cancel) do
  <2. Вести підняття до моменту торкання або переривання>
begin PМЛ OneUp; Uv := ReadADC;
  if absCCUO-Uv)/Uv) > 0.015 then Touch := TRUE;
  GetEventCEvent); if CEvent.Uhat = evKeyDown) and CEvent.
  KeyCode = kbEsc)
  then Cancel :=
  TRUE; end;

```

Продовження додатку А

```

    if Cancel then begin
        MessageBoxC#3+'Процес перервано',nil,

var
    FileName: FNameStr; begin
    FileName := '*.*';

    if ExecuteDialogCNewCPFileDialog, InitCUildCard, '
        Вкажіть на файл даних',
        '~N~ame', fdOpenButton, 100)), ©FileName) <> cmCancel then begin
DataInitCFileName) end; end;
procedure TMyApp. DataInIt; var
F : text;
2i, 2k, Vmax, Fi, Fo, a2 : real;
a2p, tmp                : real;

2k_a, V_a, Max_2k, a_2 : Arr;
Pz, Pv                : PArr;
n,nz,i,J              : integer;
fst                    : boolean;
begin
    P2 := @Zk_a; Pv := @V_a;
    n := 0;n2 := 0; if
DataPresent
then begin PData^. Done; PMaxZk^. Done end else PData :=
newCPDepCollection, initCIO, 2)); fst := TRUE; AssignCF ,
FileName); ResetCF);
readCf, zi, zk, vmax, f i, fo, a2); a2p
:= a2; n:=0; while not eofCf) do
begin
    if a2p = a2
    then if n < Nmax then
begin 2k_aCn] := zk; V_aCn] := vmax; incCn) end else else
begin
    PData"4. InsertCnewCPV_Zk. initCa2p, n-1,Pz, Pv)); a_2Cnz] :=
a2p; Max_ZkCnz] := 2k_aCn-1] ;incCnz); n := 0; a2p :=
a2; end;
    readCf, zi, zk, vmax, f i, fo, a2); end;
PData~. InsertCnewCPV_2k. initCa2p. n-1,Pz, Pv)); a_2Cnz]
:= a2; Max_2kCnz] := 2k_aCn-1]; for i := 0 to nz-1 do
for j := i+1 to nz do
    if a_2CiJ > a_2Cj3 then
begin

```

Продовження додатку А

```

        tmp := a_2Ci]; a_2Ci] := a_2CJ]; a_2CJ3 := tmp;
        tmp := Max_2kCi]; Max_2kCi3 :=Max_ZkCJ];
        Max_2kCj] := tmp;
    end;
PMax2k := newCPDep,InitCnz, @a_2, @Max_zk)); DataPresent
:= TRUE; end;
constructor TMyApp. Init; var
R: TRect; begin
    inherited Ini
    GreetingBox;
    DataPresent := FALSE;
    Desktop4. GetExtentCR);
    R. AssignCR. B. X div 2, R. B. Y div 2, R. B. X, R. B. Y);
    DataOpenC' *. dat');
    InitConfig;
    PM := newCPMotor, Init);
    Exper. Name := ' Вода дистильована ';
    Exper. Temp := '20. 0';
    Exper. Ro := '1000.0'; end;
destructor TMyApp. Done; begin
    disposeCPM);
    DoneConfig;
    if DataPresent then
    begin
        PData^. Done; PMaxZk^. Done;
    end;
    inherited Done; end; var
MyApp : TMyApp; begin
    MyApp. Init;
    MyApp. Run;
    MyApp.Done; end.

```