

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

На правах рукопису

Кучірка Юрій Михайлович

УДК 532.61.08

УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЇХ
РЕАЛІЗАЦІЇ

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та
визначення складу речовин

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

*Цей примірник дисертації
ідеально згідно з вимогами
своєюм призначенням
дисертації, поданим
суду. Всього рахунок 20.05.2013
Ваше керівництво
М. Іванчук
02.04.13*

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



Івано-Франківськ – 2013

d478



ЗМІСТ

Вступ	5
РОЗДІЛ 1	
Аналіз відомих методів і приладів для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці.....	11
1.1 Експериментальні умови дослідження поверхневого натягу однокомпонентних рідин, промислових розчинів поверхнево-активних речовин та біологічних рідин людського організму	11
1.2 Аналіз відомих методів дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці	14
1.3 Відомі прилади для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці і їх аналіз.....	22
Обґрунтування і вибір напрямку дослідження.....	32
РОЗДІЛ 2	
Розроблення удосконалених методів визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці.....	34
2.1 Методика фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска у цей момент.....	34
2.2 Розроблення ітераційного методу визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів.....	49
2.3 Методика урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної системи на вимірний максимальний тиск у бульбашці.....	51
2.4 Визначення моментів досягнення максимальних тисків у процесі їх вимірювання	55
2.5 Розроблення методу визначення динамічного поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів.....	60
2.6 Калібрування радіусів трьох вимірювальних капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках	65

Висновки до розділу67

РОЗДІЛ 3

Розроблення трикапілярного пристрою для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів поверхнево-активних речовин69

3.1 Вимоги до пристрою з метою реалізації ним розроблених методів визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР69

3.2 Структурна і функціональна схеми трикапілярного пристрою69

3.3 Пневматична схема трикапілярного пристрою.....72

3.4 Електрична схема трикапілярного пристрою75

3.5 Програмне забезпечення трикапілярного пристрою77

3.6 Процедура проведення трикапілярним пристроєм дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР80

Висновки до розділу86

РОЗДІЛ 4

Метрологічний аналіз розроблених методів і трикапілярного пристрою для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів поверхнево-активних речовин88

4.1 Граничні похибки визначення максимальних тисків для трьох капілярів.....90

4.2 Граничні похибки визначення радіусів кривизни та висот менісків для трьох вимірювальних капілярів.....99

4.3 Границі похибки визначення різниці густин рідини та газу107

4.4 Розрахунок довірчих границь похибки визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР і аналіз отриманих результатів108

4.5 Розроблення проекту методики повірки трикапілярного пристрою113

Висновки до розділу.....114

РОЗДІЛ 5

Лабораторні і натурні випробування трикапілярного пристрою для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів поверхнево-активних речовин	116
5.1 Методика проведення лабораторних випробувань трикапілярного пристрою.....	116
5.2 Результати лабораторних випробувань трикапілярного пристрою і їх аналіз.....	117
5.3 Натурні випробування трикапілярного пристрою на промислових розчинах поверхнево-активних речовин та біологічних рідинах людського організму.....	126
Висновки до розділу.....	132
Висновки.....	132
Список використаних джерел.....	134
Додатки	146

ВСТУП

Актуальність теми. Дослідження поверхневого натягу (ПН) рідин і розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) необхідне при їх виробництві та використанні у нафтогазовій, авіаційній, космічній та інших галузях промисловості. Екологічний контроль на вміст ПАР у побутових і промислових водних стоках, медичні дослідження біологічних рідин (БР) людського організму також мають гостру потребу у розробленні надійних методів дослідження ПН рідин та виробництві на їх основі автоматизованих вимірювальних засобів.

За значенням ПН можна експериментально вибрати тип ПАР і його концентрацію у розчинах, судити про якість розчинів ПАР як на водній, так і на органічній основах. Оптимальний вибір типу ПАР та концентрації промислових розчинів ПАР при їх застосуванні у нафтогазовій промисловості дозволяє підвищити видобуток нафти і газу. Використання ПАР при виробництві різноманітних промислових та побутових миючих засобів вимагає надійних приладів для оцінки їх якості і контролю за ефективністю їх застосування. Широкий вжиток таких миючих засобів потребує постійного екологічного контролю та моніторингу на вміст ПАР як у стічних водах, які в подальшому у процесі їх очищення передбачається використовувати для різноманітних цілей, так і у водоймах, які є джерелами для постачання питної води населенню.

Використання ПАР у сучасних технологіях видобутку сланцевого газу із використанням значних об'ємів води, в т.ч. і на території України, вимагає проведення постійного екологічного контролю водних ресурсів на вміст в них ПАР з використанням автоматизованих засобів вимірювання ПН. В медичній галузі результати вимірювання рівноважного (РПН) та динамічного ПН (ДПН) БР людини відображають її вік, стать, ознаки здоров'я чи наявність конкретного захворювання у людському організмі.

Сучасні методи і прилади для дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці дозволяють здійснювати дослідження ПН рідин у вище описаних сферах, проте вони вимагають попереднього вимірювання густини

досліджуваних рідин та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину. Тому удосконалення існуючих методів дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці є актуальним, що дозволить усунути недоліки відомих методів і тим самим підвищити точність результатів дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних державних бюджетних тем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу «Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрат та контролю обладнання і технологічних параметрів у нафтогазовій галузі» (0109U008878) і «Розроблення новітніх методів і систем експрес-контролю наявності поверхнево-активних речовин (ПАР) у стічних водах, водоймищах і річках» (0112U003012), де автор був виконавцем відповідних розділів, пов'язаних із розробленням удосконалених методів і трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці.

Мета роботи: підвищення точності результатів досліджень рівноважного та динамічного поверхневих натягів рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці шляхом розроблення удосконалених методів таких досліджень та трикапілярного пристрою, що їх реалізує.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі:**

- здійснити аналіз відомих методів і приладів для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці;
- розробити методику фіксації моменту досягнення максимального тиску бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска у цей момент;
- розробити удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів за максимальними тисками у бульбашках, які утворюються на нижніх торцях цих капілярів;
- розробити удосконалену процедуру визначення моментів максимальних тисків у процесі їх вимірювання;

- розробити та виготовити трикапілярний пристрій для автоматизованого дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;
- розробити методику урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, що утворюються із трьох капілярів, а також методику визначення радіусів цих капілярів;
- здійснити метрологічний аналіз розроблених методів і трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, а також розробити проект методики перевірки цього пристрою;
- провести лабораторні і натурні випробування трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

Об'єктом дослідження є процес дослідження поверхневого натягу однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР і біологічних рідин людського організму.

Предметом дослідження є удосконалені методи підвищення точності досліджень поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимального тиском у бульбашці.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися: теорія капілярності Лапласа (для розроблення методики фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці); чисельні методи Рунге-Кутта та Адамса-Башфорта-Мултона (для розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують поверхню меніска); математичні фільтри Савицького – Голя другого порядку (для визначення моменту максимального тиску у процесі його вимірювання); статистичні методи (для оброблення значень максимальних тисків та часових параметрів ДПН рідин); методи інтерполяції, екстраполяції та апроксимації даних (для визначення проміжних значень максимальних тисків у бульбашках та рівноважного максимального тиску для кожного із трьох капілярів); методи теорії похибок (для оцінки складових сумарної похибки трикапілярного пристрою).

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено методику фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку параметрів меніска у цей момент, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- вперше розроблені ітераційні методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, які не вимагають попереднього визначення густини рідини та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину у цю рідину, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- вперше розроблено процедуру визначення моменту максимального тиску у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького – Голя другого порядку, що дозволило підвищити точність його вимірювання і відповідно точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- отримані залежності радіусу кривизни меніска в його омбілічній точці та віддалі від неї до нижнього торця капіляра у момент максимального тиску у бульбашці від параметрів, які визначаються у процесі дослідження рідин, що дозволило врахувати несферичність меніска у цей момент і тим самим підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено і виготовлено трикапілярний пристрій для реалізації удосконалених методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, який дозволяє здійснювати автоматизоване їх дослідження у діапазоні часу існування розділу фаз від 0,1 с до 50000 с та здійснено метрологічний аналіз цього пристрою;

- розроблено методику урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, які утворюються із трьох капілярів, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено методику попереднього визначення радіусів вихідних отворів трьох вимірювальних капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, що дозволяє урахувати їх виробничі вади і тим самим підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено процедуру статистичного оброблення визначених максимальних тисків і часових параметрів ДПН розчинів ПАР у процесі їх вимірювання, що дозволяє підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

- розроблено проект методики повірки трикапілярного пристрою для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР;

- впроваджено трикапілярний пристрій для дослідження БР пацієнтів Чернівецького обласного клінічного онкологічного диспансеру та промислових розчинів ПАР, які використовуються ТзОВ «Вінісін».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати із формулюванням відповідних висновків отримані автором самотійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: розроблення методики фіксації моменту максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку параметрів меніска у цей момент [1÷3]; розроблення ітераційних методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів [4÷12]; розроблення і виготовлення трикапілярного пристрою [4÷12]; розроблення процедури визначення моменту максимального тиску у бульбашці у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького – Голея [13]; розроблення процедури урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної системи пристрою на вимірний максимальний тиск у бульбашці; розроблення процедури визначення радіусів вихідних отворів трьох капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках; розроблення процедури статистичного оброблення максимальних тисків і часових параметрів динамічного ПН рідин у процесі їх вимірювання [14÷18]; метрологічний аналіз трикапілярного пристрою; розроблення проекту методики повірки трикапілярного пристрою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: VI – й науково-технічній конференції «Приладобудування 2007: Стан і перспективи» (м. Київ) – 2007 р.; V – й науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ) – 2008 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми і перспективи» (м. Івано-Франківськ) – 2009 р.; IX–й науково-технічній конференції «Приладобудування – 2010: стан і перспективи» (м. Київ) – 2010 р.; науково-технічній конференції «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України» (м. Івано-Франківськ) – 2010 р.; VI – й науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ) – 2011 р.; XI–й Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця) – 2012 р.; V – му Всесвітньому конгресі «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ) – 2012 р.; VIII–й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія і вимірювальна техніка» (м. Харків) – 2012 р.; I–й конференції студентів, аспірантів «Сучасні тенденції розвитку приладобудування» (м. Луганськ) – 2012 р.

Публікації. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень, які представлені у дисертаційній роботі, опубліковано 6 статей у фахових наукових виданнях України (в т.ч. 1 стаття – одноособова), отримано 2 патенти України на винахід, прийнято участь у 10 – ох науково-технічних конференціях.

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та 16 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 273 сторінок, з яких основний зміст викладено на 145 сторінках друкованого тексту, 40 рисунках і 9 таблицях. Список використаних джерел складається із 101 найменування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ПРИЛАДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО- АКТИВНИХ РЕЧОВИН ЗА МАКСИМАЛЬНИМ ТИСКОМ У БУЛЬБАШЦІ

1.1 Експериментальні умови дослідження поверхневого натягу однокомпонентних рідин, промислових розчинів поверхнево-активних речовин та біологічних рідин людського організму

Широке застосування ПАР у промисловості, побуті, а також значний розвиток наукових досліджень поверхневих властивостей різноманітних природних та штучних рідин вимагає розвитку ефективних та достовірних методів і технічних засобів дослідження чи технологічного контролю згаданих властивостей таких рідин.

Визначальними параметрами, що характеризують їх поверхневі властивості є значення їх РПН і ДПН. Кожен вид застосування чи дослідження ставить свої вимоги до методу дослідження ПН рідин, зокрема у частині точності дослідження ПН, робочого діапазону вимірювання ПН, можливості автоматизації проведення дослідження тощо. Так, прецизійні лабораторні дослідження ПН рідин в одиничних масштабах, в першу чергу, вимагають мінімальної похибки вимірювання, в той же час як процеси технологічного та екологічного контролю величини ПН, а також дослідження БР людського організму першочергово ставлять вимогу щодо максимальної автоматизації процесу дослідження ПН при більшій, але допустимій похибці результатів його вимірювання. Вимога максимальної автоматизації процесу дослідження продиктована необхідністю виключення людського чиннику та суб'єктивізму з результатів досліджень. Останнє також дозволяє проводити експеримент без висококваліфікованого персоналу, що суттєво знижує собівартість досліджень ПН рідин, і, як наслідок, відповідного технологічного процесу.

Експериментальні умови дослідження ПН рідин у залежності від умов

застосування чи дослідження ПАР мають суттєві відмінності. Досліджувані рідини можуть бути у необмеженому об'ємі, наприклад, при екологічному контролі водних ресурсів на вміст у них ПАР, у середніх кількостях при дослідженні промислових та побутових розчинів ПАР об'ємом від 20 мл і більше, а також у критично малих кількостях (менше 20 мл при дослідженні БР людського організму). Досліджувані рідини можуть бути як прозорими (при дослідженні ПН водойм, чи прозорих промислових та побутових ПАР), так і непрозорими (сильно забруднені стічні води, непрозорі розчини ПАР, БР людського організму).

Враховуючи суттєву залежність величини ПН від температури, температурний діапазон досліджуваних рідин при вимірюванні їхнього ПН може коливатися у широких межах: від кількох градусів Цельсія (природні водойми, БР людини, які повинні зберігатися при низьких температурах (близько 4°C), чи ПАР, які застосовуються при низьких температурах) до 95°C (при дослідженні побутових мийних засобів тощо). В окремих випадках може існувати і необхідність в дослідженні поверхневих властивостей рідин при значно більших чи менших температурах, наприклад, при застосуванні ПАР у космосі чи інших високо - чи низькотемпературних середовищах.

Для більшості досліджуваних рідин важливим параметром є не тільки значення РПН, а також часова залежність ПН, тобто ДПН. Швидкість досягнення розчином ПАР рівноважного значення ПН суттєво впливає на продуктивність технологічного процесу застосування ПАР. Параметри ДПН є визначальними показниками при дослідженні БР людини.

Необхідний часовий інтервал дослідження ДПН рідин може становити від долі секунди (наприклад, для БР) до десятків годин. Наприклад, у залежності від концентрації поверхнево-активних протеїнів у крові людини, зокрема, альбуміну, процес досягнення рівноваги адсорбції у сироватці крові може тривати до 30 годин при малій його концентрації чи від десятків секунд до хвилини при високій концентрації останнього [19].

На підставі аналізу експериментальних умов дослідження ПН промислових

розчинів ПАР та БР людини можна зробити висновок щодо методу дослідження ПН і встановити наступні вимоги:

- часовий діапазон дослідження ДПН рідин: від долі секунди до десятків годин;
- температурний діапазон дослідження ПН рідин: від 0 до +95 °С;
- діапазон дослідження ПН прозорих і непрозорих рідин: від 10 мН/м до 100 мН/м;
- мінімальний об'єм об'єкту дослідження: 1 мл;
- максимальна автоматизація процесу дослідження ПН рідин.

Розглянемо відомі методи вимірювання ДПН рідин. До них можна віднести: методи осцилюючого потоку, нахиленої пластини, об'єму краплі, висячої краплі, лежачої краплі, падіння тиску, кільця дю-Нуї, пластинки Вільгельма та максимального тиску в бульбашці (МТБ). Всі ці методи характеризуються своїм часовим інтервалом існування поверхні меніска [19] (рис. 1.1). Аналізуючи його, можна відмітити, що саме метод МТБ володіє необхідним діапазоном існування поверхні меніска у порівнянні з іншими методами. Ще одним обмеженням щодо застосування згаданих методів є необхідність у значному об'ємі досліджуваної рідини (наприклад, не менше 20 мл для методів кільця дю-Нуї та пластинки Вільгельма чи не менше 5 мл для методу висячої краплі [19]), що є неприпустимо для медичних застосувань.

Необхідно також зауважити активний прогрес у розвитку методів, що базуються на регресійному аналізі форми краплі чи бульбашки (методи висячої та лежачої краплі), так званому методу аналізу осесиметричного профілю краплі (ADSA [20]). Його застосування дозволяє отримувати значення ДПН, починаючи вже від 20 - ти мілісекундного інтервалу існування поверхні розділу фаз. Методи ADSA дозволяють проводити дослідження ДПН рідин об'ємом навіть менше 1 мл. Недоліками методу ADSA є: необхідність забезпечення високої чистоти експерименту, потреба у висококваліфікованому персоналі для його проведення, складність автоматизації процесу вимірювання. В той же час, застосування спеціальної вимірювальної медичної комірки [19–23] дозволяє використання

методу МТБ для рідин об'ємом 1 мл.

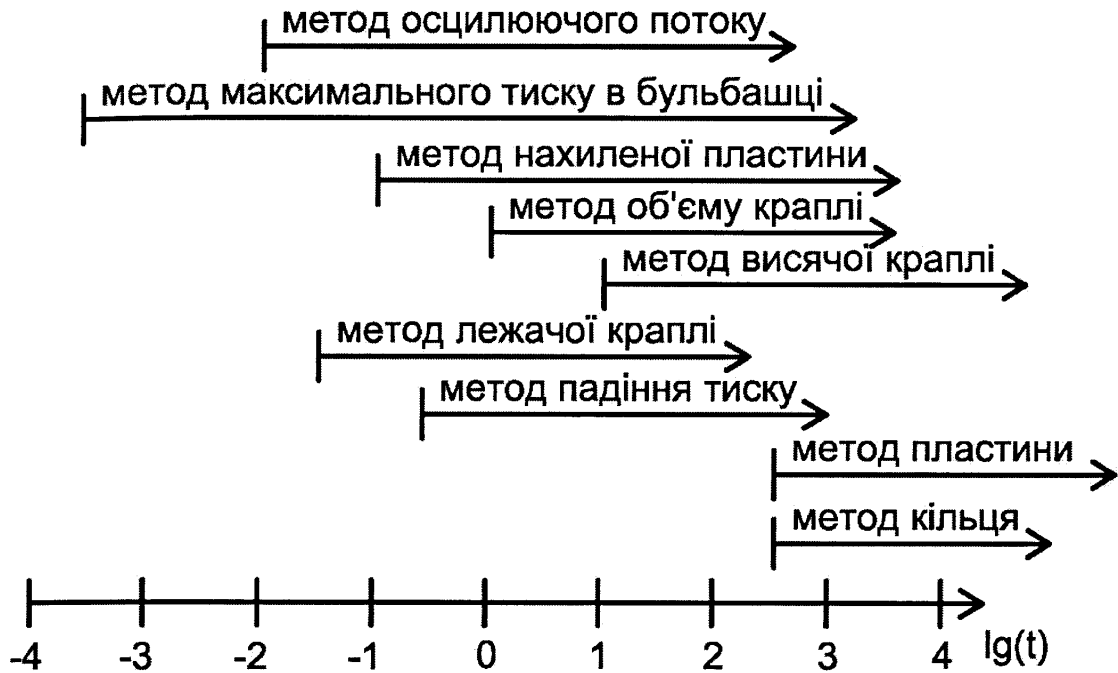


Рис.1.1. Часові інтервали існування поверхні меніска для різних методів вимірювання ДПН розчину ПАР [19]

Проведений аналіз показав, що метод МТБ повністю задовольняє основні вимоги щодо дослідження ПН рідин і здатний забезпечити необхідний часовий та температурний діапазони дослідження ДПН, можливість дослідження прозорих і непрозорих рідин об'ємом від 1 мл, а також повну автоматизацію процесу дослідження однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР та БР людини.

1.2 Аналіз відомих методів дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці

Метод МТБ для дослідження ПН рідин був уперше запропонований М. Сімоном у 1851 р. [24]. П. Ребіндер уперше застосував згаданий метод для дослідження ПН розчинів ПАР [25]. Визначення ПН рідини методом МТБ полягає в тому, що із джерела газу (компресора чи балона з газом) через опущений в досліджувану рідину вимірювальний капіляр, продувається повітря (чи інший газ), внаслідок чого на торці капіляра утворюється меніск, який відриваючись,

утворює в рідині бульбашку. При утворенні цієї бульбашки виникає надлишковий максимальний тиск P_{\max} [26]. Величина P_{\max} строго залежить від ПН рідини σ [27], глибини занурення нижнього торця капіляра у неї H і різниці густин рідини ρ_2 і газу ρ_1 у бульбашці $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ (рис.1.1):

$$P_{\max} = \frac{2\sigma}{R_o} + \Delta\rho g(H + z_o), \quad (1.1)$$

де R_o і z_o – радіус кривизни меніска в омбілічній точці (т. 0) у момент максимального тиску у бульбашці та віддаль від т. 0 до нижнього торця каліброваного капіляра, відповідно; g – прискорення вільного падіння. Із аналізу виразу (1.1) видно, що такі величини, як P_{\max} , $\Delta\rho$, g і H можуть бути вимірними чи заданими, а R_o і z_o , які залежать від радіусу капіляра, властивостей рідини та форми меніска у момент максимального тиску у бульбашці, не піддаються попередньому вимірюванню.

Відмітимо, що форма меніска у вакуумі в момент максимального тиску у бульбашці була б напівсферичною через дію в (1.1) тільки складової «лапласового» тиску $\frac{2\sigma}{R_o}$, проте через дію гідростатичного тиску рідини в умовах земного тяжіння (складова $\Delta\rho g(H + z_o)$) форма меніска відхилятиметься від напівсферичної форми, що вносить суттєву похибку у результати визначення ПН рідини при неврахуванні цього відхилення. Тому скористатися виразом (1.1) для визначення σ практично неможливо. З метою виключення R_o і z_o та урахування несферичності форми меніска у момент максимального тиску у бульбашці ряд авторів здійснили певні дослідження і при відповідних допущеннях запропонували наближені залежності (вперше запропоновано Кантором [28]) для розрахунку ПН рідин σ методом МТБ при умові, що $H = 0$ (капіляр лишень торкається нижнім торцем поверхні рідини):

залежність М. Кантора [26]:

$$\sigma = \frac{P_{\max} \cdot r}{2} \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta\rho g r}{P_{\max}} - \frac{(\Delta\rho g)^2 r^2}{P_{\max}^2} \right], \quad (1.2)$$

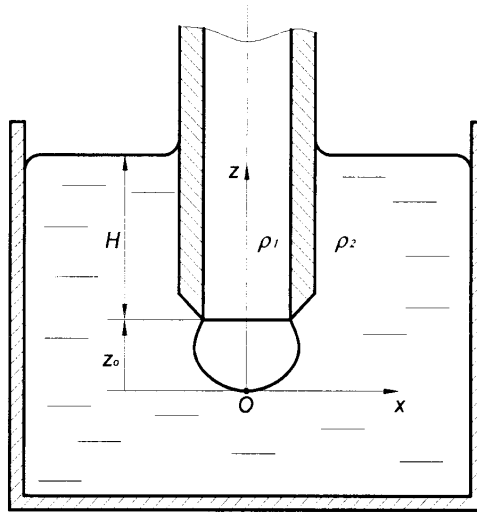


Рис. 1.2. Видування бульбашки через капіляр [27]

залежність Р. Фестеля [26]:

$$\sigma = \frac{P_{\max} \cdot r}{2} \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta \rho g r}{P_{\max}} - \frac{1}{3} \frac{(\Delta \rho g)^2 r^2}{P_{\max}^2} \right], \quad (1.3)$$

залежність Е. Шредінгера [26]:

$$\sigma = \frac{P_{\max} \cdot r}{2} \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta \rho g r}{P_{\max}} - \frac{1}{6} \frac{(\Delta \rho g)^2 r^2}{P_{\max}^2} \right], \quad (1.4)$$

залежність І. Кісіля [29]:

$$\sigma = \frac{P_{\max} \cdot r}{2} - 0,384 \Delta \rho g r^2, \quad (1.5)$$

де P_{\max} – вимірний максимальний тиск у бульбашці при її утворенні; r – внутрішній радіус капіляра; $\Delta \rho$ – різниця густин між досліджуваною рідиною та газом. При одержанні (1.2) і (1.3) віддаль до площини зрізу торця капіляра від вершини меніска z_0 у момент максимального тиску у бульбашці визначалася як для сферичної поверхні. Таке допущення не буде суттєво впливати на точність визначення ПН σ рідини лише у випадку використання капілярів з внутрішніми радіусами $r \leq 0,1$ мм. В. Файнерманом [19] пропонується при використанні капілярів з $r \leq 0,1$ мм приймати рівність радіусу кривизни меніска у момент максимального тиску у бульбашці внутрішньому радіусу капіляра $R_0 \approx r$. Тоді приймається, що досягнення максимального тиску у бульбашці виникає при

досягненні меніском практично напівсферичної форми, при якій його радіус кривизни буде мінімальним та буде рівним внутрішньому радіусу капіляра, таким чином, нехтуючи відхиленням меніска від напівсферичної форми. Похибка визначення ПН рідини при такому допущенні буде рівна 0,05% [19]. Залежність (1.4) була отримана Е. Шредінгером шляхом визначення висоти підйому рідини в капілярі, припустивши при цьому повне змочування його стінок рідиною, що справедливо лише для деяких матеріалів вимірювальних капілярів. Використовуючи залежність (1.4), а також результати оброблення таблиць Ф. Башфорта і Ж. Адамса, С. Сагден склав власні таблиці визначення ПН рідини за методом послідовних наближень [30]. Б. Волков і Л. Воляк за допомогою ЕОМ провели перетворення таблиці С. Сагдена, в результаті чого отримали таблицю, яка дозволяє отримати кінцеве значення ПН без виконання ряду послідовних наближень [31]. С. Дугне [32] запропонував залежності, в результаті розв'язку яких, можна визначити σ :

$$\text{для } 0 < \frac{r}{a} \leq 0,82 \quad \frac{P_{\max}}{\Delta\rho g a} = \frac{2}{r/a} + 0,66573 \left(\frac{r}{a}\right) + 0,08973 \left(\frac{r}{a}\right)^3, \quad (1.6)$$

$$\text{для } 0 < \frac{r}{a} \leq 1,0 \quad \frac{P_{\max}}{\Delta\rho g a} = \frac{2}{r/a} + 0,6679 \left(\frac{r}{a}\right) + 0,0853 \left(\frac{r}{a}\right)^3, \quad (1.7)$$

$$\text{для } 0 < \frac{r}{a} \leq 1,5 \quad \frac{P_{\max}}{\Delta\rho g a} = \frac{1,99942}{r/a} + 0,00979 + 0,6327 \left(\frac{r}{a}\right) + 0,159 \left(\frac{r}{a}\right)^3 - 0,05063 \left(\frac{r}{a}\right)^5, \quad (1.8)$$

де a^2 – капілярна стала рідини ($a^2 = \frac{\sigma}{\Delta\rho g}$).

Р. Бендуре провів власні дослідження таблиць С. Сагдена і на їх основі запропонував наступну поліноміальну залежність для визначення ПН рідини, яка застосовується в більшості сучасних іноземних приладах [33]:

$$\sigma = f P_{\max} r / 2, \quad (1.9)$$

$$\text{де} \quad f = \sum_{i=0}^5 B_i \left(\frac{r}{a}\right)^i, \quad (1.10)$$

$$B_0 = 0,99951; \quad B_1 = 0,01359; \quad B_2 = -0,69498; \quad B_3 = -0,11133; \quad B_4 = -0,56447; \\ B_5 = -0,20156.$$



0/478

Необхідно відзначити значні дослідження методу МТБ проведені І. Кісілем. В результаті роботи створеної І.Кісілем наукової школи було розроблено цілий ряд удосконалених залежностей для визначення ПН рідини на основі вимірних P_{\max} , $\Delta\rho$ та встановленого H [34].

Для визначення ПН за допомогою (1.2 ÷ 1.9), крім вимірювання P_{\max} попередньо необхідно виміряти різницю густин рідини та газу $\Delta\rho$, радіус капіляра r , а також (з метою визначення гідростатичного тиску на меніск) встановити глибину занурення капіляра H . Гідростатичний тиск можна не визначати, якщо два капіляри з різними радіусами r_1 та r_2 встановити на однаковій глибині, як було вперше запропоновано у методі С. Сагдена, який є модифікацією методу МТБ [35], тоді ПН рідини σ буде визначатися так:

$$\sigma = \frac{P_{\max 1} - P_{\max 2}}{2\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right)}, \quad (1.11)$$

де $P_{\max 1}$, $P_{\max 2}$ – виміряні значення максимального тиску у бульбашках для першого і другого капілярів, відповідно; x_1 , x_2 – ефективні радіуси кривизни менісків у моменти максимальних тисків у бульбашках при їх утворенні із 1-го і 2-го капілярів, які знаходять за допомогою таблиць С. Сагдена [30].

У випадку встановлення на однаковій глибині двох капілярів з різними радіусами, враховуючи вираз (1.1), ПН рідини σ визначається так:

$$\sigma = \frac{P_{\max 1} - P_{\max 2} - \Delta\rho g(z_{o1} - z_{o2})}{2\left(\frac{1}{R_{o1}} - \frac{1}{R_{o2}}\right)}, \quad (1.12)$$

де R_{o1} і R_{o2} – радіуси кривизни менісків для першого та другого капілярів. Таким чином, різниця гідростатичних тисків $\Delta\rho g(z_{o1} - z_{o2})$ через різницю висот менісків для капілярів різного радіусу у виразі С. Сагдена (1.11) нехтується, а R_{o1} і R_{o2} приймаються рівними внутрішнім ефективним радіусам відповідних капілярів, тобто $R_{o1} \approx x_1$ та $R_{o2} \approx x_2$.

Пізніше С. Сагден вводить в рівняння (1.11) калібрувальний коефіцієнт C ,

який отримується при вимірюванні ПН відомої рідини, а також додатковий емпіричний коефіцієнт k_2 , який враховує несферичність меніска, тоді (1.11) записується так [35]:

$$\sigma = C(P_{\max 1} - P_{\max 2}) \left(1 + \frac{k_2}{P_{\max 1} - P_{\max 2}} \right). \quad (1.13)$$

Ідея С.Сагдена була розвинена іншими авторами [36 ÷ 41], котрі розробили пристрої для реалізації власних модифікацій методу С. Сагдена. Д. Росом було доведено, що методична похибка при вимірюванні ПН чистих рідин на основі виразу (1.13) не перевищуватиме 0,5% [42].

В той же час В. Файнерман та його співавтори доводять, що використання методу С. Сагдена є виправданим тільки для чистих рідин або висококонцентрованих розчинів ПАР, оскільки при вимірюванні ДПН інших розчинів ПАР дуже складно забезпечити рівність часових параметрів ДПН та гарантувати рівність вимірюного ПН рідин для обох капілярів, яка допускається у (1.11 ÷ 1.13) [43]. Наближене значення гідростатичного тиску можна отримати, використовуючи і один капіляр, як реалізовано у приладі Т60 (SITA, Німеччина), або як додаткова функція у приладі МРТ2 (Lauda, Німеччина) [44, 45].

Крім урахування несферичності меніска та визначення гідростатичного тиску на меніск актуальною проблемою залишається процедура визначення достовірного моменту настання максимального тиску та часових параметрів ДПН у процесі утворення бульбашки.

Процес утворення бульбашки поділяється на два часові інтервали (рис. 1.3): період від початку формування меніска до досягнення максимального тиску у бульбашці, який прийнято називати часом існування поверхні меніска t_1 та інтервал часу між моментом досягнення максимального тиску у бульбашці та моментом відриву бульбашки з капіляра – часом схлопування поверхні меніска t_d [19, 46, 47]. Сума згаданих часових інтервалів складає часовий відрізок між двома послідовними бульбашками t_b , тобто $t_b = t_1 + t_d$.

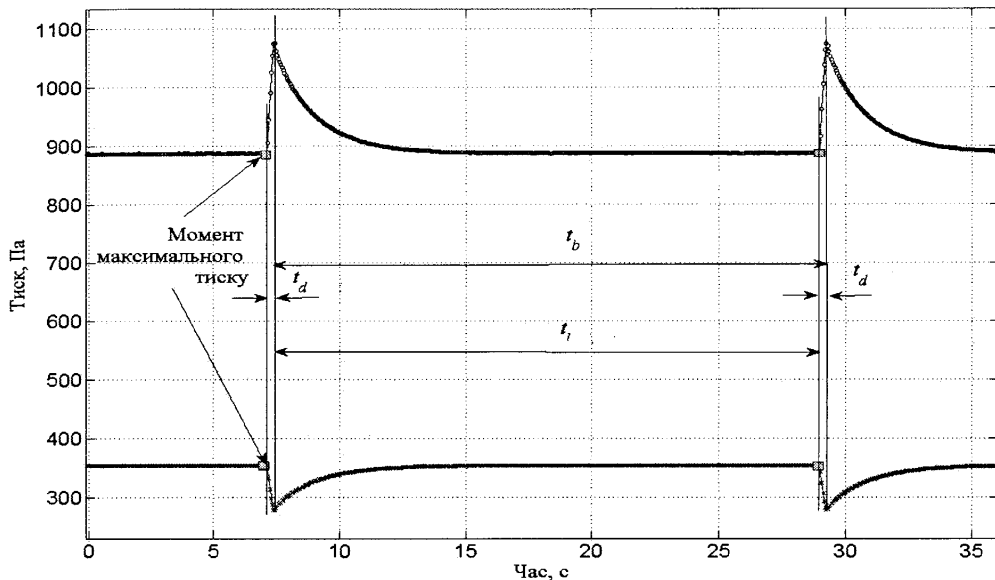


Рис. 1.3. Часові залежності тиску (нижня крива) у вимірювальній камері приладу та перепаду тиску газу через систему приладу (верхня крива) при утворенні бульбашок

Відомі методи визначення часових параметрів ДПН (параметрів t_1 і t_d) та достовірного моменту настання максимального тиску у процесі його вимірювання можна класифікувати так:

- методи фіксації моменту утворення бульбашки за допомогою апаратних систем (акустичної, фотоелектричної, електродної систем чи апаратним компаратором за різким падінням тиску у момент утворення бульбашки) і запис значення максимального тиску до цього моменту (реалізований в приладах ППНЛ-1 (Україна), МРТ1 та МРТ2 (Lauda, Німеччина)), які дозволяють визначити лише t_b та ускладнюють конструкцію приладу додатковими апаратними елементами;

- метод прямого аналізу часової кривої тиску у вимірювальній камері приладу [45, 46] (реалізований у приладах Т60 (SITA, Німеччина) та ВР2 (Kruss, Німеччина)), який дозволяє визначити t_d , t_1 і t_b та не потребує додаткових апаратних елементів. Проте при застосуванні цього методу виникають труднощі при визначенні моменту максимального тиску та часових параметрів ДПН у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска і при великих об'ємах

вимірювальної системи приладу. При великих об'ємах падіння тиску при утворенні бульбашки не перевищуватиме 0,5% від максимального тиску [45, 46]. Проблема визначення P_{\max} за цим методом виникає також при зашумленому сигналі від давача тиску газу, що може привести до невірної визначення моменту P_{\max} через те, що виміряне максимальне значення тиску не завжди відповідає моменту перед схлопуванням бульбашки (рис. 1.4);

- метод прямого аналізу часової кривої витрати газу через систему (запропоновано В. Файнерманом та реалізовано в приладі ВРА-1Р (Sinterface, Німеччина)), який здатний визначати t_d , t_1 та t_b , в т.ч. і в короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска, а також практично не залежить від об'єму вимірювальної системи [45, 46]. Його перевагою також є те, що амплітуда перепаду витрати газу (або перепаду тиску газу через систему, рис. 1.3) при утворенні бульбашки є вищою, ніж амплітуда тиску газу у камері. Проте для цього методу додатково необхідно вимірювати витрату газу. Крім того, при наявності зашумленого сигналу від давача витрати газу також виникатимуть труднощі визначення точного моменту максимального тиску у бульбашці.

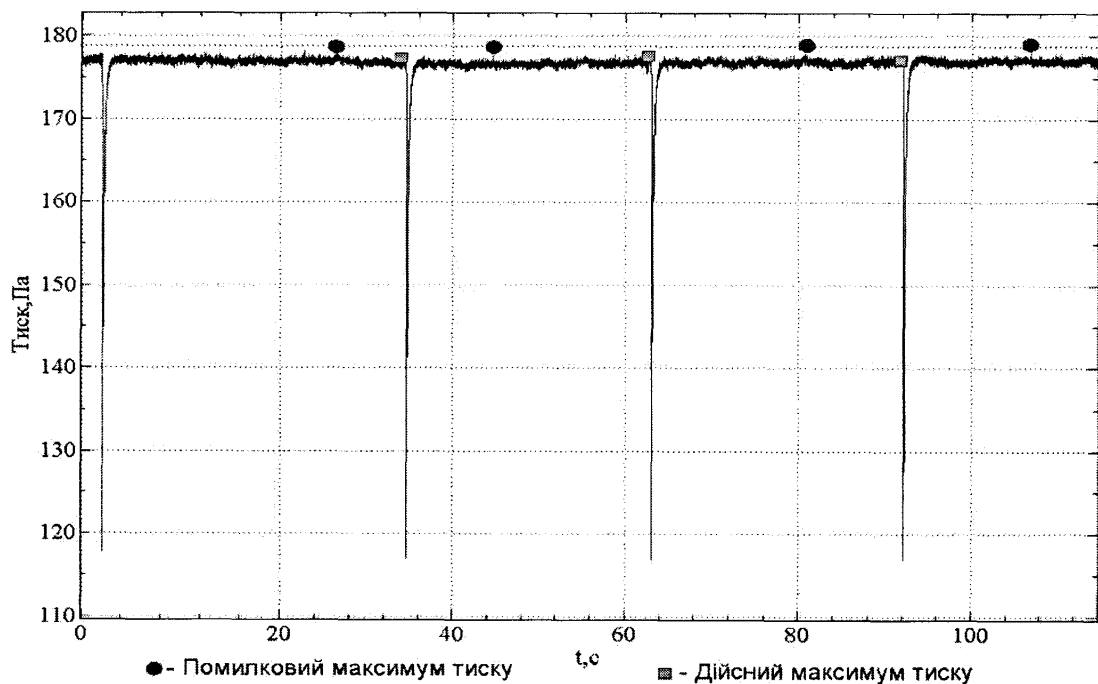


Рис. 1.4. Визначення моменту досягнення максимального тиску у бульбашці шляхом прямого аналізу залежності тиску у камері від часу

1.3 Відомі прилади для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці і їх аналіз

Науковцями були здійснені численні спроби практичної реалізації пристроїв для дослідження ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці. Запропоновані ними пристрої можна розділити на однокапілярні та двокапілярні. Однокапілярні пристрої для вимірювання ПН рідин є одними з найпростіших щодо реалізації процедури вимірювання і в залежності від способу створення заданого тиску газу у меніску поділяються на установки, в яких використовується або джерело надлишкового тиску газу, або пристрій для створення відповідного розрідження газу – аспіратор [29]. Останні базуються на створенні меншого (розрідженого) тиску у посудині по відношенню до тиску у камері приладу, внаслідок чого у досліджуваній рідині утворюються бульбашки. Проте вони не отримали подальшого розвитку у зв'язку із складністю реалізації у такій вимірювальній системі як джерела стисненого газу, так і джерела розрідження газу, а також труднощами забезпечення стабільності їх сумісної роботи і герметичності посудини з досліджуваною рідиною та вимірювальної камери приладу.

Серед перших однокапілярних приладів з використанням стиснутого газу слід відмітити прилад Д. Паддея [48], в якому необхідний тиск для утворення бульбашок створювали механічним стисненням гумового балона з газом. Вимірювання максимального тиску при утворенні бульбашки із капіляра проводили U-подібним манометром. Радіуси внутрішніх отворів використовуваних капілярів були меншими 0,1 мм. Досліджувану рідину розміщували у посудині, яку піднімали і опускали на відповідному столику з метою занурення капіляра на певну глибину. Для цього використовували спеціально підвішену голку, віддаль від якої до нижнього торця капіляра була наперед визначена. У результаті утворення бульбашки при стискуванні гумового балона на основі показів U-подібного манометру за таблицями С. Сагдена [30] знаходили ПН рідини σ .

З сучасніших пристроїв варто відзначити однокапілярний прилад ППНЛ-1,

розроблений І.Кісілем [29]. Його особливістю є створення стабільного тиску у камері за допомогою компресора та стабілізаційного блоку. Встановлення величини тиску у приладі ППНЛ-1 здійснюється за допомогою прецизійного змінного механічного дроселя шляхом відведення надлишкового тиску газу через нього в атмосферу. Фіксація моменту утворення бульбашки виконується електричним компаратором за допомогою фіксації різкої зміни напруги та наступним запуском апаратного таймера, який реєструє період часу між бульбашками. Величина максимального тиску відповідає максимуму зафіксованого значення напруги. Занурення капіляра у рідину, яка знаходиться у термостабілізованій посудині, здійснюється за допомогою прецизійної механічної системи строго вертикально на глибину 2 мм. Розрахунок ПН σ рідини здійснюється мікроконтроллером за такою залежністю:

$$\sigma = r(P_{\max} - \Delta\rho gH) \sum_{i=0}^n S_i (\Delta\rho g r / (P_{\max} - \Delta\rho gH))^i, \quad (1.14)$$

де S_i – постійні коефіцієнти, значення яких наведені у [29]. Даний прилад характеризується наявністю складної механічної системи занурення капіляра у рідину та необхідністю попереднього вимірювання густини цієї рідини. У ньому не враховується пневматичний опір елементів вимірювальної схеми приладу при вимірюванні ДПН рідин. Приведена до діапазону похибка вимірювання ПН рідин приладом ППНЛ-1 становить 1,5%.

Однокапілярний прилад МРТ-1 (фірма Lauda, Німеччина) має схожу із приладом ППНЛ-1 конструкцію. Його характерними особливостями є застосування двох давачів тиску, один з яких використовується для визначення витрати газу через систему з метою врахування пневматичного опору вимірювального капіляра. На відміну від ППНЛ-1, в МРТ-1 для детектування моменту утворення бульбашки, а також фіксації її об'єму застосовується дефлектор та акустична система. Дефлектор складається з електрода, або гострого металевого елемента. Відстань від дефлектора до нижнього торця капіляра d_{bk} , яка повинна бути приблизно рівною критичному діаметру бульбашки, розраховується, виходячи з балансу капілярних сил і сил виштовхування за

формулою [19]:

$$d_{bk} = \left(\frac{12r\sigma}{\Delta\rho g} \right)^{1/3}. \quad (1.15)$$

Система з електродом використовується для електропровідних розчинів ПАР, якими є розчини на водній основі. Для діелектричних розчинів ПАР використовується акустична система фіксації моменту утворення бульбашки за допомогою мікрофона [49, 50], що реєструє звук утворення бульбашки. Також з цією метою В. Файнерманом пропонувався кондуктометричний [51], Д. Клаубеком – стробоскопічний [52], а Р. Као – фотоелектричний методи фіксації моменту утворення бульбашок [53].

Фіксування віддалі від омбілічної точки меніска до торця капіляра z_0 за допомогою дефлектора та допущення $R_0 = r$ дозволяє при визначенні ПН рідини скористатися простою формулою Лапласа [54]:

$$\sigma = f \frac{P_{\max} \cdot r}{2}, \quad (1.16)$$

де f – коефіцієнт, що враховує несферичність бульбашки у момент максимального тиску P_{\max} (для капілярів з внутрішнім радіусом $r \leq 0,1$ мм приймається за одиницю). У приладі МРТ1 [50] передбачено використання саме таких вимірювальних капілярів довжиною 10 мм, радіус яких є в діапазоні $0,07 \div 0,08$ мм. Для визначення відстані d_{bk} у (1.15) необхідно оцінити σ , що вносить вклад в похибку його визначення, оскільки замала відстань d_{bk} приведе до обмеження росту бульбашки та досягнення передчасного максимального тиску в ній, а завелика відстань d_{bk} не гарантуватиме сталість z_0 . Розрахунок ПН рідини σ при використанні приладу МРТ1 здійснюється на основі такої залежності:

$$P_{\max} = 2\sigma/r + \Delta\rho gH + \Delta p, \quad (1.17)$$

де Δp – різниця густин досліджуваної рідини та газу; H – глибина занурення капіляра у досліджувану рідину; Δp – додатковий перепад тиску, зумовлений пневматичним опором капіляра при русі через нього повітря і досліджуваної

рідини при утворенні бульбашки на його торці.

Слід також відзначити однокапілярні прилади МРТ2 (Lauda, Німеччина) та ВРА-1Р (Sinterface, Німеччина) [46]. Їх особливістю є великий об'єм вимірювальної камери близько $V_s \approx 35 \div 40$ мл, що дає можливість реалізації методу зупиненого потоку для вимірювання ПН рідин [54]. Даний метод дозволяє будувати криву ДПН рідини від долі секунди до 100 с. З метою збільшення кількості точок кривої ДПН в згаданому інтервалі використовуються нагрівальні елементи Пельте [46]. Перевагою даного методу над традиційним генеруванням бульбашок при постійній подачі газу від компресора до вимірювального капіляра, як здійснюється в ППНЛ-1 та МРТ-1, є мінімізація нестабільності тиску у камері через відсутність впливу «шуму» компресора (певна нестабільність тиску буде все ж присутньою, оскільки системі необхідний певний час на стабілізацію тиску газу у вимірювальній камері після відриву кожної бульбашки), а недоліком – необхідність забезпечення строгої герметичності вимірювальної системи, що конструктивно досягнути досить складно. V_s у такій системі приймається сталою, оскільки остання приблизно у 10250 разів є більшою за об'єм бульбашки, яка відривається (при об'ємі вимірювальної камери $V_s = 40$ мл та об'ємі бульбашки $V_b = 2$ мм³, які використовуються в МРТ2). Об'єм бульбашки фіксується за допомогою дефлектора. Найкращі результати одержані при об'ємі $V_s = 100 \div 500$ мл [45]. Негативною стороною таких великих об'ємів системи $V_s \geq 20$ мл [45] є інерційне формування цілої серії бульбашок замість однієї, а також більший обсяг піноутворення [19], що ускладнює їх використання для дослідження ПН БР людини. Особливістю приладу МРТ-2 також є застосування спеціальної процедури визначення часових параметрів ДПН, яка базується на визначенні критичної точки переходу від режиму потоку до режиму генерування бульбашок [45]. Ця процедура також може бути застосована для наближеного визначення гідростатичного тиску на бульбашку. Так, у праці [45] наводиться залежність співвідношення тиск – витрата у цій критичній точці і величини гідростатичного тиску на бульбашку. Проте точність визначення цієї критичної

точки може бути недостатньою для визначення гідростатичного тиску на бульбашку [45].

Особливістю однокапілярного приладу ВРА-1Р [46] є те, що в ньому вперше реалізовано процедуру визначення моменту максимального тиску шляхом прямого аналізу кривої витрати газу через систему, що забезпечує більшу точність його визначення у порівнянні з методом прямого оброблення кривої тиску та не залежить від об'єму вимірювальної камери приладу.

Занурення капіляра у рідину у приладі ВРА-1Р, а також у ППНЛ-1, МРТ2 (Lauda, Німеччина), ВР2, ВР100 (Kruss, Німеччина) проходить у два етапи: спочатку механічна (в ВРА-1Р, ППНЛ-1 та МРТ2) чи пневматична система (в ВР2 та ВР100) опускає капіляр до моменту дотику його нижнього торця до поверхні рідини (вказане положення капіляра встановлюється візуально, або за фактом стрибка тиску у вимірювальній камері приладу), а потім капіляр з високою точністю занурюється на задану глибину (наприклад, в приладі ВРА-1Р глибина занурення встановлюється в діапазоні від 2 до 20 мм з похибкою $\pm 0,1$ мм). На точність встановлення глибини, а отже і визначення гідростатичного тиску, впливає похибка визначення моменту дотику нижнього торця капіляра до поверхні рідини у зв'язку з інерційними властивостями опускаючого капіляр механізму (автоматичного, чи ручного з участю оператора), наявність піни на поверхні розчину ПАР, залишків рідини на торці капіляру, впливу зовнішнього середовища, а також похибка опускання капіляра на задану глибину через згадану інерційність механізму та зношування механічних частин у процесі експлуатації приладу. В [45] вказується, що похибка встановлення глибини занурення в $\pm 0,3$ мм веде до похибки визначення ПН рідини не більше 0,5%. Разом з тим, із зростанням радіусу вимірювального капіляра i , відповідно, із зменшенням значення максимального тиску вплив цієї похибки на точність визначення ПН рідини суттєво зростатиме. В однокапілярному приладі Т60, як було зазначено вище, наближене значення гідростатичного тиску визначається без встановлення глибини занурення капіляра H . При цьому застосовується поєднання малого об'єму вимірювальної системи V_s ($V_s < 4$ мл) та великого радіусу капіляра $r \geq 0,5$

мм. Це веде до малого співвідношення V_s/V_b (V_b – об'єм бульбашки) та великого радіусу бульбашки, яка відривається від капіляра. Мінімальне значення вимірюваного тиску приймається приблизно рівним гідростатичному тиску ($P_{\min} \approx P_{\text{hydrostat}}$), оскільки у вимірювальній системі за таких умов відбувається значне падіння тиску, а його мінімальне значення P_{\min} не може бути меншим за $P_{\text{hydrostat}}$, бо в іншому випадку формування і відокремлення бульбашок було б неможливим [45]. Значне падіння тиску також дозволяє чітко розділити фази формування бульбашки. В той же час С. Лилик [55] доводиться, що поєднання малого об'єму вимірювальної системи V_s та великого радіусу капіляра r веде до значної похибки у визначенні ПН розчинів ПАР у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска, оскільки за відокремленням бульбашки настає суттєве проникнення рідини у середину капіляра, навіть, якщо його внутрішня поверхня гідрофобізована. Також при використанні капілярів з $r > 0,1$ мм необхідно враховувати несферичність бульбашки, що створює додаткову похибку визначення ПН розчинів ПАР.

Крім об'єму вимірювальної системи та способу визначення моменту максимального тиску результати дослідження ДПН залежать від правильного вибору радіусу, довжини, матеріалу, гідрофобного чи гідрофільного покриття зовнішньої та внутрішньої поверхонь вимірювального капіляра. Про важливість даних параметрів свідчить ряд проведених у цьому напрямку досліджень [56 ÷ 63].

Слід також відзначити вплив в'язкості рідини на вимірний ПН. Останній враховується відповідними поправками, запропонованими Р.Као [53], проте ці поправки виконані в статичних умовах, а отже її використання при визначенні ДПН рідини слід чітко обґрунтовувати [46]. Технічні характеристики сучасних однокапілярних приладів приведені в табл. 1.1.

Також необхідно відзначити успішні однокапілярні прилади, розроблені П. Пугачевичем [64 ÷ 65], І. Танутровим, С. Апетауером і М. Маршаком, В. Красавіним.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики приладів сучасних однокапілярних приладів

Назва параметра	Діапазон зміни									
	ІШНЛІ-1	МРТ2	ВРА-1Р	Т60/2	ВР100	Dynotester	F10	RocketDyne	ВР2	
Діапазон вимірювання поверхневого натягу, мН/м	15 – 75	10 – 100	10 – 100	10 – 100	10 – 100	15 – 100	15 – 80	10 – 199	10 – 100	
Роздільна здатність, мН/м	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Температура рідини, °С	20 – 95	0 – 90	20	-3 ÷ 130	-10 ÷ +100	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100	-10 ÷ 100	
Інтервал часу між бульбашками	3 – 5999с	0,1 – 5000с	10мс – 10с	30мс – 60с	5мс – 100с	15 – 15000мс	40 – 1000мс	15–1500мс	5мс–30с	
Габаритні розміри, мм	300×300×340	340×240×105	150×180×300	–	300×540×320	65×250×30	–	62×260×35	250×450×300	
Маса, кг	10	8	3	7,9	15	0,3	5,6	0,33	12,8	

До недоліків однокапілярного методу також можна віднести той факт, що при його застосуванні, наприклад, для екологічного чи технологічного контролю ПН рідини, може відбуватися зміна рівня рідини через її випаровування чи інші чинники, а цей метод не може виявити зміни рівня рідини, оскільки глибина занурення капіляра у ньому встановлюється, а не визначається.

З метою усунення необхідності встановлення глибини занурення капіляра С. Сагденом було розроблено двокапілярний прилад, визначення ПН рідини в якому здійснювалося за виразом (1.11) або (1.13). Визначення різниці максимальних тисків для обох капілярів С. Сагденом проводилося через вимірювання різниці висот рідини у манометричній трубці, що вимагало знання густини досліджуваної рідини. Тепер вимірювання тиску не здійснюється таким способом, проте у методі С. Сагдена не враховується різна висота бульбашок у зв'язку з відмінними радіусами капілярів, що вимагає урахування гідростатичного тиску досліджуваної рідини на них, а отже і її густини. Для визначення обох максимальних тисків у методі С. Сагдена капіляри включалися по черзі і при різному тиску, пневматичний опір капілярів з різним радіусом при цьому не враховувався. Методична похибка даного методу не перевищувала 0,5% [43].

У двокапілярному приладі Є. Єгера [34] капіляри встановлювалися на різних рівнях (один капіляр був рухомий) так, щоб бульбашки відривалися одночасно. В даному методі газ поступав в обидва капіляри одночасно і при одному тиску, а тоді при настанні максимального тиску у бульбашках визначалася різниця рівнів нижніх торців капілярів Δh . Його недоліками є складність упускання рухомого капіляра на відповідну глибину через інерційність механізму, неточність одночасного досягнення моменту максимального тиску в обох капілярах.

Величину ПН рідини розраховували за формулою:

$$\sigma = \frac{\rho_p g \Delta h}{2(1/x_1 - 1/x_2)}, \quad (1.18)$$

де ρ_p – густина досліджуваної рідини. Є. Куні і К. Вольф запропонували метод і

двокапілярний пристрій, у якому два капіляри різних радіусів занурюють на різні глибини, а розрахунок ПН σ рідини здійснюють шляхом розв'язку запропонованої ними системи рівнянь [66]. Пізніше цей метод удосконалили Д. Сміт і К. Шлейн. Її недоліками є необхідність встановлення глибини занурення капілярів та попереднього вимірювання густини рідини. Схожу методику та прилад пропонував Д. Клаубек [52].

Слід відзначити двокапілярний прилад П. Пугачевича [39], перевагою якого є можливість вимірювати ПН рідин малого об'єму 3 – 4 мл. У цьому приладі із капілярів з різними радіусами по чергово формують бульбашки і вимірюють манометричні висоти, які відповідають максимальним тискам у бульбашках при їх утворенні, а ПН рідини σ визначають методом послідовних наближень С. Сагдена [30]. Формування менісків на нижніх торцях капілярів здійснюють шляхом нагріву інертного газу у балоні, що зумовлює його розширення, збільшення тиску і веде до створення меніска на торці капіляра. До його недоліків слід віднести значну складність конструкції та необхідність попереднього вимірювання густини рідини. Слід відзначити, метод та двокапілярний прилад І. Танутрова [34], які базуються на використанні еталонної рідини з відомими густиною і ПН. Вона може бути використана для визначення густини і ПН рідини. Для цього обидва капіляри спочатку занурюють у еталонну рідину при різних глибинах, які змінюють, досягаючи ситуації, щоб при однакових максимальних тисках у менісках утворювалися бульбашки. Тоді ці капіляри занурюють в досліджувану рідину і, аналогічно, змінюють їх глибину занурення, щоб максимальні тиски при утворенні бульбашок із капілярів були такими ж, як і при утворенні бульбашок у еталонній рідині. Обидва капіляри можуть мати однаковий внутрішній радіус, тоді один капіляр використовують для еталонної рідини, а другий для досліджуваної рідини [34]. Її недоліками є складність конструкції приладу та процедури вимірювання, неточність встановлення одночасного досягнення моменту максимального тиску в обох капілярах.

Відомий також пневматичний дросельний мостовий пристрій для

вимірювання ПН рідин з використанням вимірювального капіляра радіусом r і барботажної трубки радіусом $r_{\text{барб.тр.}}$ [34]. Причому радіус вихідного отвору барботажної трубки повинен задовольняти умову $r_{\text{барб.тр.}} \geq 5r$. Торець барботажної трубки має знаходитися нижче торця вимірювального капіляра на величину $\Delta h = 2r/3$. Похибка вимірювання ПН рідини цим методом становить 1%, але даний метод не потребує попереднього визначення густини досліджуваної рідини і глибини занурення вимірювального капіляра при умові, що об'єм вимірювальної камери V_s – в сто разів є більшим за об'єм бульбашки V_b , яка утворюється із частотою $0,2 \div 0,5$ Гц. Визначення ПН рідини здійснюється за формулою [34]:

$$\sigma = \Delta P \frac{r}{2}, \quad (1.19)$$

де ΔP – різниця максимальних тисків у вимірювальних камерах, які підключені до капіляра та барботажної трубки. Недоліками цього методу та приладу є поява після утворення бульбашок стабілізаційних коливань тиску у вимірювальній камері з малим об'ємом, неврахування впливу гідростатичного тиску на бульбашки різної висоти. Слід також відзначити успішні удосконалення методу С. Сагдена здійснені Е. Вареном [38], П. Беловим [40], К. Ланкейхеймом [41], Д. Россом [42] та Р. Рацюком і Д. Велмслеєм [67].

Спільним недоліком всіх описаних двокапілярних приладів, які базуються на методі С. Сагдена також є неспроможність дотримання умови рівності ПН ($\sigma = \text{const}$) для капілярів з різним радіусом у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска [43]. Щоб дотриматись умови $\sigma = \text{const}$ у методі С. Сагдена чи його модифікаціях необхідно не тільки забезпечити рівність періоду між бульбашками t_b або часу існування поверхні меніска t_1 , але й рівність t_d для обох капілярів, що експериментально досягнути дуже складно [43].

Слід окремо відзначити великий вклад в розвиток методу МТБ К. Муселса [59, 68 ÷ 70], а також В. Ковальчука, В. Файнермана, Р. Міллера, А. Макієвського, С. Дукіна. Результатом їх досліджень стали практичні рекомендації щодо оптимального вибору об'єму вимірювальних камер приладів, методів визначення

часових параметрів ДПН та характеристик вимірювальних капілярів (радіусу, довжини, матеріалу, покриття внутрішньої та зовнішньої поверхонь капіляра), а також практичні реалізації технічних засобів, що базуються на результатах їхньої роботи [45, 46, 49, 50, 51, 54, 55, 58, 60, 63]. Слід відмітити, про початок в 2012 р. співпраці між науковими школами В.Файнермана та І.Кісіля з метою подальшого удосконалення методів та приладів дослідження ПН рідин.

Обґрунтування і вибір напрямку дослідження

З урахуванням вищенаведеного можна стверджувати, що застосування методу МТБ для автоматизованого дослідження ПН однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР та БР людського організму є повністю обґрунтованим. Слід відзначити активний прогрес в удосконаленні методу МТБ від початку його розроблення в 1851 р. і до сьогодні. Проте залишається ряд наукових проблем при застосуванні методу МТБ у промислових, а також у медичних цілях. До них слід віднести: необхідність мінімізації похибки визначення ПН рідин через несферичність меніска у момент максимального тиску у бульбашці; необхідність попереднього вимірювання густини досліджуваної рідини; потреба у точному зануренні вимірювального капіляра на задану глибину цієї рідини; необхідність врахування впливу пневматичних опорів елементів приладу на виміряні максимальні тиски у бульбашках, які утворюються на нижніх торцях капілярів із різними радіусами, а також труднощі визначення моменту максимального тиску та часових параметрів ДПН у процесі його вимірювання.

Отже, враховуючи зазначене, метою досліджень дисертаційної роботи є розроблення удосконалених методів визначення ПН рідин за максимальним тиском у бульбашці, які зможуть вирішити зазначені проблеми, що дозволить підвищити точність результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР.

Відповідно до поставленої мети задачі дисертаційної роботи є такими:

- розробити удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР із застосуванням трьох капілярів;

- розробити удосконалену процедуру визначення моментів максимальних тисків у процесі їх вимірювання;
- розробити та виготовити трикапілярний пристрій для автоматизованого дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;
- розробити методики урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, що утворюються із трьох капілярів;
- здійснити метрологічний аналіз розроблених методів і трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;
- провести лабораторні і натурні випробування трикапілярного пристрою для дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПАР ЗА МАКСИМАЛЬНИМ ТИСКОМ У БУЛЬБАШЦІ

З метою розроблення удосконалених методів визначення ПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці на межі контакту рідина-газ, в яких була б мінімізована похибка внаслідок несферичності меніска у момент максимального тиску у бульбашці, а також усунута необхідність прецизійного занурення капілярів на задану глибину у досліджувану рідину та потреба у вимірюванні густини цієї рідини, у першу чергу, слід здійснити розрахунок геометричних параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці та проаналізувати процес його досягнення.

Отримані в результаті залежності в подальшому дадуть можливість розробити удосконалені методи визначення ПН рідин і розчинів ПАР за максимальним тиском у бульбашці без зазначених недоліків.

2.1 Методика фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска у цей момент

Для вирішення поставленої задачі розглянемо осесиметричну поверхню меніска, що утворюється з отвору ножового, направлено вертикально вниз капіляра (рис 1.2). Згідно основного рівняння капілярності, яке отримано Т. Юнгом і П. Лапласом у 1805 р. [26], перепад тиску у довільній т. A буде таким:

$$\Delta P_A = P_{1A} - P_{2A} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.1)$$

де P_{1A} , P_{2A} – тиски в т. A усередині та зовні бульбашки, відповідно ($P_{1A} > P_{2A}$); R_1 , R_2 – головні радіуси кривизни осесиметричної поверхні меніска,

відповідно (рис. 2.1).

Надлишкові гідростатичні тиски на рівні т. A усередині та зовні бульбашки є такими:

$$P_{1A} = P_{10} - \rho_1 g z, \quad (2.2)$$

$$P_{2A} = P_{20} - \rho_2 g z, \quad (2.3)$$

де P_{10} , P_{20} – тиски в омбілічній т. O усередині та зовні бульбашки, відповідно; ρ_1 , ρ_2 – густини газу у бульбашці і досліджуваної рідини поза нею, відповідно; g – прискорення вільного падіння; z – відстань по вертикалі від т. O до т. A .

Перепад «лапласового» тиску ΔP_o у т. O згідно формули (2.1) є таким:

$$\Delta P_o = P_{10} - P_{20} = \frac{2\sigma}{R_o}, \quad (2.4)$$

де R_o – радіус кривизни поверхні меніска у т. O (у т. O $R_o = R_1 = R_2$). Віднявши вирази (2.3) від (2.2), а також, врахувавши (2.1) та (2.4), можна записати:

$$\frac{2\sigma}{R_o} + \Delta\rho g z = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.5)$$

де $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$.

Тиск вимірюється не в самій бульбашці, оскільки конструктивно це неможливо, а на деякому рівні B . Рівень B є умовним позначенням точки вимірювання тиску у вимірювальній камері приладу. Тиск P_{1B} на рівні B буде менший за тиск P_{10} на величину:

$$P_{10} - P_{1B} = \rho_1 g (L + H + z_o), \quad (2.6)$$

де L – відстань від поверхні рідини до рівня B ; H – глибина занурення капіляра у досліджувану рідину; z_o – відстань від торця капіляра до омбілічної точки меніска (т. O). Тиск ззовні капіляра P_{2B} є менший за P_{20} на величину:

$$P_{20} - P_{2B} = \rho_2 g (H + z_o). \quad (2.7)$$

З урахуванням формул (2.6) і (2.7) перепад тиску на рівні B між капіляром і зовнішнім середовищем є таким:

$$\Delta P_C = P_{1B} - P_{2B} = \frac{2\sigma}{R_o} + \Delta\rho g(H + z_o). \quad (2.8)$$

При умові однакових газових середовищ всередині і ззовні капіляра ця різниця тиску не залежить від положення рівня B над поверхнею досліджуваної рідини, тобто від L . У момент максимального тиску у бульбашці перепад тиску буде максимальним, тобто:

$$P_{\max} = \Delta P_B = \frac{2\sigma}{R_o} + \Delta\rho g(H + z_o). \quad (2.9)$$

З (2.9) можна отримати відомий вираз для визначення ПН рідини σ :

$$\sigma = \frac{R_o}{2} (P_{\max} - \Delta\rho g(H + z_o)). \quad (2.10)$$

Як було зазначено у попередньому розділі, значення P_{\max} , $\Delta\rho$, g і H можуть бути визначеними чи вимірними, а R_o і z_o , які залежать від радіусу капіляру та властивостей рідини, піддаються вимірюванню лише за допомогою швидкісної відеотехніки, але це веде до значних ускладнень і не є виправданим у більшості практичних випадків.

З метою пошуку залежностей, що дозволять усунути згадані параметри з виразу (2.10) потрібно здійснити математичний опис меніска у момент максимального тиску у бульбашці [1].

З цією метою слід перейти до відомої безрозмірної форми системи нормальних диференціальних рівнянь капілярності, що описують геометричні параметри поверхні меніска, оскільки саме у безрозмірній формі можливо знайти необхідні залежності параметрів R_o та z_o від величин, які вимірюються в експерименті. Для цього поділимо рівняння (2.5) на ПН рідини σ і введемо величину капілярної сталої a^2 ($a^2 = \sigma / \Delta\rho g$). В такому випадку, можна записати вираз:

$$\frac{2}{R_o} + \frac{z}{a^2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (2.11)$$

Головний радіус кривизни R_1 кривої, утвореної меридіальним перерізом і

осесиметричною поверхнею (рис. 2.1), визначається так:

$$R_1 = \frac{dl}{d\varphi}, \quad (2.12)$$

де l – довжина дуги твірної меридіального перерізу (рис. 2.2); φ – кут нахилу дотичної меридіана до осі абсцис. Другий головний радіус кривизни меніска R_2 можна визначити через радіус кривизни паралелі. Радіус кривизни кола паралелі рівний радіусу його кола, тобто x . З трикутника EAF (рис. 2.1) видно, що

$$R_2 = \frac{x}{\cos(\pi/2 - \varphi)} = \frac{x}{\sin \varphi}. \quad (2.13)$$

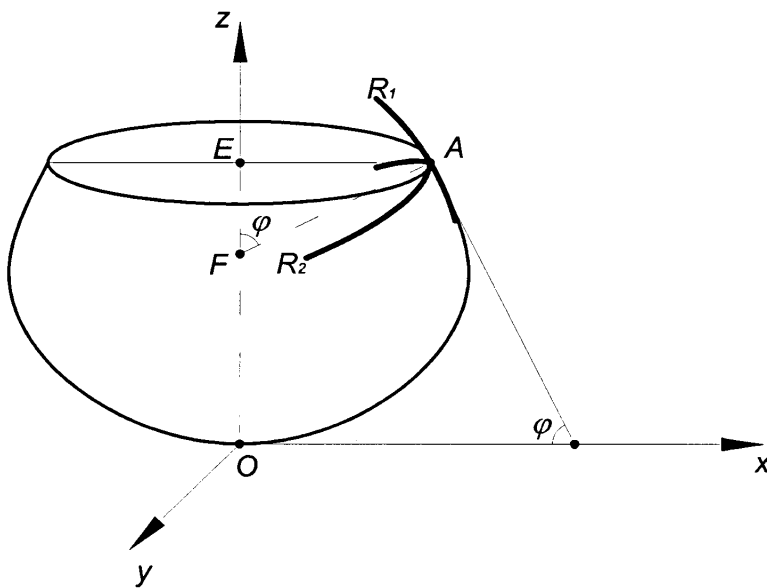


Рис. 2.1. Визначення радіусів кривизни меніска

Підставимо (2.12) і (2.13) у вираз (2.11) і отримаємо, що

$$\frac{2}{R_o} + \frac{z}{a^2} = \frac{d\varphi}{dl} + \frac{\sin \varphi}{x}. \quad (2.14)$$

Щоб перейти до безрозмірних змінних $\overset{*}{x}$, $\overset{*}{z}$, $\overset{*}{l}$ проведемо такі заміни [1]:

$$\overset{*}{x} = \frac{x}{R_o}, \quad \overset{*}{z} = \frac{z}{R_o}, \quad \overset{*}{l} = \frac{l}{R_o}. \quad (2.15)$$

Зазначимо, що кут нахилу дотичної меридіана до осі абсцис φ ідентичний своїй безрозмірній формі. Введемо безрозмірний параметр β , що повністю визначає безрозмірну поверхню меніска:

Щоб уникнути виникнення невизначеності при діленні на нуль у другому рівнянні системи (2.19) при вказаних початкових умовах ($\dot{x} = 0$), за початкове значення \dot{x} приймемо мінімальне дійсне значення числа з «плаваючою» точкою на персональному комп'ютері, що становить $2,23 \cdot 10^{-308}$. Для спрощення розрахунку, приймемо, що вимірювальний капіляр тільки торкається до поверхні рідини, тобто $H = 0$ і поділимо рівняння (2.9) на $\Delta \rho g R_o$. При зануренні даного капіляра на глибину H до вимірюваного тиску додається складова гідростатичного тиску рідини на газ в капілярі, проте вона є постійною для даної глибини H , а отже не впливає на результат розв'язку системи (2.19). Таким чином, отримаємо величину безрозмірного максимального тиску P_{\max}^* [1]:

$$P_{\max}^* = \frac{P_{\max}}{\Delta \rho g R_o} = \frac{2}{\beta} + z_o^* \quad (2.20)$$

Параметр \dot{z} у системі рівнянь (2.19) – це поточна безрозмірна вертикальна координата точки на поверхні меніска при певному тиску (в т.ч. максимальному), а параметр z_o^* у рівнянні (2.20) – це відстань від т. O до нижнього торця капіляра по вертикалі («висота» меніска). У процесі розрахунку безрозмірного максимального тиску у бульбашці на відповідному від омбілічної т. O рівні у вираз (2.20) замість z_o^* необхідно підставляти значення \dot{z} , яке відповідатиме значенням параметрів \dot{x} та ϕ згідно (2.19), тобто $z_o^* = \dot{z}$.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (2.19) разом із початковими умовами (2.18) дозволяє для будь-якого заданого параметру β визначити параметри меніска у будь-який момент його існування, в т.ч. і в момент максимального тиску у бульбашці.

З метою одержання параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці пропонується методика фіксації моменту досягнення максимального тиску P_{\max}^* у процесі побудови поверхні меніска у координатах її безрозмірних параметрів, які можна одержати, розв'язавши систему (2.19) [1÷3]. Суть даної

методики полягає у наступному. Для двох заданих параметрів β та $\beta + \Delta\beta$ ($\Delta\beta \ll \beta$) розраховують дві поверхні меніска від кута $\varphi = 0^\circ$ до досягнення кінцевою точкою кожної поверхні кута $\varphi = 180^\circ$. Поверхню меніска з параметром β вважають основною, а поверхню меніска з параметром $\beta + \Delta\beta$ вважають додатковою, тобто наступною у процесі росту меніска. Для розрахунку основної і додаткової поверхонь меніска достатньо здійснити побудову тільки профілів цих поверхонь, оскільки форма поверхні меніска є осесиметричною.

Координату абсцис додаткової поверхні меніска $x_{\text{дод.}}^*$ приводять до однакового масштабу безрозмірного параметру x^* основної поверхні меніска, який представляє собою безрозмірний радіус кромки ножового капіляра, на якій досягається максимальний тиск у бульбашці, за таким виразом:

$$x_{\text{дод.}}^* = x_{\text{дод.}} / R_{0\text{дод.}} = x_{\text{осн.}}^* / \sqrt{(\beta + \Delta\beta) / \beta}. \quad (2.21)$$

Забезпечення виконання умови (2.21) та наступне визначення $z_{\text{дод.}}^*$ для відповідного $x_{\text{дод.}}^*$ здійснюється шляхом застосування спеціального інтерполяційного методу «кубічними сплайнами» [79]. Згадане приведення масштабів повинне проводити уже для побудованих основного та додаткового профілів (криві 1 і 3 на рис. 2.3), оскільки покрокова побудова профілів обох менісків із сталим кроком інтегрування для точного виконання умови (2.21) вимагає дуже малого кроку інтегрування, що непомірно збільшує його тривалість. Покрокове ж інтегрування із поступовим зменшенням кроку в точках можливого максимального тиску (крива 2 на рис. 2.3) забезпечує точне виконання умови (2.21), проте через локальні зміни кроку інтегрування у точках можливого максимального тиску відбувається відхилення кривої додаткового профілю меніска від початкового, що створює додаткову методичну похибку визначення моменту максимального тиску (різниця по координаті z^* для кривих 1 і 2 на рис. 2.3).

За формулою (2.20) розраховують значення безрозмірних тисків для

основної $P_{\text{осн}}^*$ та додаткової $P_{\text{дод.}}^*$ поверхонь меніска, котрі приводяться до одного масштабу та порівнюються між собою за виразом:

$$P_{\text{осн.}}^* > P_{\text{дод.}}^* \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}. \quad (2.22)$$

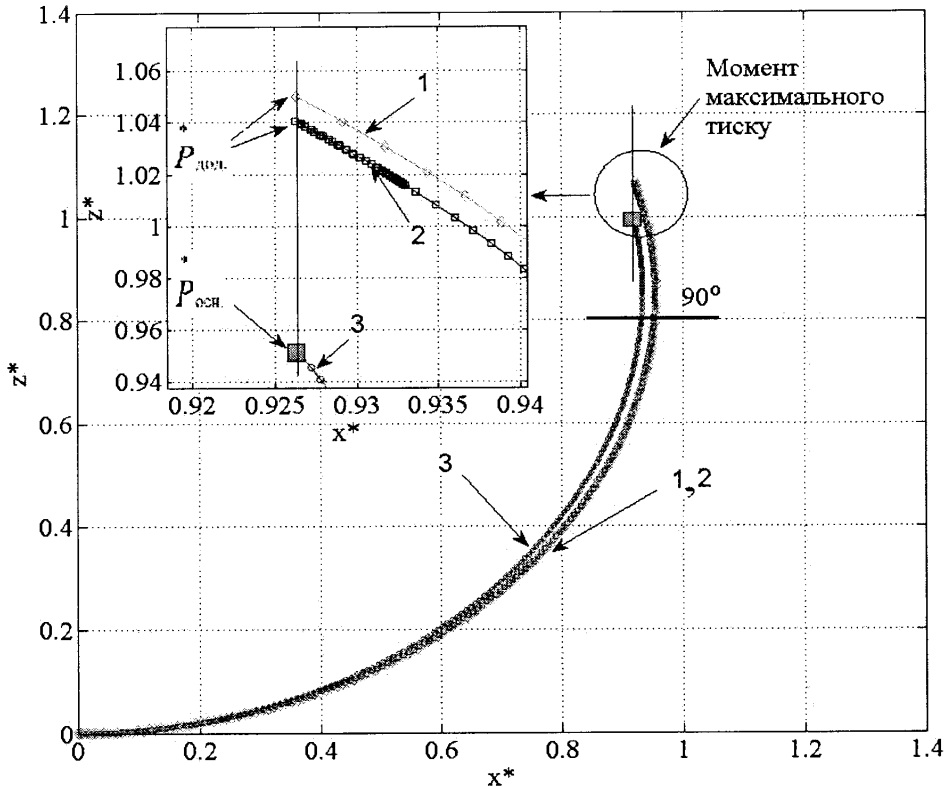


Рис. 2.3. Залежність z^* від x^* при непокроковому та покроковому пошуку моменту максимального тиску: 1, 2 – додаткові профілі меніска з однаковим і нерівномірним Δl , відповідно; 3 – основний профіль меніска з однаковим Δl

Як видно з формул (2.21) та (2.22), приведення геометричних розмірів додаткової поверхні меніска до однакового масштабу із основною поверхнею меніска здійснюється шляхом перемноження отриманих значень геометричних параметрів та відповідного тиску додаткової поверхні на коефіцієнт $\sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$. Правомірність такої процедури пояснюється тим, основний і додатковий профілі меніска моделюють дві стадії його росту в одній досліджуваній рідині, тобто значення капілярної сталої a^2 для двох поверхонь є однаковим. Для того, щоб поверхня меніска з іншим значенням параметру β , наприклад, $\beta + \Delta\beta$, мала місце

у рідині з таким же значенням капілярної сталої a^2 необхідно, щоб радіус кривизни такої поверхні меніска $R_{0\text{дод.}}$ визначався наступним співвідношенням:

$$\frac{R_0^2}{\beta} = \frac{R_{0\text{дод.}}^2}{\beta + \Delta\beta} = a^2, \text{ або} \quad (2.23)$$

$$R_{0\text{дод.}} = R_0 \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}. \quad (2.24)$$

Таким чином, при порівнянні параметрів основної та додаткової поверхонь меніска необхідно приводити параметри останньої до основної поверхні меніска шляхом їх перемноження на коефіцієнт $\sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$.

Визначення точки максимального тиску проводиться тільки серед точок, для яких кут $\varphi \geq 90^\circ$, оскільки, відомо, що лише при куті $\varphi \geq 90^\circ$ можливе досягнення моменту максимального тиску. Це пояснюється тим, що при такому куті φ , радіус кривизни меніска в омбілічній т. O досягає свого мінімального значення, а відповідно «лапласовий» тиск – максимуму. Момент максимального тиску (після якого бульбашка відривається) настає дещо пізніше, що спричинено складовою гідростатичного тиску на бульбашку, максимум якого настає після максимуму «лапласового тиску».

Якщо тиск $\dot{P}_{\text{дод.}}$ у рівнянні (2.22) буде меншим від тиску $\dot{P}_{\text{осн.}}$, то вважається, що момент досягнення максимального тиску для основного профілю меніска наступив, тоді його безрозмірні геометричні параметри \dot{x} , \dot{z} , φ будуть відповідати безрозмірному максимальному тиску $\dot{P}_{\text{осн.}}$. В іншому випадку досягнення умови (2.21) та перевірку умови (2.22) слід здійснити для наступної точки основного профілю меніска та повторювати зазначену процедуру до визначення моменту безрозмірного максимального тиску.

Побудову обох профілів проводять, використовуючи в якості змінного параметру безрозмірну довжину дуги \dot{l} з кроком $\dot{\Delta l} = 10^{-5}$, а також параметру $\Delta\beta = 2 \cdot \dot{\Delta l} \cdot \beta$, який визначає «крок» між двома стадіями росту меніска.

З метою значної оптимізації часу обчислень, крім описаної одноетапної

методики, пошук моменту максимального тиску пропонується проводити двоетапно: спочатку здійснити наближений пошук згаданого моменту з великим кроком інтегрування $\Delta l = 10^{-3}$ до кута $\varphi = 180^\circ$, а тоді повторно провести інтегрування обох профілів з кроком $\Delta l = 10^{-5}$ до кута $\varphi = \varphi_{\text{набл.}} + 3^\circ$, де $\varphi_{\text{набл.}}$ – значення кута точки попередньо визначеного наближеного моменту максимального тиску. При цьому на другому етапі процедуру приведення масштабів та пошуку моменту максимального тиску проводити лише в околі точки приблизного моменту максимального тиску, тобто для точок в інтервалі кута $\varphi_{\text{набл.}} - 3^\circ \leq \varphi \leq \varphi_{\text{набл.}} + 3^\circ$.

Використання запропонованої процедури дозволяє у безрозмірній формі визначити необхідні параметри меніска у момент максимального тиску у бульбашці. Проаналізувавши можливий діапазон зміни значень капілярних сталей однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР і БР людського організму $a^2 = (1 \div 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; радіуси комерційно доступних капілярів, на яких можуть знаходитися бульбашки у моменти максимальних тисків у них $r = (0,1 \div 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$; діапазон зміни радіусів кривизни менісків $R_0 \approx (0,1 \div 3,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ на кромках нижніх торців таких капілярів і скориставшись виразом (2.16), можна отримати, що при визначенні такими капілярами ПН рідин параметр β згідно (2.16) буде змінюватися у діапазоні від 0,001 до 10.

Розв'язок системи диференційних рівнянь (2.19) із знаходженням параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці не одержується аналітичним методом, проте піддається чисельним методам розрахунку систем диференційних рівнянь [71, 72]. Існує велика кількість чисельних методів розв'язку диференційних рівнянь, найвідоміший серед яких є однокроковий метод Рунге-Кутта. На базі цього методу розроблені різноманітні алгоритми, які дозволяють суттєво оптимізувати процес чисельного розрахунку [73, 74]. В даній роботі було вибрано алгоритм на базі методу Рунге-Кутта із змінним кроком 4(5) порядку (далі – РК(4,5)) [75]. Крім даного методу для розв'язку системи (2.19) може бути

використаний багатокроковий метод Адамса-Башфорта-Мултона [76], який оптимально підходить для інтегрування поверхні криволінійного меніска. Проте проведені дослідження показали, що використання методу Адамса-Башфорта-Мултона при однаковій встановленій з методом РК(4,5) максимальній допустимій похибці у кілька разів збільшує час розрахунку [17]. У даному випадку доцільно застосовувати саме метод РК(4,5). Блок-схема алгоритму розв'язку системи рівнянь (2.19) методом РК(4,5) або Адамса-Башфорта-Мултона із знаходженням параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці приведена на рис. 2.4.

Алгоритм розрахунку складається з таких блоків. Спочатку ініціалізують всі змінні, що будуть застосовуватись в обчисленнях (блок 1). Після цього встановлюють крок інтегрування профілів основної та додаткової поверхонь меніска dl^* та «відстань» між ними $\Delta\beta$ (блок 2). Далі для першого β з діапазону від 0,001 до 10 (блок 3) методом РК(4,5) чи Адамса-Башфорта-Мултона здійснюють розрахунок профілів основної та додаткової поверхонь меніска до кута 180° (блоки 4 і 5 відповідно).

Анулюють точки додаткового профілю меніска із значенням кута $\varphi_{\text{дод}} < 90^\circ$ (блок 6), оскільки для подальшої процедури пошуку координати додаткового профілю $z_{\text{дод}}^*$ потрібні лише монотонно зростаючі чи спадаючі значення $x_{\text{дод}}^*$. Пропускають усі точки основного профілю меніска із значенням кута $\varphi_{\text{осн}} < 90^\circ$, оскільки момент максимального тиску може наступити лише при куті $\varphi_{\text{осн}} \geq 90^\circ$ (блок 7).

Входять у цикл, у якому визначають точку, яка відповідатиме моменту максимального тиску із усіх точок основної поверхні меніска (блок 8). Шляхом сплайнової інтерполяції на основі розрахованих масивів значень $z_{\text{дод}}^*$ та $x_{\text{дод}}^*$ здійснюють розрахунок координати додаткового профілю $z_{\text{дод}}^*$, яка відповідатиме координаті $x_{\text{дод}} = x_{\text{осн}} / \sqrt{(\beta + \Delta\beta) / \beta}$ (блок 9).

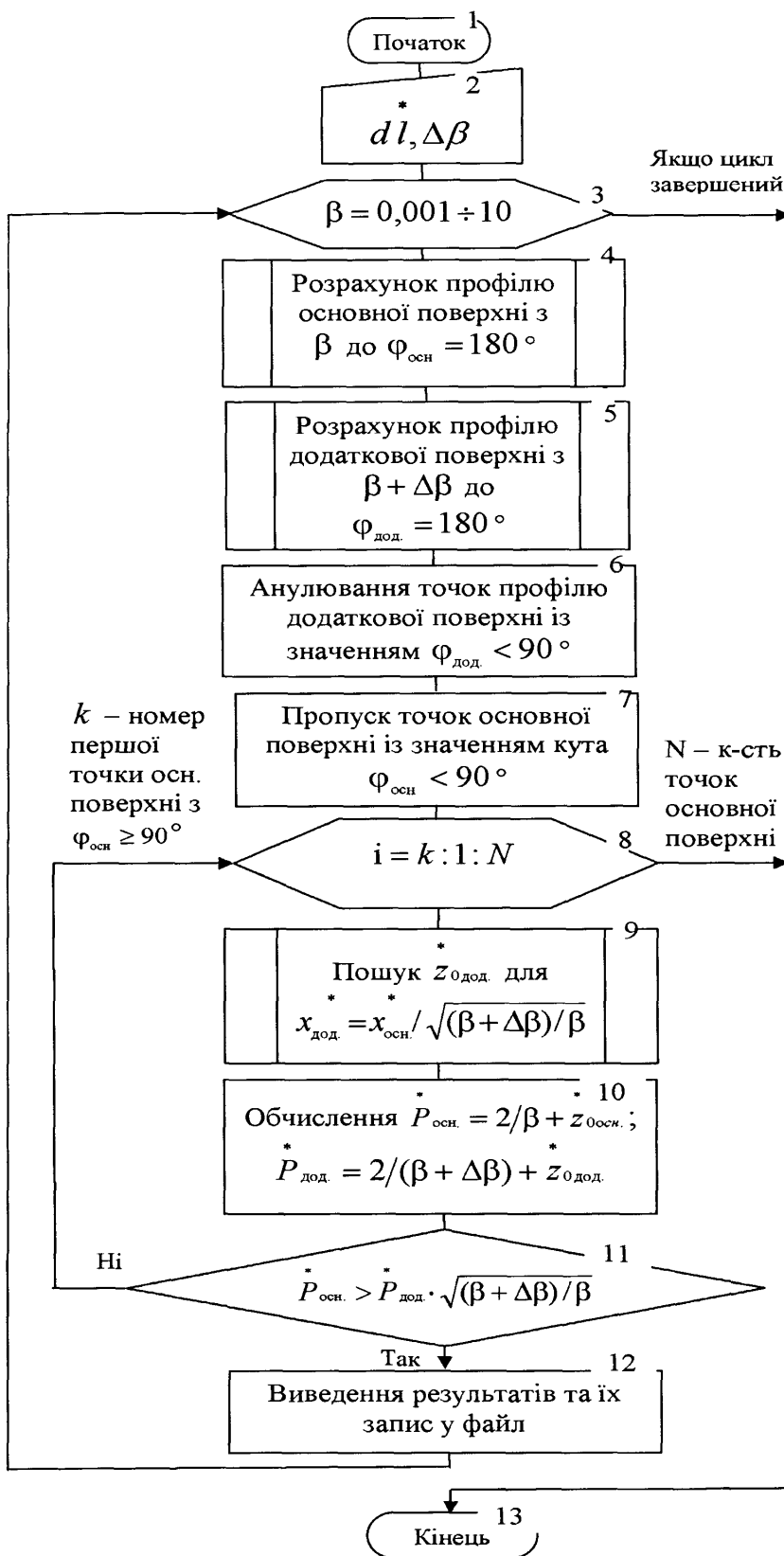


Рис. 2.4. Блок-схема алгоритму розрахунку параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці

За виразами $\dot{P}_{\text{осн.}} = 2/\beta + z_{\text{осн.}}^*$ та $\dot{P}_{\text{лод.}} = 2/(\beta + \Delta\beta) + z_{\text{лод.}}^*$ обчислюють можливі значення максимального тиску для основного та додаткового профілю профілів меніска, відповідно (блок 10). Порівнюють розрахований тиск основної поверхні $\dot{P}_{\text{осн.}}$ та приведений тиск додаткової поверхні $\dot{P}_{\text{лод.}} \cdot \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ (блок 11). Якщо умова $\dot{P}_{\text{осн.}} > \dot{P}_{\text{лод.}} \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ виконується, то вважають, що наступив момент максимального тиску. У такому випадку виводять і записують геометричні параметри цієї точки у файл (блок 12).

Після цього переходять до пошуку моменту максимального тиску для наступного β (блок 3). Якщо умова $\dot{P}_{\text{осн.}} > \dot{P}_{\text{лод.}} \sqrt{(\beta + \Delta\beta)/\beta}$ не виконується, то (за допомогою циклу) переходять до наступної точки основного профілю (блок 8) і повторно проходять етапи з блоку 9 по 11 до знаходження моменту максимального тиску або закінчення точок основної поверхні ($i = N$).

Текст програмного коду, що реалізує вище описаний алгоритм представлений у додатку А. Програмний код, що реалізує процедуру побудови основного та додаткового профілів меніска методом Рунге-Кутта із змінним кроком 4(5) порядку або методом Адамса-Башфорта-Мултона приведений у додатку Б. Отримані результати розрахунку наведені у додатку В.

Результатом реалізації розробленого алгоритму є сукупність безрозмірних параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці: β , φ_m^* , x_m^* , $z_{0,m}^*$, l_m^* , A_m^* , V_m^* , P_{max}^* . При цьому x_m^* , $z_{0,m}^*$, l_m^* приведені до радіусу кривизни меніска у момент максимального тиску у бульбашці $R_{0,m}$. Площа поверхні меніска A_m^* та об'єм бульбашки V_m^* приведені до $R_{0,m}^2$ та $R_{0,m}^3$, відповідно, а P_{max}^* до $\Delta\rho g R_{0,m}$. Оскільки у момент максимального тиску параметр $R_{0,m}$ є невідомим, то отримані результати приводять до параметрів, який вимірюються, або є відомими. Такими є розмірний радіус капіляра r , на кромці якого перебуває меніск у момент максимального тиску у бульбашці, та капілярна стала a^2 .

На базі отриманих результатів отримують відповідні параметри меніска у момент максимального тиску у бульбашці, приведені до r або a :

$$R_0/r = 1/x_{*}, \quad (2.25)$$

$$r/a = x_{*} \cdot \sqrt{\beta}, \quad (2.26)$$

$$R_0/a = \sqrt{\beta}, \quad (2.27)$$

$$z_0/r = z_{0*} \cdot R_0/r, \quad (2.28)$$

$$z_0/a = z_0/r \cdot (r/a), \quad (2.29)$$

$$\sigma/P_{\max} r = 1/(P_{\max} \cdot \beta \cdot x_{*}), \quad (2.30)$$

$$A/r^2 = A_{*} \cdot (R_0/r)^2, \quad (2.31)$$

$$V/r^3 = V_{*} \cdot (R_0/r)^3. \quad (2.32)$$

Із параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці можна одержати залежності R_0 та z_0 від параметрів, які вимірюються. З цією метою здійснюють апроксимацію параметрів r/a від функції R_0/a , а також r/a від функції z_0/a , де $z_0/a = z_0/r \cdot (r/a)$.

Проведені автором дослідження відомих апроксимаційних залежностей за допомогою професійних математичних пакетів Matlab та CurveTable 2D свідчать про те, що для отримання залежності $\frac{R_0}{a} = f_2\left(\frac{r}{a}\right)$ оптимальним є використання рівнянь Фур'є 8-порядку виду:

$$\frac{R_0}{a} = A_0 + \sum_{i=1}^8 \left(A_i \cos\left(i \frac{kr}{a}\right) + B_i \sin\left(i \frac{kr}{a}\right) \right), \quad (2.33)$$

де $k = 2,064006$; $A_0 = 7,538336$; $A_1 = -0,949654$; $B_1 = -11,732394$; $A_2 = -8,706698$; $B_2 = -0,570453$; $A_3 = -1,049907$; $B_3 = 5,76990$; $A_4 = 3,162638$; $B_4 = 0,894259$; $A_5 = 0,548177$; $B_5 = -1,411823$; $A_6 = -0,487164$; $B_6 = -0,237016$; $A_7 = -0,071153$; $B_7 = 0,1179$; $A_8 = 0,016604$; $B_8 = 0,011195$.

В той же час, для $\frac{z_o}{a} = f_3\left(\frac{r}{a}\right)$ оптимальніше є застосування апроксимації

раціональною функцією:

$$\frac{z_o}{a} = \frac{C_0 + C_1 \frac{r}{a} + C_2 \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C_3 \left(\frac{r}{a}\right)^3 + C_4 \left(\frac{r}{a}\right)^4 + C_5 \left(\frac{r}{a}\right)^5}{C_6 + C_7 \frac{r}{a} + C_8 \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C_9 \left(\frac{r}{a}\right)^3 + C_{10} \left(\frac{r}{a}\right)^4 + \left(\frac{r}{a}\right)^5}, \quad (2.34)$$

де $C_0 = 0,0001842$; $C_1 = 12,844138$; $C_2 = -36,994924$; $C_3 = 43,828754$;
 $C_4 = -25,649188$; $C_5 = 6,616949$; $C_6 = 12,884830$; $C_7 = -37,462462$;
 $C_8 = 42,641759$; $C_9 = -21,471278$; $C_{10} = 2,901192$.

Використавши апроксимаційні залежності (2.33) та (2.34) можна записати, що $R_o = a \cdot f_2(r/a)$ та $z_o = a \cdot f_3(r/a)$. Слід відмітити, що залежності (2.33) та (2.34) правомірно застосовувати для каплярів з внутрішніми радіусами r в діапазоні $0,1 \div 1,5$ мм та діапазону дослідження ПН σ від $10 \div 100$ мН/м.

Отримані залежності (2.33) та (2.34) дозволяють записати такий вираз для визначення ПН рідини σ :

$$\sigma = \frac{a \cdot f_2(r/a)}{2} (P_{\max} - \Delta \rho g (H + a \cdot f_3(r/a))). \quad (2.35)$$

Так як, $a = \sqrt{\sigma / \Delta \rho g}$, то σ знаходиться як в правій, так і в лівій частинах (2.35). Враховуючи, що визначення σ за таким виразом здійснюється ітераційним методом [77, 78], який реалізується не вручну, а за допомогою мікроконтролера або ПК, то застосування громіздких виразів (2.33) та (2.34) не містить складності. Програмний код, що реалізує ітераційну процедуру такого розрахунку наведений у Додатку Г.

Розроблення методики фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці дозволило отримати геометричні параметри меніска у цей момент. На їх основі були розраховані залежності невідомих величин R_o та z_o від параметрів, які вимірюються у процесі дослідження ПН рідини. Останнє дозволило отримати вираз (2.35), у якому врахована несферичність меніска у момент максимального

тиску у бульбашці. Для визначення ПН рідини σ за (2.35), крім максимального тиску, необхідно виміряти різницю густин рідини та газу, а також прецизійно встановити вимірювальний капіляр на задану глибину досліджуваної рідини.

2.2 Розроблення ітераційного методу визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів

З метою усунення цієї необхідності розроблений метод з використанням трьох строго фіксованих один відносно іншого каліброваних капілярів, які занурені у досліджувану рідину на довільну глибину [1÷3]: двох капілярах, що мають однаковий внутрішній радіус r_1 , але розташовані на різних глибинах занурення, та третьому капілярі, що має інший радіус r_2 , проте розташований на тій ж глибині занурення, що і другий капіляр (рис. 2.5).

Максимальні тиски у капілярах 1, 2, 3 при утворенні із них бульбашок згідно формули (2.10) будуть такими:

$$P_{\max 1} = 2\sigma/R_{o1} + \Delta\rho g(H + z_{o1}), \quad (2.36)$$

$$P_{\max 2} = 2\sigma/R_{o1} + \Delta\rho g(H + \Delta h + z_{o1}), \quad (2.37)$$

$$P_{\max 3} = 2\sigma/R_{o2} + \Delta\rho g(H + \Delta h + z_{o2}), \quad (2.38)$$

де Δh – строго фіксована віддаль між торцями 2-го і 3-го капілярів, які опускаються на довільну, але однакову глибину, і 1-го капіляра.

Після віднімання значень максимальних тисків третього та другого капілярів $P_{\max 3} - P_{\max 2}$ отримують, що

$$P_{\max 3} - P_{\max 2} = 2\sigma(1/R_{o2} - 1/R_{o1}) + \Delta\rho g(z_{o2} - z_{o1}). \quad (2.39)$$

В свою чергу, віднявши значення максимальних тисків другого та першого капілярів $P_{\max 2} - P_{\max 1}$ отримують різницю густин досліджуваної рідини та газу (або густину самої рідини по відношенню до повітря):

$$\Delta\rho = (P_{\max 2} - P_{\max 1})/\Delta h g. \quad (2.40)$$

Це дозволяє, в свою чергу, визначити з рівняння (2.39) ПН рідини σ за таким виразом:

$$\sigma = \frac{P_{\max 3} - P_{\max 2} - \Delta \rho g(z_{02} - z_{01})}{2(1/R_{02} - 1/R_{01})}, \quad (2.41)$$

де $R_{01} = a \cdot f_2(r_1/a)$, $R_{02} = a \cdot f_2(r_2/a)$, $z_{01} = a \cdot f_3(r_1/a)$, $z_{02} = a \cdot f_3(r_2/a)$, котрі визначаються за (2.33) та (2.34), відповідно.

Для визначення ПН рідин за формулою (2.41) використовується спеціальна ітераційна процедура, програмний код якої наведений в Додатку Д.

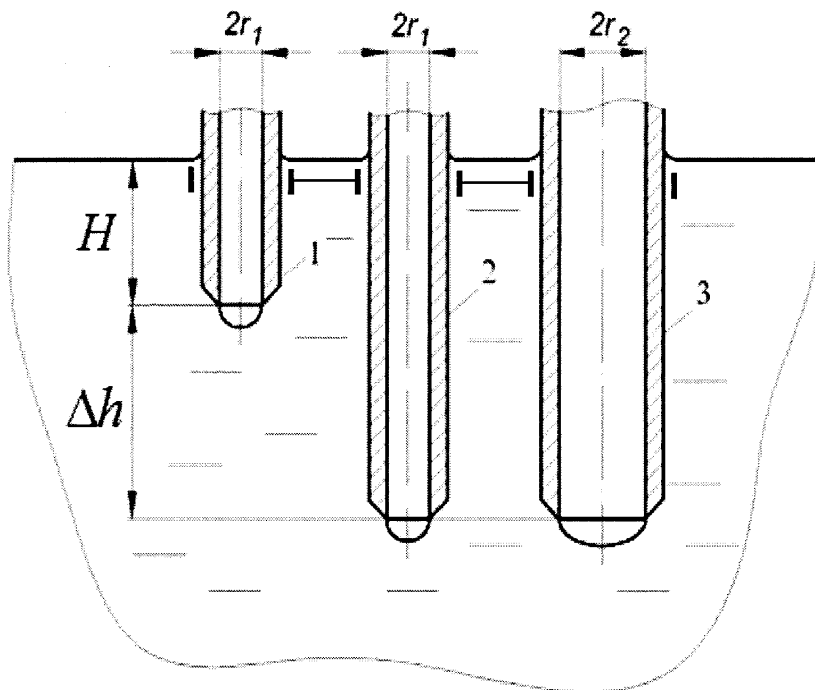


Рис. 2.5. Схема розміщення трьох капілярів

Таким чином, визначення ПН рідини σ за допомогою розробленого методу зводиться лише до вимірювання максимальних тисків для кожного із трьох капілярів та подальшого розрахунку за (2.41) значення σ , тобто не вимагає попереднього вимірювання різниці густин рідини і газу $\Delta \rho$, а також прецизійного встановлення вимірювальних капілярів на задану глибину H .

Розроблена пневматична схема трикапілярного пристрою, який реалізує запропонований метод, представлена на рис. 2.6.

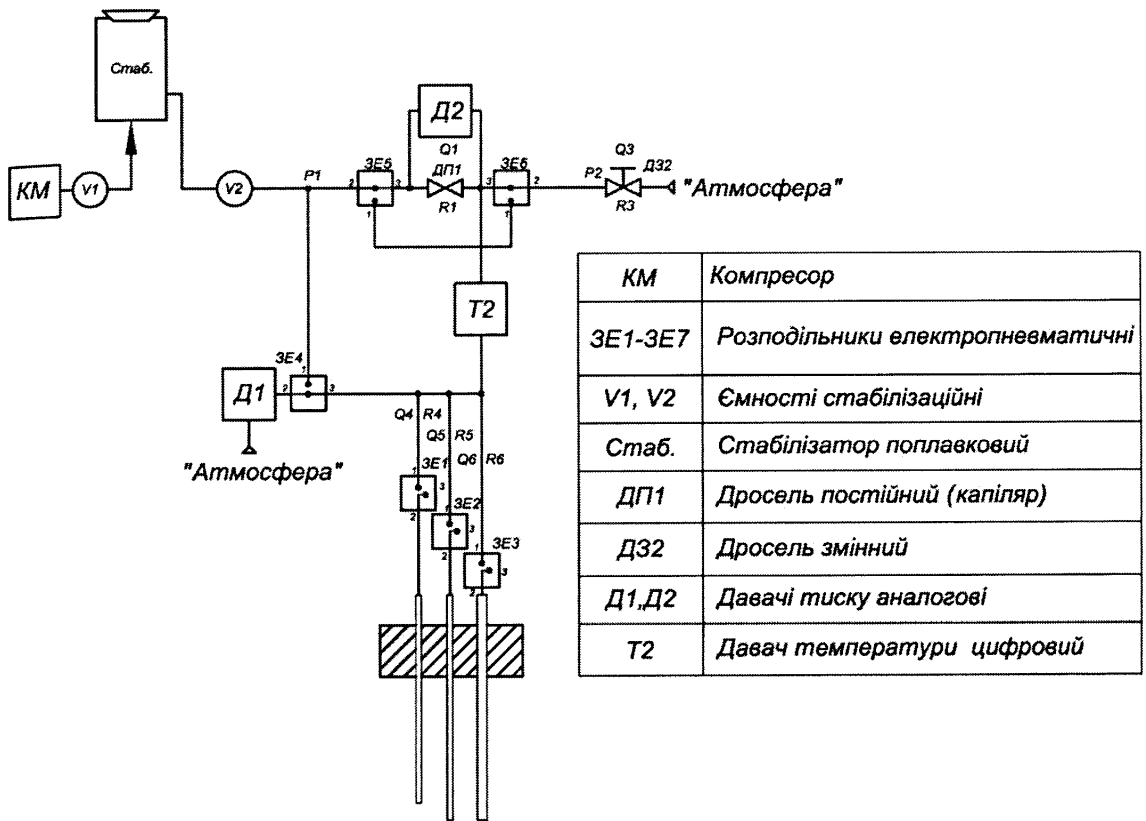


Рис. 2.6. Пневматична схема пристрою, який реалізує запропонований ітераційний метод визначення ПН рідин за допомогою трьох капілярів

2.3 Методика урахування впливу пневматичних опорів елементів вимірювальної системи на вимірний максимальний тиск у бульбашці

Крім суми «лапласового» та гідростатичного тиску на меніск виміряні значення максимального тиску для кожного із трьох капілярів включають складову додаткового перепаду тиску $\Delta P_{\text{дод.}}$, який виникає тому, що максимальний тиск вимірюється не на торці вимірювального капіляра, тобто у бульбашці, а в деякій точці вимірювальної системи приладу, причому ділянка між цією точкою та бульбашкою має певний пневматичний опір.

З метою одержання максимальних тисків P_{max1} , P_{max2} та P_{max3} , які використовуються для визначення різниці густин рідини та газу $\Delta \rho$ за (2.39) та ПН рідини σ за (2.41), із вимірних максимальних тисків $P_{\text{max1 вим.}}$, $P_{\text{max2 вим.}}$, $P_{\text{max3 вим.}}$

для кожного з трьох капілярів необхідно вирахувати їх складові додаткового перепаду тиску $\Delta P_{\text{дод.1}}$, $\Delta P_{\text{дод.2}}$, $\Delta P_{\text{дод.3}}$, відповідно.

Значення $\Delta P_{\text{дод.1}}$, $\Delta P_{\text{дод.2}}$, $\Delta P_{\text{дод.3}}$ для ділянок першого, другого та третього капілярів розраховуються за такими виразами:

$$\Delta P_{\text{дод.1}} = Q_4 \cdot R_4, \quad (2.42)$$

$$\Delta P_{\text{дод.2}} = Q_5 \cdot R_5, \quad (2.43)$$

$$\Delta P_{\text{дод.3}} = Q_6 \cdot R_6, \quad (2.44)$$

де Q_4 , Q_5 , Q_6 – витрати газу через ділянки першого, другого та третього капілярів, відповідно; R_4 , R_5 , R_6 – пневматичні опори ділянок першого, другого та третього капілярів, які можуть мати різний радіус і довжину, відповідно (рис. 2.6).

В свою чергу, витрати газу Q_4 , Q_5 , Q_6 визначаються так:

$$Q_4 = Q_{11} - Q_{31}, \quad (2.45)$$

$$Q_5 = Q_{12} - Q_{32}, \quad (2.46)$$

$$Q_6 = Q_{13} - Q_{33}, \quad (2.47)$$

де Q_{11} , Q_{12} , Q_{13} – значення витрати газу через протічний капіляр ДП1 з опором R_1 при відкритому першому, другому чи третьому капілярі, відповідно; Q_{31} , Q_{32} , Q_{33} – значення витрати газу через змінний дросель ДЗ2 з опором R_3 при відкритому першому, другому чи третьому капілярі, відповідно.

Витрата Q_{1k} через протічний капіляр ДП1 для відповідного капіляра k ($k = 1, 2, 3$) при ламінарному русі газу в ньому визначається за законом Пуазейля так:

$$Q_{1k} = \frac{\Delta P_{R1k}}{R_1} = \Delta P_{R1k} \frac{\pi r_0^4}{8\eta(T)l_0}, \quad (2.48)$$

де ΔP_{R1k} – вимірний диференціальним давачем тиску Д2 перепад тиску через протічний капіляр ДП1 з відомими радіусом r_0 та довжиною l_0 при відповідному відкритому капілярі k ; $\eta(T)$ – кінематична в'язкість повітря, яка залежить від

його температури T , котра, в свою чергу, вимірюється давачем температури T_2 .

При застосуванні в якості робочого газу – повітря $\eta(T)$ розраховується за таким виразом:

$$\eta(T) = 1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3. \quad (2.49)$$

Вираз (2.49) отриманий шляхом апроксимації табличних значень кінематичної в'язкості повітря у діапазоні $0 \div 95$ °С, які наведені у праці [79]. Він використовується для автоматичного розрахунку кінематичної в'язкості повітря (в $\text{м}^2/\text{с}$) у залежності від його температури (в °С). Витрата Q_{3k} визначається наступним чином:

$$Q_{3k} = \frac{P_{R3k}}{R_3}, \quad (2.50)$$

де P_{R3k} – виміряний давачем Д1 тиск у вимірювальній камері приладу при відповідному відкритому капілярі k . Величина P_{R3k} є рівною $P_{\text{max } k \text{ вим.}}$ для відповідного відкритого капіляра k .

Опір змінного дроселя R_3 для встановленого робочого тиску у вимірювальній камері приладу визначається при закритих вимірювальних капілярах перед процедурою вимірювання максимальних тисків для них. Тобто при $Q_{3k} = Q_{1k}$ для будь-якого значення k . З врахуванням (2.49) пневматичний опір R_3 визначають так:

$$R_3 = \frac{P_{R3} 8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}{\Delta P_{R1} \cdot \pi r_0^4}, \quad (2.51)$$

де P_{R3} – виміряний давачем Д1 тиск у вимірювальній камері приладу при закритих вимірювальних капілярах; ΔP_{R1} – виміряний давачем Д2 перепад тиску через ДП1 при закритих вимірювальних капілярах; T – значення температури робочого газу (повітря) у процесі вимірювання.

Аналогічно при налаштуванні приладу при закритому змінному дроселі ДЗ2 та виходом відповідних вимірювальних капілярів в атмосферу визначаються опори ділянок R_4 , R_5 , R_6 першого, другого та третього капілярів виразами

наступним чином:

$$R_4 = \frac{P_{R4} 8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}{\Delta P_{R11} \cdot \pi r_0^4}, \quad (2.52)$$

$$R_5 = \frac{P_{R5} 8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}{\Delta P_{R12} \cdot \pi r_0^4}, \quad (2.53)$$

$$R_6 = \frac{P_{R6} 8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}{\Delta P_{R13} \cdot \pi r_0^4}. \quad (2.54)$$

де P_{R4} , P_{R5} , P_{R6} – виміряні давачем Д1 значення тиску у вимірювальній камері приладу при відкритому першому, другому чи третьому капілярах, відповідно; ΔP_{R11} , ΔP_{R12} , ΔP_{R13} – виміряні давачем Д2 значення перепаду тиску через протічний капіляр ДП1 при відкритому першому, другому чи третьому капілярах, відповідно; T – значення температури повітря.

Виміряні значення тисків у вимірювальній камері приладу $P_{\text{max 1 вим.}}$, $P_{\text{max 2 вим.}}$, $P_{\text{max 3 вим.}}$ у момент максимального тиску у бульбашці та перепаду тиску через протічний капіляр ΔP_{R11} , ΔP_{R12} , ΔP_{R13} у цей момент та попередньо визначені за виразами (2.51 ÷ 2.54) пневматичні опори змінного дроселя ДЗ2 та ділянок трьох вимірювальних капілярів R_3 , R_4 , R_5 , R_6 із врахуванням (2.45 ÷ 2.50) дозволяють записати вирази для визначення додаткових тисків для трьох капілярів (2.42 ÷ 2.44) у такому вигляді:

$$\Delta P_{\text{дол.1}} = R_4(Q_{11} - Q_{31}) = R_4 \left(\Delta P_{R11} \frac{\pi r_0^4}{8\eta(T)l_0} - \frac{P_{\text{max 1 вим.}}}{R_3} \right), \quad (2.55)$$

$$\Delta P_{\text{дол.2}} = R_5(Q_{12} - Q_{32}) = R_5 \left(\Delta P_{R12} \frac{\pi r_0^4}{8\eta(T)l_0} - \frac{P_{\text{max 2 вим.}}}{R_3} \right), \quad (2.56)$$

$$\Delta P_{\text{дол.3}} = R_6(Q_{13} - Q_{33}) = R_6 \left(\Delta P_{R13} \frac{\pi r_0^4}{8\eta(T)l_0} - \frac{P_{\text{max 3 вим.}}}{R_3} \right). \quad (2.57)$$

Це, у свою чергу, дозволяє записати кінцеві вирази для визначення значень максимальних тисків $P_{\text{max 1}}$, $P_{\text{max 2}}$, $P_{\text{max 3}}$, які використовуються для знаходження ПН

рідини σ за виразом (2.41):

$$P_{\max 1} = P_{\max 1 \text{ вим.}} - R_4 \left(\frac{\Delta P_{R11} \cdot \pi r_0^4}{8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)} - \frac{P_{\max 1 \text{ вим.}}}{R_3} \right), \quad (2.58)$$

$$P_{\max 2} = P_{\max 2 \text{ вим.}} - R_5 \left(\frac{\Delta P_{R12} \cdot \pi r_0^4}{8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)} - \frac{P_{\max 2 \text{ вим.}}}{R_3} \right), \quad (2.59)$$

$$P_{\max 3} = P_{\max 3 \text{ вим.}} - R_6 \left(\frac{\Delta P_{R13} \cdot \pi r_0^4}{8l_0 (1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)} - \frac{P_{\max 3 \text{ вим.}}}{R_3} \right). \quad (2.60)$$

Таким чином, розроблена методика дозволяє врахувати вплив пневматичних опорів елементів вимірювальної системи пристрою на вимірний максимальний тиск у вимірювальній камері приладу для кожного із трьох капілярів, що підвищує точність визначення значень цих максимальних тисків і, відповідно, результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР.

2.4 Визначення моментів досягнення максимальних тисків у процесі їх вимірювання

Як було описано вище, визначення моментів досягнення максимальних тисків у процесі їх вимірювання є актуальною проблемою, а кожен з відомих способів її вирішення характеризується своїми перевагами і недоліками.

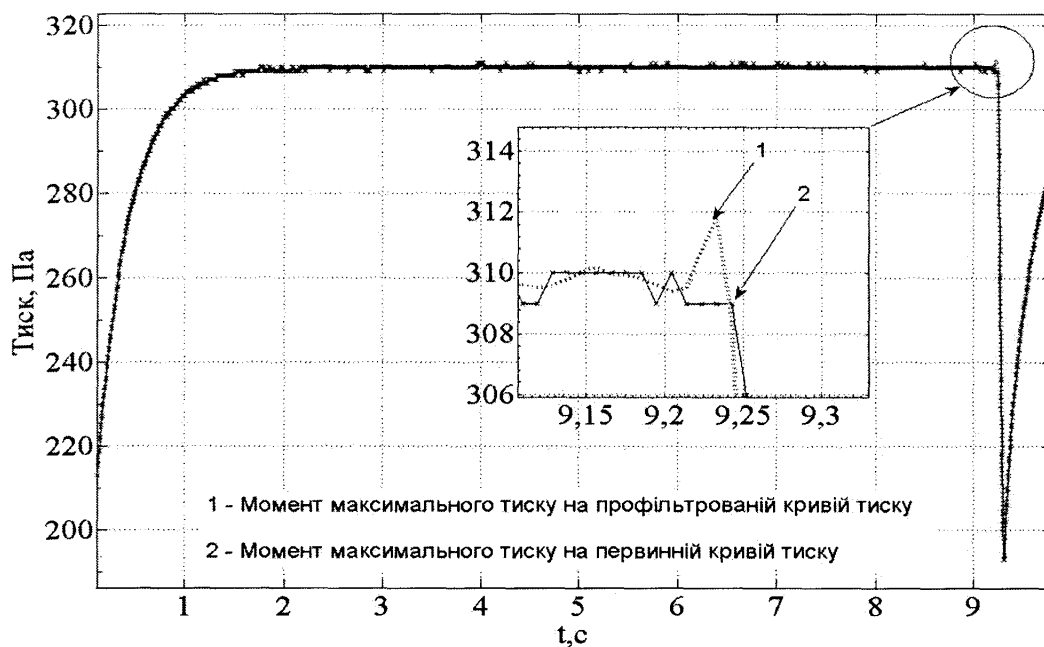
Тому визначення моменту досягнення максимального тиску P_{\max} пропонується здійснювати за спеціально розробленою процедурою оброблення часової залежності тиску у вимірювальній камері пристрою або перепаду тиску через протічний капіляр ДП1, яка базується на застосуванні математичного згладжуючого фільтру Савицького - Голя 2-го порядку [81] з інтервалом згладжування рівним 10 [13]. При реалізації цієї процедури масив значень тиску у вимірювальній камері пристрою, або перепаду тиску через ДП1 у реальному часі неперервно проходить через даний програмний фільтр. Тоді за піком різкого

зростання профільтрованої кривої тиску газу (рис. 2.7, а), або піком різкого падіння профільтрованої кривої перепаду тиску газу (рис. 2.7, б) можна чітко визначити момент максимального тиску. Ці піки суттєво перевищують амплітуду шкідливих вібраційних коливань тиску газу через вплив компресора та шум вимірювальної системи, що дозволяє точно визначити момент максимального тиску.

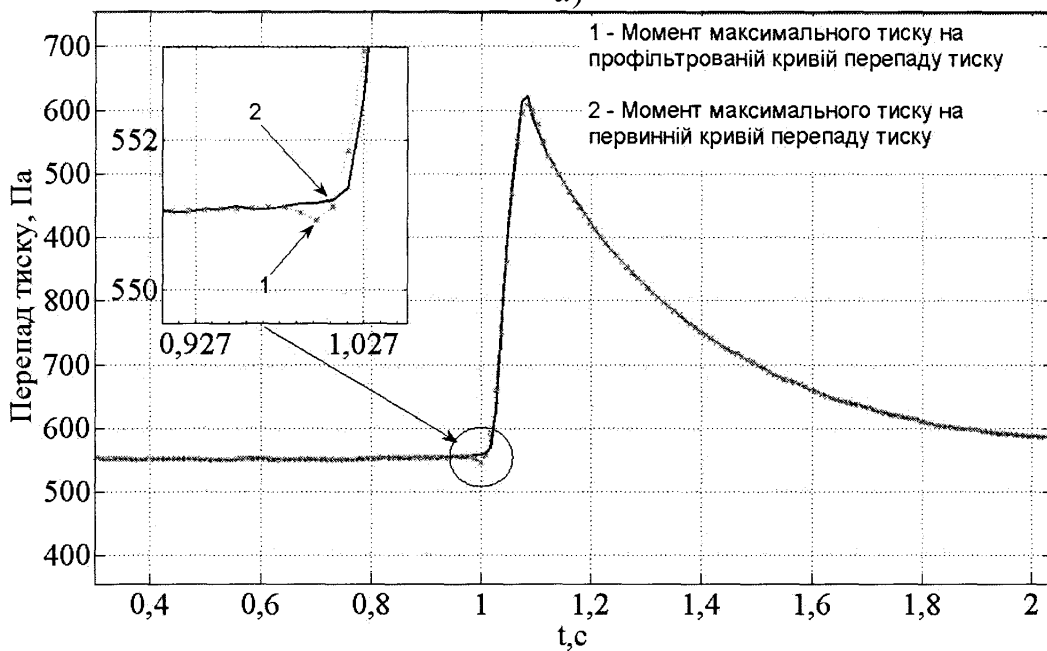
Визначення P_{\max} , t_1 , t_d та t_b за піком різкого зростання профільтрованої кривої тиску газу відбувається згідно запропонованої процедури за алгоритмом, який наведений на рис. 2.8. Програмний код, що реалізує розроблений алгоритм, представлений в Додатку Е. Даний алгоритм передбачає неперервне одержання у реальному часі масивів значень тиску у вимірювальній камері пристрою та перепаду тиску через протічний капіляр ДП1 із прив'язкою до часу та включає такі етапи.

Спочатку проходить ініціалізація глобальних змінних, якими є значення потенційних максимумів чи мінімумів масивів тиску, які були отримані раніше або вони є рівними своїм початковим значенням (блок 1–2). Далі на основі масиву значень тиску у вимірювальній камері пристрою («Buf») шляхом застосування програмного фільтру Савицького – Голя створюється профільтрований масив значень цього тиску («SmoothingBuf») (блок 3), який слугуватиме для пошуку моменту максимального тиску. Після цього здійснюється оброблення значень масиву тиску та нового профільтрованого масиву цього тиску наступним чином (блок 4). На основі аналізу кожної точки кривої тиску у вимірювальній камері визначається мінімум тиску (блок 5), який повинен бути меншим за будь-який наступний тиск (достатньо на 10 % від потенційного мінімуму тиску). Далі із масиву значень профільтрованої кривої тиску визначається момент максимуму тиску (блок 6). Знайдений момент на профільтрованій кривій «відстає» від дійсного моменту максимуму тиску на кривій тиску на величину, не більше 0,1 с. Для усунення даної похибки на кривій тиску газу знаходиться точний момент максимального тиску шляхом визначення

максимального значення тиску у цьому інтервалі (блок 7). На основі знайденої пари «мінімум–максимум» тиску із кривої тиску газу у камері визначаються P_{\max} , t_1 , та t_b (блок 8).



а)



б)

Рис. 2.7. Визначення моменту максимального тиску на базі кривої тиску (а) та перепаду тиску газу (б) за допомогою згладжуючого фільтра Савицького – Голя 2-го порядку

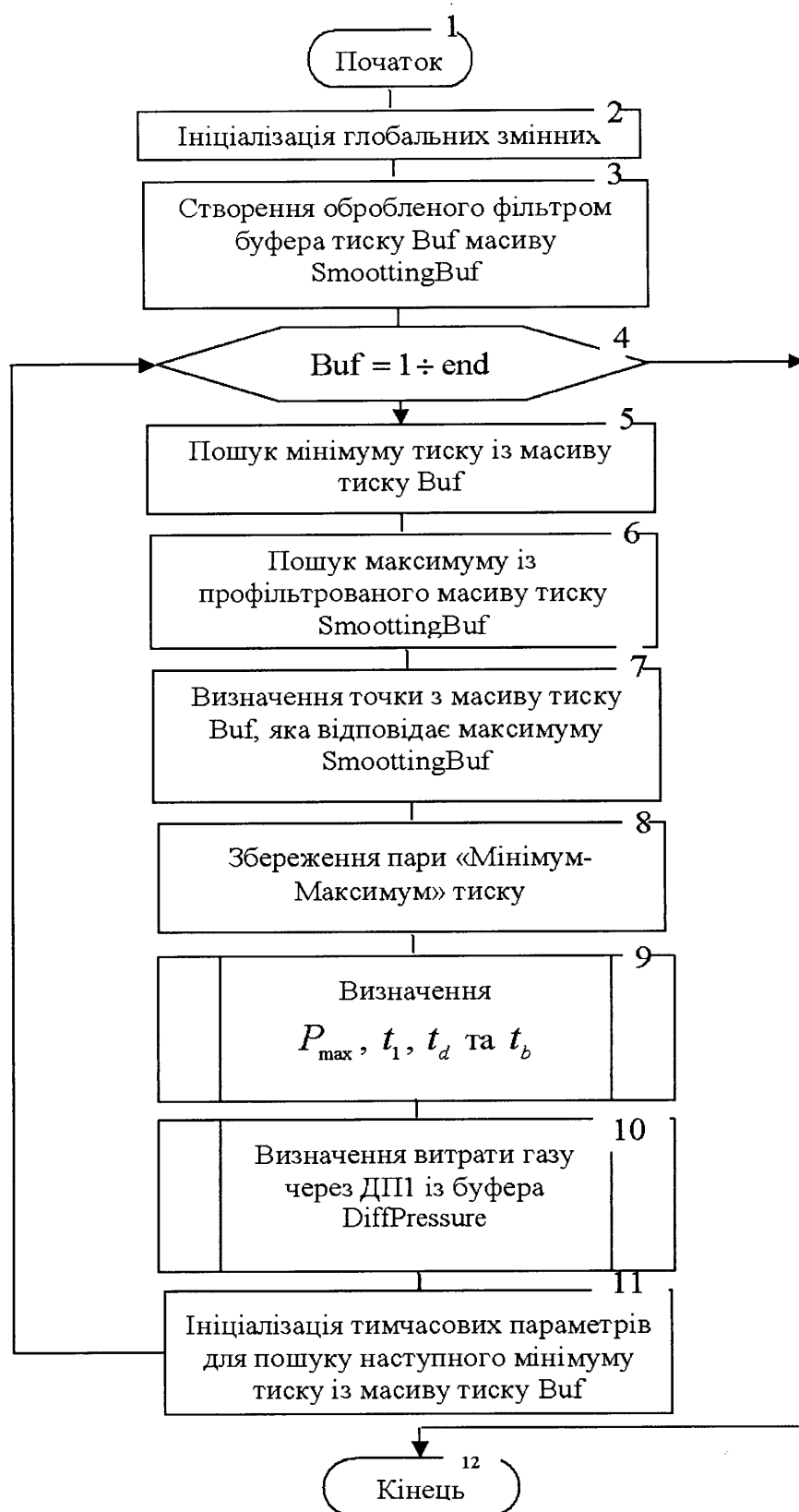


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритму визначення моменту настання максимального тиску у бульбашці у процесі його вимірювання

З масиву перепаду тиску газу («DiffPressure») через протічний капіляр ДП1 визначається його значення, яке відповідає моменту максимального тиску з метою врахування у вимірюваному максимальному тиску додаткового тиску ділянки відповідного вимірювального капіляру (блок 10). Після цього ініціалізуються тимчасові параметри для пошуку нової пари «мінімум–максимум» тиску (блок 11). Операції з блоку 5 по 11 повторюються до завершення поточного масиву значень тиску (блок 12). У цьому випадку потенційний максимум чи мінімум тиску записується до глобальних змінних для його перевірки у новому масиві значень тиску газу, який періодично поступає від вимірювальної системи.

Отримані значення P_{\max} , t_1 , та t_b та перепаду тиску газу, які отримані для заданого тиску газу у вимірювальній камері пристрою і відповідного капіляра, статистично обробляються за наступною розробленою процедурою. Всі значення, які входять в установлені допустимі інтервали по величині тиску газу і часу існування поверхні меніска арифметично усереднюються, а із зростанням їх кількості збільшується показник відтворення отриманої групи усереднених параметрів. Вимірювання максимального тиску для заданого тиску у камері та відповідного вимірювального капіляра проводиться до одержання значення заданого показника відтворення N (при $N \geq 4$) для такого усередненого набору P_{\max} , t_1 , t_d та t_b , де $t_d = t_b - t_1$, що забезпечує мінімальну випадкову похибку визначення P_{\max} . До результатів вимірювання включається усереднений набір P_{\max} , t_1 , t_d та t_b з максимальним показником відтворення N .

Запропонована процедура багаторазового вимірювання та статистичного оброблення часових параметрів ДПН і значень максимальних тисків при визначенні їх моментів, яка ґрунтується на одержанні лише відтворюваних значень P_{\max} , t_1 , t_d та t_b , дозволяє мінімізувати випадкову похибку вимірювання максимальних тисків, а також автоматично усунути з результатів невірні значення цих параметрів при утворенні бульбашок через непередбачувані випадкові фактори (стрясання, вібрації тощо), що забезпечує високий статистично достовірний результат визначення P_{\max} , t_1 , t_d та t_b .

Таким чином, розроблена процедура визначення моментів максимальних тисків та їх статистичне опрацювання дозволяє підвищити точність визначення максимальних тисків у зашумленому сигналі від давачів тиску чи перепаду тиску газу через ДПІ, що підвищує точність результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР.

2.5 Розроблення методу визначення динамічного поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів

Описаний у підрозділі 2.2 метод визначення ПН рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів не може бути використаний для дослідження ДПН рідин у часовому діапазоні часу існування поверхні меніска t_1 , у якому не виконуватиметься умова рівності ДПН для капілярів з різними радіусами для одного і того ж t_1 . Такий часовий діапазон прийнято називати короткочасовим [43]. Тому для визначення ДПН рідин і розчинів ПАР, в т.ч. у цьому короткочасовому діапазоні, розроблений інший метод із застосуванням трьох капілярів [14].

Для його реалізації пропонується використовувати ту ж пневматичну схему пристрою, що і для попереднього методу, який описаний в підрозділі 2.2. (рис. 2.6). У вимірювальній камері такого пристрою спочатку встановлюють найбільший робочий тиск газу при закритих вимірювальних капілярах. Для цього заданого значення тиску газу у реальному часі по чергово вимірюються часові залежності тиску газу у вимірювальній камері та перепаду тиску газу через протічний капіляр ДПІ для кожного із трьох капілярів. На їх основі за вище описаною методикою визначаються усереднені значення максимального тиску P_{\max} та часові параметри ДПН t_1 , t_d та t_b для кожного із трьох капілярів.

Після цього у вимірювальній камері пристрою встановлюється менший заданий тиск і описана процедура повторюється. Крок між значеннями встановленого тиску у вимірювальній камері пристрою встановлюється на основі

часу існування поверхні меніску t_1 попередньої точки визначеного максимального тиску, а саме чим більший t_1 , тим менший крок. Це дозволяє отримати оптимальні криві залежностей максимальних тисків від часу існування поверхні менісків для кожного із трьох капілярів $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ в автоматичному режимі без участі оператора.

Процес вимірювання триває до досягнення рівноважних максимальних тисків для кожного із трьох капілярів. Момент рівноважного значення максимального тиску для відповідного капіляра досягається, коли відношення $\Delta P_{\max} / \Delta t_1$ прямує до нуля, або за відсутності появи бульбашок за заданий час очікування.

Значення рівноважних максимальних тисків на кривих $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ для кожного капіляра інтерполюють за допомогою процедури лінійної чи сплайнової інтерполяції [80]. Остання дозволяє визначити проміжні значення P_{\max} і, відповідно, ДПН рідини σ та t_1 , а також отримати рівноважні значення максимальних тисків для кожного із трьох капілярів при однаковому значенні t_1 .

За необхідності отримані значення кривих для кожного капіляру $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ можуть апроксимуватися однією із функцій, яка володіє найменшою похибкою апроксимації та екстраполюватися за допомогою цієї функції до свого рівноважного значення. Екстраполяція $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ дозволяє знайти точку рівноважного максимального тиску і відповідно РПН σ для даного капіляра.

Тоді на основі рівноважних значень максимальних тисків для кожного із трьох капілярів за (2.39) розраховують різницю густин рідини та газу $\Delta \rho$, а за виразом (2.41) визначають РПН рідини $\sigma_{\text{рівн}}$.

Значення $\Delta \rho$, рівноважного максимального тиску $P_{\max 3 \text{ рівн}}$ для третього капіляра та ПН рідини $\sigma_{\text{рівн}}$ дозволяють ітераційним методом із (2.35) розрахувати глибину занурення другого та третього капілярів за таким виразом:

$$H = \frac{P_{\max 3 \text{ рівн.}}}{\Delta \rho g} - \frac{2\sigma_{\text{рівн.}}}{a \cdot f_2(r_2/a) \cdot \Delta \rho g} - a \cdot f_3(r_2/a). \quad (2.61)$$

Оскільки три капіляри нерухомо закріплені один відносно іншого, то, віднявши різницю висот Δh , одержують глибину занурення першого капіляра. За виразом (2.61) на основі відповідних рівноважних максимальних тисків для трьох капілярів можна провести також розрахунок їх глибин занурення, а тоді перевірити правильність визначення ПН рідини шляхом порівняння різниці глибин занурення першого та другого капілярів із значенням Δh , або перевірки рівності глибини занурення другого і третього капілярів H .

Визначені значення $\Delta \rho$ та глибини занурення першого $H - \Delta h$, другого і третього капілярів H , відповідно, дозволяють за виразом (2.35) перерахувати отримані криві $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ для кожного із трьох капілярів із різними радіусами та глибинами занурення у відповідні залежності ДПН рідини $\sigma = f(\Delta t_1)$ для трьох капілярів.

Нерухоме закріплення трьох капілярів відносно дна вимірювальної посудини дозволяє також визначити рівень досліджуваної рідини $H_{\text{рідини}}$:

$$H_{\text{рідини}} = H_{\text{посудини}} - (l_{\text{капіляру}} - H), \quad (2.62)$$

де $H_{\text{посудини}}$ – висота вимірювальної посудини; $l_{\text{капіляру}}$ – частина довжини вимірювального капіляра від верхньої поверхні посудини до торця капіляра. Визначивши рівень рідини можна розрахувати і її об'єм (оскільки форма вимірювальної посудини відома), а на основі визначеної різниці густин $\Delta \rho$ і масу досліджуваної рідини. У разі попереднього вливання у вимірювальну посудину рідини з визначеним об'ємом чи масою ця процедура дозволяє перевірити правильність визначення ПН рідин чи розчинів ПАР. Це також можна зробити і візуально при відомому рівні досліджуваної рідини у мірній посудині.

Для аналізу явища нерівності значень ДПН у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні менісків для капілярів із різними радіусами [43], а відповідно і різними площами поверхонь менісків та об'ємами бульбашок потрібно визначити їх значення у момент максимального тиску у них.

Залежності площі поверхні меніска (рис. 2.9 і формула 2.63) та об'єму бульбашки (рис. 2.10 і формула 2.64) від максимального тиску P_{\max} , ПН рідини σ та внутрішнього радіусу відповідного вимірювального капіляра r одержуються за допомогою поліноміальної апроксимації розрахованих параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці, які наведені у Додатку В [14].

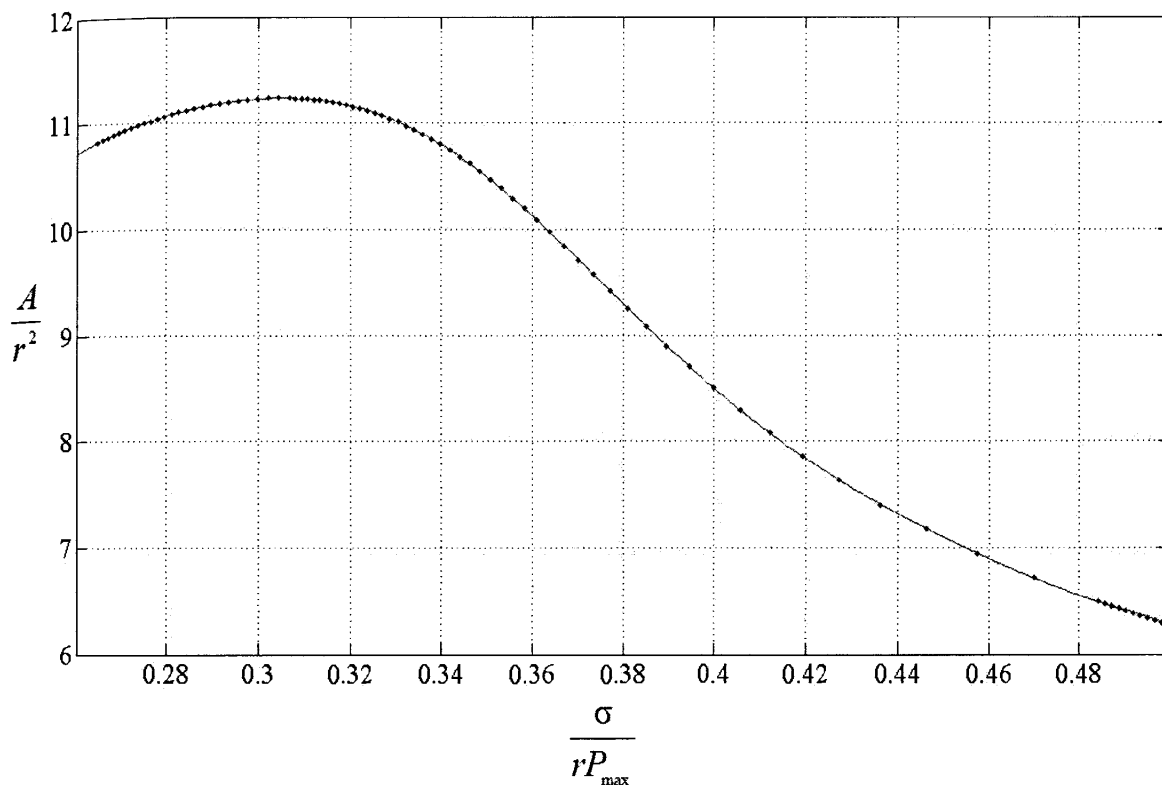


Рис. 2.9. Залежність площі поверхні меніска від максимального тиску P_{\max} , ПН рідини σ та радіусу капіляра r

$$\frac{A}{r^2} = \sum_{i=0}^9 D_i \left(\frac{\sigma}{rP_{\max}} \right)^i, \quad (2.63)$$

де $D_0 = 9,911362$; $D_1 = -3,248420$; $D_2 = -0,914388$; $D_3 = 2,097048$; $D_4 = 0,233596$; $D_5 = -1,126647$; $D_6 = -0,0748275$; $D_7 = 0,359625$; $D_8 = 0,008693$; $D_9 = -0,04478$.

$$\frac{V}{r^3} = \sum_{i=0}^9 E_i \left(\frac{\sigma}{rP_{\max}} \right)^i, \quad (2.64)$$

де $E_0 = 3,910177$; $E_1 = -1,606965$; $E_2 = -0,54791$; $E_3 = 1,152591$; $E_4 = 0,128683$; $E_5 = -0,625201$; $E_6 = -0,034776$; $E_7 = 0,197751$; $E_8 = 0,002954$; $E_9 = -0,024110$,

де аргумент $\frac{\sigma}{rP_{\max}}$ попередньо центрується та масштабується за таким виразом:

$$\frac{\sigma}{rP_{\max}} = \frac{1}{0,07982} \left(\frac{\sigma}{rP_{\max}} - 0,36542 \right). \quad (2.65)$$

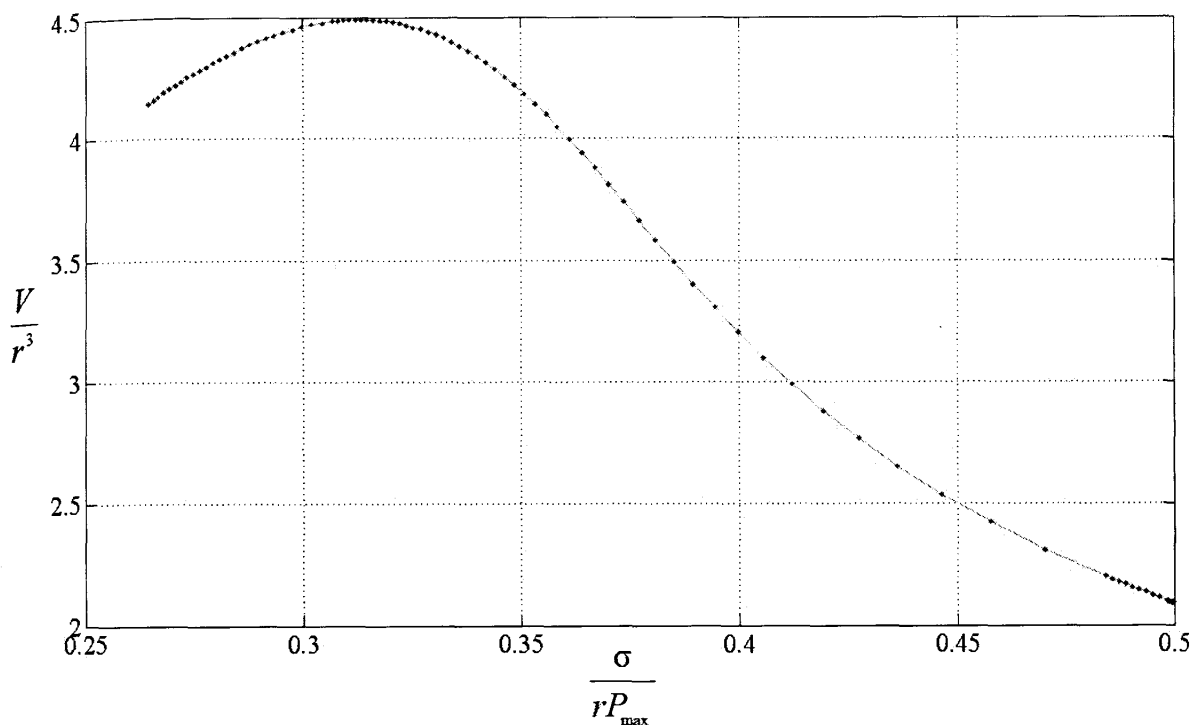


Рис. 2.10. Залежність об'єму від максимального тиску P_{\max} , ПН рідини σ та радіусу капіляра r

Розроблений метод дозволяє визначити залежності ДПН рідин $\sigma = f(\Delta t_1)$ до досягнення ДПН свого рівноважного значення для кожного із трьох капілярів з різними радіусами та глибинами занурення без попереднього вимірювання різниці густин рідини та газу, а також прецизійного занурення на капілярів задану глибину.

Отримані криві ДПН рідини $\sigma = f(\Delta t_1)$, площі поверхні меніска і об'єми бульбашок у момент максимального тиску у них в подальшому дозволять здійснити аналіз значень ДПН у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска для капілярів із різними радіусами та глибинами занурення, а при додаткових майбутніх дослідженнях дадуть можливість розрахувати залежність ДПН рідин від ефективного часу адсорбції.

2.6 Калібрування радіусів трьох вимірювальних капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках

Для визначення ПН рідин за допомогою трьох капілярів попередньо потрібно визначити чи виміряти внутрішні радіуси вихідних отворів цих капілярів.

З метою визначення r_1 та r_2 можуть бути використані такі методи: пряме вимірювання радіусів капілярів за допомогою прецизійних оптичних чи електронних мікроскопів або опосередковане їх визначення із застосуванням зразкової рідини.

Автором було досліджено обидва ці методи. В результаті встановлено, що пряме вимірювання r_1 та r_2 може застосовуватися лише для високоякісних ножових капілярів, в яких відсутні виробничі вади, практично неприсутня овальність внутрішнього отвору, а також можливо чітко встановити кромку торця капіляра, де відбуватиметься відрив бульбашки. Комерційно доступні капіляри переважно є неножовими. Крім того, ножові капіляри також неминуче володіють певною товщиною стінки. Обом типам капілярів притаманна певна овальність та неідеальність їх внутрішніх отворів. Все це веде, що виміряні з високою точністю методом прямого спостереження радіуси капілярів r_1 та r_2 можуть бути не рівними внутрішнім радіусам капілярів, на котрих у дійсності відбувається відрив бульбашок. Опосередковане визначення r_1 та r_2 із застосуванням зразкової рідини дозволяє визначити достовірні радіуси капілярів, де відбуватиметься відрив бульбашок. З цією метою розроблена наступна двоетапна процедура. Спочатку блок із трьома фіксованими капілярами встановлюють на штативі строго вертикально вниз. На першому етапі посудину з рідиною з відомими ПН σ_{zp} та різницею густин цієї рідини та газу $\Delta\rho_{zp}$ (в якості рідини пропонується використовувати дистильовану воду при нормальних умовах) повільно піднімають до точного дотику першого капіляра з поверхнею рідини.

Тоді за описаною вище методикою визначають моменти та значення

максимальних тисків для другого та третього капілярів $P_{\max 2}$, $P_{\max 3}$, відповідно. На другому етапі капіляри занурюють на довільну глибину і визначають максимальні тиски для першого $P_{\max 1}^*$ та другого капілярів $P_{\max 2}^*$, відповідно. На основі отриманих значень $P_{\max 1}^*$ та $P_{\max 2}^*$ при відомій $\Delta\rho_{зр.}$, розраховують різницю по висоті між першим та другим капіляром Δh :

$$\Delta h = \frac{(P_{\max 2}^* - P_{\max 1}^*)}{\Delta\rho_{зр.} g}. \quad (2.66)$$

Значення Δh буде глибиною занурення для другого та третього капілярів у першому етапі. Δh може бути також визначене прямим вимірюванням за допомогою оптичного мікроскопа. Значення радіусів вимірювальних капілярів містяться у правих частинах виразів (2.33) та (2.34), які використовуються для визначення ПН рідини за (2.35) на основі виміряного максимального тиску, відомої різниці густин та газу і встановленої глибини занурення вимірювального капіляру.

Отже, на основі виміряного максимального тиску для другого капіляру $P_{\max 2}$, відомих густини зразкової рідини відносно повітря $\Delta\rho_{зр.}$ та її ПН $\sigma_{зр.}$, глибини занурення другого та третього капілярів, яка рівна Δh , визначаються значення радіусів r_1 вихідних отворів першого та другого вимірювальних капілярів. Аналогічно на основі $P_{\max 3}$, $\Delta\rho_{зр.}$, $\sigma_{зр.}$ та Δh визначається радіус третього капіляру r_2 . Враховуючи значний вплив похибки визначення радіусів вимірювальних капілярів на похибку ПН рідини, а саме похибка у визначенні внутрішнього радіуса капіляра 0,01 мм веде до похибки визначення ПН в 1 мН/м, то з метою мінімізації випадкової похибки визначення максимальних тисків, які використовуються для розрахунку r_1 та r_2 , їх вимірювання слід здійснювати багаторазово (не менше 100 значень). Розроблена програма для визначення r_1 та r_2 із виразів (2.33 ÷ 2.35) наведена в Додатку Ж.

Розроблена методика калібрування радіусів трьох вимірювальних капілярів за виміряними максимальними тисками у бульбашках дозволяє опосередкованим

методом визначити достовірні радіуси r_1 та r_2 вимірювальних капілярів, де відбуватиметься відрив бульбашок, що дає можливість врахувати їх виробничі вади і тим самим підвищити точність результатів досліджень ПН рідин.

Висновки до розділу

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

а) вперше розроблено методику фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці, яка дозволила розрахувати геометричні параметри меніска у цей момент, що дало можливість замінити невідомі значення радіуса кривизни меніска в його омбілічній точці і висоти меніска на залежності від параметрів, які вимірюються у процесі дослідження ПН рідини, а також врахувати несферичність меніска, і тим самим підвищити точність результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР;

б) вперше розроблено ітераційний метод визначення ПН рідин за допомогою трьох капілярів, який не вимагає попереднього вимірювання різниці густин рідини і газу, а також прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину досліджуваної рідини;

в) розроблено процедуру, яка дозволяє врахувати вплив пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми пристрою на вимірний максимальний тиск у бульбашці для кожного із трьох капілярів, що дозволило підвищити точність визначення цих тисків і відповідно результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР;

г) вперше розроблено процедуру визначення моментів досягнення максимальних тисків на основі застосування фільтрів Савицького – Голя та їх статистичне опрацювання, що дало можливість підвищити точність визначення максимальних тисків та часових параметрів ДПН і відповідно результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР;

д) вперше розроблено метод визначення ДПН рідин і розчинів ПАР за

допомогою трьох капілярів з різними радіусами та глибинами занурення, що не вимагає попереднього вимірювання різниці густин рідини та газу, а також прецизійного занурення цих капілярів задану глибину;

е) розроблено методику калібрування радіусів трьох капілярів за виміряними максимальними тисками у бульбашках, яка враховує виробничі вади цих капілярів, що дозволяє підвищити точність результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТРИКАПІЛЯРНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

3.1 Вимоги до пристрою з метою реалізації ним розроблених методів визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР

З метою розроблення трикапілярного пристрою, який повинен реалізувати запропоновані методи визначення ПН рідин, необхідно встановити основні вимоги, яким він повинен відповідати:

- 1) робочий діапазон дослідження ПН рідин від 10 до 100 мН/м;
- 2) температурний робочий діапазон дослідження ПН рідин у діапазоні від +0° до +95 °С;
- 3) часовий діапазон дослідження ДПН рідин від 0,1 с до 50 000 с;
- 4) забезпечення неперервної роботи протягом 24 год. і більше;
- 5) автоматизація процедури налаштування пристрою та дослідження ПН рідин, а також представлення результатів у зручній для користувача формі (графічна, таблична), як на моніторі ПК, так і в роздрукованій формі.

3.2 Структурна і функціональна схеми трикапілярного пристрою

З метою виконання поставлених вимог розроблено трикапілярний пристрій, структурна схема якого зображена на рис. 3.1, а функціональна схема наведена на рис. 3.2.

Структурна схема трикапілярного пристрою включає: джерело газу 1, блок стабілізації тиску газу 2, блок вимірювання витрати газу 3, вимірювальну камеру 4, блок регулювання тиску газу 5, блок вимірювання температури газу 6, вузол вимірювальних капілярів 7, термостабілізовану посудину з блоком вимірювання та встановлення температури рідини 8, блок електропневматичних розподільників 9, блок керування і оброблення даних 10, блок керування

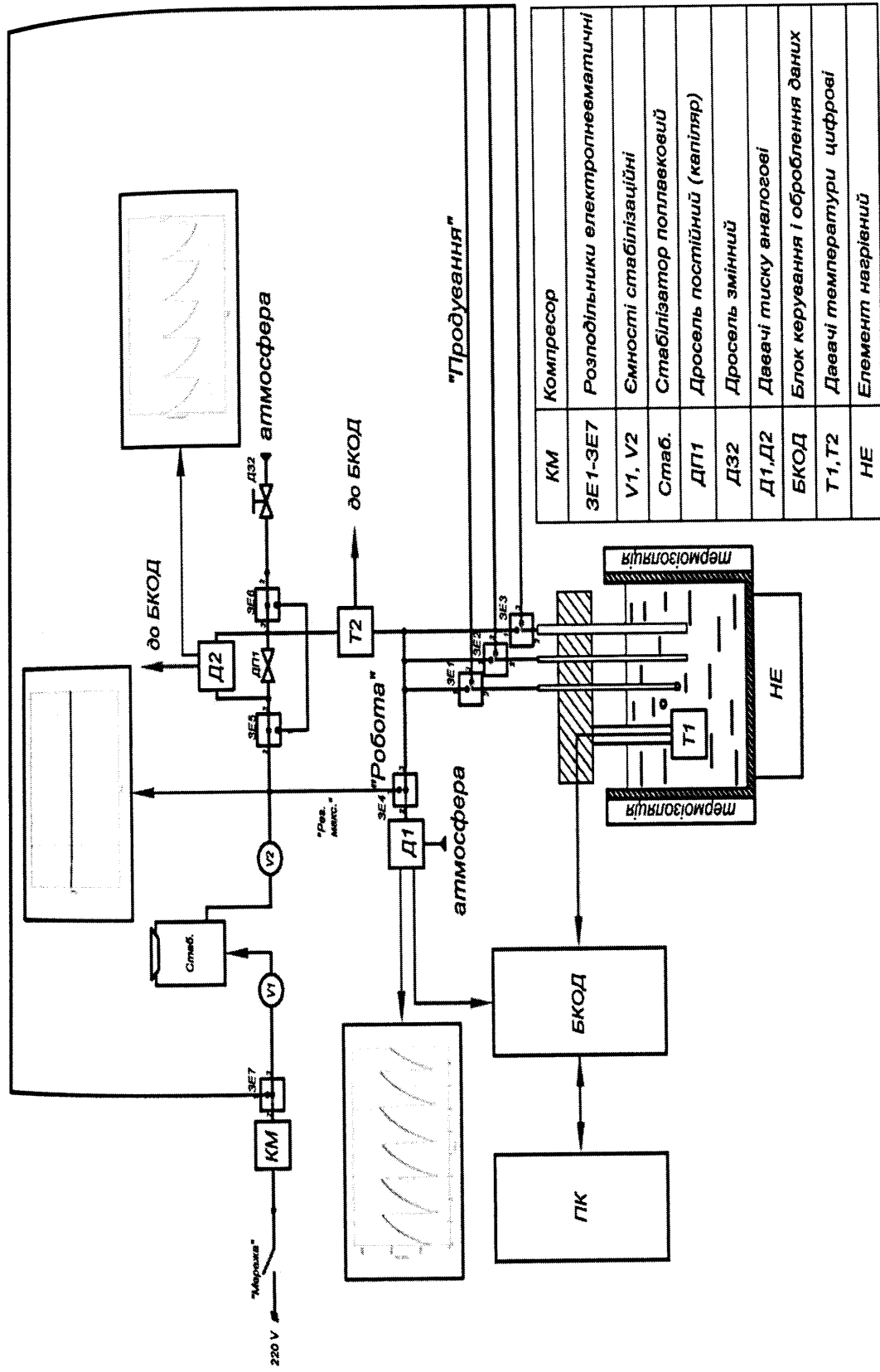


Рис 3.2. Функціональна схема трифазного пристрою для автоматизованого дослідження ПН рідин і розчинів ПАР

Паралельно мікроконтролер отримує дані від двох датчиків тиску і двох датчиків температури, проводить їх первинне оброблення та передає на ПК для подальшого опрацювання.

3.3 Пневматична схема трикапілярного пристрою

В якості джерела газу у пневматичній схемі трикапілярного пристрою може застосовуватись зовнішній повітряний компресор або балон з інертним газом. Виведення компресора за межі вимірювального блоку дозволяє уникнути впливу вібрацій компресора на останній, а також допускає під'єднання компресорів різної потужності чи балонів з різними інертними газами.

Блок стабілізації тиску газу складається з двох пневматичних камер з великим об'ємом V_1 та V_2 на вході та виході блоку, які забезпечують згладжування пульсацій газу до допустимого рівня, та поплавкового пневматичного стабілізатора «Стаб.», який забезпечує встановлення необхідного тиску у камері, а також додаткову його стабілізацію (рис. 3.2). Основними конструктивними елементами поплавкового стабілізатора є поплавок 1, тягарець 2, корпус 3, вхідний і вихідний штуцери 4, 5, відповідно (рис. 3.3). Для встановлення необхідного значення тиску розраховують масу тягарця 2, виходячи з площі вихідного отвору втулки, на якій знаходиться поплавок. Необхідний стабілізований тиск $P_{\text{стаб.}}$, який повинен забезпечити робочий діапазон вимірювання максимального тиску для наявного блоку вимірювальних капілярів та можливих їх глибин занурення розраховується за таким виразом:

$$P_{\text{стаб.}} = \frac{F}{S}, \quad (3.1)$$

де F – сила тяжіння поплавка; S – площа перерізу вихідного отвору втулки.

Тоді за другим законом Ньютона потрібна маса поплавка m розраховується так:

$$m = \frac{F}{g}, \quad (3.2)$$

де g – прискорення земного тяжіння. Потрібна маса поплавка встановлюється з допомогою сталевих шайб.

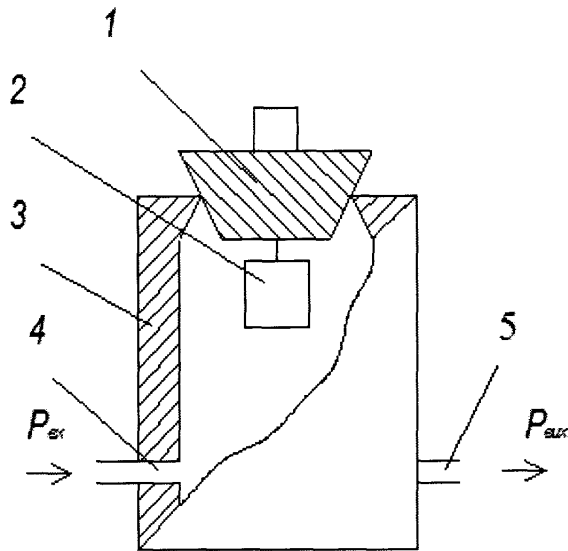


Рис. 3.3. Пневматичний поплавковий стабілізатор

1 – поплавок; 2 – тягарець; 3 – корпус; 4 – вхідний штуцер

Для управління потоками газу у вимірювальній камері пристрою застосовуються 7 електропневматичних розподільників (ЗЕ1–ЗЕ7) марки SAMOZZI K000-303-K23 (Італія), які керуються електричною схемою пристрою. Кожен розподільник має два режими роботи: «увімкнутий» – потік газу проходить із входу 1 на вихід 2 чи навпаки та «вимкнутий» – потік газу проходить із виходу 2 на резервний вихід 3 чи навпаки (рис. 3.2).

Блок вимірювання витрати газу складається з протічного капіляра ДП1 (постійного дроселя) та диференційного давача тиску Д2. Протічний капіляр ДП1 вибраний довжиною $l_0 = 12,17$ мм та внутрішнім радіусом $r_0 = 0,18$ мм.

Витрата газу (повітря) через ДП1 визначається за виразом (2.48) на основі вимірюного давачем Д2 перепаду тиску газу через ДП1 та температури газу, яка вимірюється давачем температури Т2. Протічний капіляр служить також для пневматичного роз'єднання вимірювальної камери та блоку стабілізації газу трикапілярного пристрою.

Вимірювальна камера трикапілярного пристрою представляє собою місце з'єднання пневматичних трубок. Блок регулювання тиску газу у камері складається із змінного пневматичного дроселя (регулятора тиску) ДЗ2, крокового двигуна та механічного передаточного механізму між ними. Двигун здійснює позиціонування змінного дроселя ДЗ2 для встановлення заданого значення тиску у вимірювальній камері пристрою за допомогою зворотного зв'язку з давачем тиску Д1 з похибкою, не більшою від похибки вимірювання цього тиску.

Блок вимірювання температури газу представляє собою трубку, в яку встановлений давач температури Т2 (DS18B20, який володіє максимальною абсолютною похибкою $0,5^{\circ}\text{C}$). Трубка з давачем температури Т2 розміщується між вимірювальною камерою та давачем тиску Д1.

Блок вимірювальних капілярів представляє собою планку із трьома жорстко закріпленими капілярами (рис. 3.2). Така планка може встановлюватися стаціонарно, а досліджувана рідина у термостабілізованій посудині піднімається до занурення вимірювальних капілярів на довільну глибину, або планка може монтуватися у кришку посудини, в яку попередньо вливають цю рідину.

Зовнішня конструкція блоку вимірювальних капілярів дозволяє застосовувати різноманітні комплекти капілярів у залежності від експериментальних умов дослідження ПН рідин, а також здійснювати дослідження залежності вимірюваного ПН від радіусів, глибин занурення, гідрофобної чи гідрофільної внутрішньої та зовнішньої поверхонь капілярів.

Термостабілізована посудина представляє собою ємність, стінки якої покриті теплоізоляційним матеріалом. Дно посудини має мідний тепловий контакт з нагрівним елементом та елементом охолодження. В якості нагрівного елемента може виступати низькоомний резистор, або елемент Пельтьє. Останній за своїми властивостями може здійснювати як нагрівання, так і охолодження рідини. В якості охолоджуючого елемента може застосовуватися зовнішній блок, що складається з мідного радіатора з вентилятором, які мають тепловий контакт з

дном посудини за допомогою мідного проводу великого перерізу. Встановлення радіатора з вентилятором на дно посудини є недоцільним, оскільки це приведе до створення вібрацій у посудині і спотворення результатів вимірювання ПН, проте на дно такої посудини допустимо встановлювати пасивне охолодження на базі радіатора чи теплових трубок. На дно посудини або в її середину також монтується давач температури рідини T1. У разі його монтажу на дно посудини покази давача T1 попередньо калібрують згідно з реальними значеннями температури рідини.

Вимірювання температури газу і рідини, а також встановлення величини останньої, дозволяє не тільки враховувати зміну кінематичної в'язкості газу при визначенні його витрати через протічний капіляр ДП1, а також проводити дослідження ПН рідин у широкому температурному діапазоні в умовах як рівної температури газу та рідини, так і градієнту цих температур, наприклад, з метою оцінки впливу випаровування рідини на результат вимірювання.

3.4 Електрична схема трикапілярного пристрою

З метою одержання та первинного оброблення даних від давачів тиску Д1, Д2 і давачів температури T1 та T2, передачі їх до ПК, а також повного керування пристроєм за допомогою ПК була розроблена електрична схема трикапілярного пристрою на базі плати Analog Devices EVAL-ADUC834QS, електрична принципова схема якої наведена в Додатку К.

Плата EVAL-ADUC834QS побудована на основі інтегральної монокристалічної мікросхеми ADUC834, яка включає в себе два прецизійні та синхронні 24 - і 16 - бітні аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) з максимальною частотою вибірки даних 105,3 Гц, мікропроцесорне ядро архітектури «8051», а також всі необхідні блоки для управління периферійними пристроями, отримання інформації від них та обміном інформації з ПК. Живлення плати EVAL-ADUC834QS здійснюється зовнішнім блоком живлення FRANMAR

RH-41-900300RG потужністю 2,7 Вт та напругою 9 В, яка за допомогою прецизійного стабілізатора напруги ZR78L05G перетворюється у стандартну напругу +5В. Обмін інформації з ПК здійснюється за допомогою протоколу UART, який перетворюється у протокол USB за допомогою перехідника STLAB U-305. Блок керування кроковим двигуном, електропневматичними розподільниками та блоком нагрівання і охолодження рідини конструктивно розміщений якнайдалі від вимірювальної частини пристрою з метою запобігання електромагнітних впливів на останню. Він побудований на базі інтегральної мікросхеми L293В для керування кроковим двигуном та ULN2803 – для керування електропневматичними розподільниками та елементами охолодження чи нагрівання досліджуваної рідини.

Процес керування здійснюється шляхом передачі логічних сигналів від мікроконтролера ADUC834 до L293В чи ULN2803. Живлення крокового двигуна, розподільників, дисплею, блоку нагрівання і охолодження досліджуваної рідини здійснюється окремим зовнішнім блоком живлення NORDIC POWER AB SA15A-2410G-S потужністю 25 Вт та напругою 24В.

Застосування двох окремих блоків живлення для вимірювальної системи та блоку управління мінімізує вплив останнього на результати вимірювання. Блок з давачами тиску складається з двох диференційних інтегральних аналогових давачів тиску з температурною компенсацією DCXL05DS та MPXV5004.

Прецизійний давач тиску Д1 DCXL05DS має робочий діапазон від 0 до 1250 Па з типовою відносною похибкою через нелінійність рівною 0,05% (від діапазону), яка може бути зменшена шляхом його калібрування по всьому його робочому діапазоні за допомогою еталонного манометра з втричі меншою похибкою вимірювання тиску. Давач Д2 MPXV5004 має робочий діапазон від 0 до 3920 Па з відносною похибкою 1,5% у діапазоні від 0 до 1000 Па. Давач тиску Д1 підключений безпосередньо до основного 24-бітного АЦП, який має власний високоімпендансний буфер. Давач тиску Д2 підключений до додаткового 16-бітного АЦП через однополярну інтегральну мікросхему AD623, яка забезпечує

буфер для додаткового АЦП. Для усунення впливу коливань напруги живлення обидва датчики живляться від того ж джерела напруги (+5В), що і АЦП, і сам мікроконтролер ADUC834.

Блок живлення елементів нагрівання та охолодження досліджуваної рідини та рідкокристалічного дисплею побудований на базі інтегральних стабілізаторів напруги L7805 для живлення дисплею (+5В) і L7812 для живлення елементів охолодження та нагрівання рідини (+12В). Він розміщений на суттєвій віддалі від вимірювальної частини пристрою. Блок рідкокристалічного дисплею WINSTAR WH1602C складається з плати з драйвером дисплею KS0066 та самого рідкокристалічного кристалу на ній. Рідкокристалічний дисплей використовується мікроконтролером ADUC834 з метою виведення поточних значень тиску та температури, а також інформації про виконувані команди чи стан пристрою. Всі дії електричної схеми визначаються програмним кодом мікроконтролера ADUC834, який, в свою чергу, керується програмним забезпеченням ПК.

3.5 Програмне забезпечення трикапілярного пристрою

Програмне забезпечення трикапілярного пристрою складається з програмного коду для мікроконтролера ADUC834 та ПК. Програмний код для мікроконтролера ADUC834 розроблений на мовах програмування «Embedded C» і «Assambler».

Алгоритм програмного коду для мікроконтролера ADUC834 наведений на рис. 3.4. Він включає такі етапи. На етапі 1 проходить увімкнення живлення ADU834. На етапі 2 встановлюється базовий режим електропневматичних розподільників 3E1–3E7, в якому всі розподільники вимкнуті. На етапі 3 задаються параметри передачі вимірних даних до ПК через протокол UART, зокрема швидкість передачі даних 115200 кбіт/с. На етапі 4 здійснюється ініціалізація цифрових датчиків температури DS18B20.

На етапі 5 проходить ініціалізація основного і додаткового АЦП, зокрема встановлюється частота вибірки 105,3 Гц, режим зовнішньої опорної напруги,

вибір входів для обох АЦП. На етапі 6 проводиться запуск обох АЦП у режимі постійного перетворення даних. На етапі 7 встановлюється режим неперервної передачі кожного результату перетворення даних від обох АЦП через протокол UART до ПК. Обидва АЦП синхронні, що дозволяє одночасну видачу даних від обох давачів тиску Д1 і Д2, які до них підключені.

На етапі 8 виконується ініціалізація рідкокристалічного дисплею, а на етапі 9 запуск останнього. На етапі 10 відбувається запуск одноразового вимірювання і аналогово-цифрового перетворення давачами Т1 і Т2 температури рідини та газу, яке при максимальній допустимій похибці $0,5^{\circ}\text{C}$ триває не більше 750 мс.

На етапі 11 здійснюється передача температури від давачів Т1 і Т2 до мікроконтролера, а на етапі 12 їх повторний запуск. На етапі 13 результати вимірювань тиску і температури виводяться на рідкокристалічний дисплей. На етапі 14 здійснюється виконання команд від ПК. Такими командами можуть бути встановлення нульового та максимального значення шкали основного і додаткового АЦП, режиму роботи розподільників ЗЕ1–ЗЕ7, заданого тиску у камері, отримання поточного часу з ПК, здійснення повторної ініціалізації приладу і т.д.

Після виконання заданих команд, або при їх відсутності повторно виконуються етапи з 11 по 14. Етапи з 11 по 14 виконуються паралельно з передачею вимірних даних до ПК до вимкнення трикапілярного пристрою з електричної мережі.

Для проведення автоматизованого дослідження ПН рідин за допомогою ПК розроблений спеціальний програмний комплекс ВПН-3 (рис. 3.5). Цей програмний комплекс дозволяє здійснювати повне керування електричною та пневматичною схемою трикапілярного пристрою, одержання та оброблення вимірних даних від мікроконтролера, графічне виведення результатів вимірювання тиску, перепаду тиску, температури рідини та газу, а також визначення ПН рідин та його відображення у зручному для користувача режимі.



Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму програмного коду мікроконтролера ADUC834

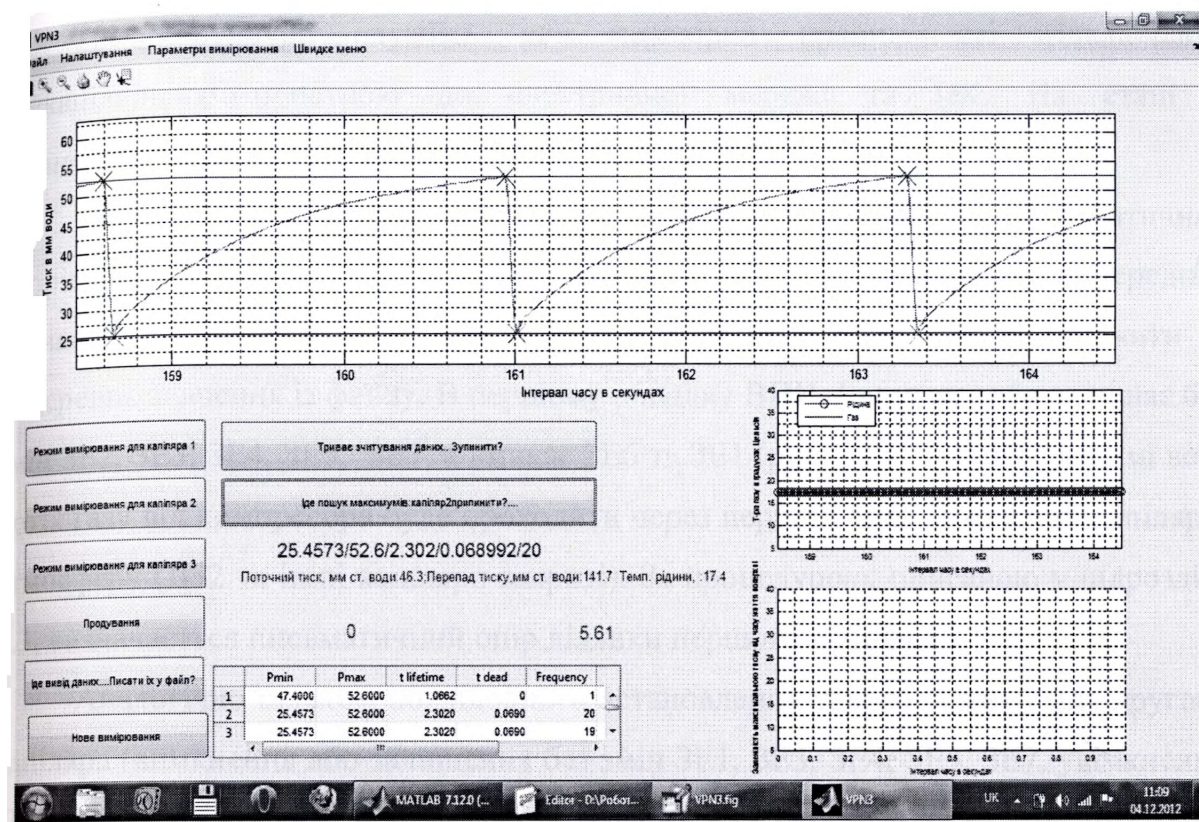


Рис. 3.5. Інтерфейс програмного комплексу ВПН-3

3.6 Процедура проведення трикапілярним пристроєм дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАВ

Процедура дослідження ПН рідин трикапілярним пристроєм реалізується програмним комплексом ВПН-3 згідно алгоритму, блок-схема якого представлена на рис. 3.6. Він включає такі етапи. На етапі 1 користувач здійснює запуск програми. На етапі 2 відбувається ініціалізація віртуального послідовного порту USB. На етапі 3 ініціалізуються тимчасові змінні, які будуть використані у процесі роботи програми. На етапі 4 користувачу необхідно здійснити підключення кабелю зв'язку між ПК та трикапілярним пристроєм, блоків живлення вимірювальної системи і системи управління, а також джерела газу (компресора) до електричної мережі у зазначеному вище порядку. Після їх підключення користувачу пропонується встановити поточне значення часу на рідкокристалічному дисплеї пристрою та перевірити його відображення на ньому.

Ця процедура служить для перевірки правильності підключення трикапілярного пристрою до електричної мережі та ПК. На етапі 5 встановлюється нульове значення тиску для АЦП давачів Д1 та Д2.

На етапі 6 користувачу пропонується здійснити визначення пневматичних опорів для кожної ділянки вимірювальних капілярів та їх порівняння з попередньо визначеними значеннями з метою діагностики пристрою, або завантажити їх попереднє значення із файлу. В першому випадку ВПН-3 вимикає або залишає без змін ЗЕ2, ЗЕ3, ЗЕ4, ЗЕ5, ЗЕ7, а вмикає ЗЕ6 та ЗЕ1 (рис. 3.2). У цьому режимі весь потік газу від компресора буде проходити через перший вимірювальний капіляр в атмосферу (ДЗ2 та інші капіляри закриті). За процедурою, описаною у підрозділі 2.3, визначається пневматичний опір ділянки першого капіляра.

Аналогічно шляхом послідовного встановлення такого режиму для другого капіляра (вимкнення або залишення без змін ЗЕ1, ЗЕ3, ЗЕ4, ЗЕ5, ЗЕ7, увімкнення ЗЕ6 та ЗЕ2) та третього капілярів (вимкнення або залишення без змін ЗЕ1, ЗЕ2, ЗЕ4, ЗЕ5, ЗЕ7, увімкнення ЗЕ6 та ЗЕ3) визначають відповідні значення їх пневматичних опорів. Далі за допомогою відповідного діалогового вікна користувачу пропонується занурити капіляри на довільну глибину досліджуваної рідини і розпочати дослідження її ПН. На етапі 7 у вимірювальній камері встановлюється максимальний робочий тиск. Для цього програмний комплекс надсилає його значення до пристрою.

У відповідь мікроконтролер вимикає всі розподільники трикапілярного пристрою (базовий режим), а тоді через блок управління кроковим двигуном за допомогою регулятора тиску встановлює у вимірювальній камері потрібне значення тиску газу. На цьому етапі значення поточного тиску у камері і перепаду тиску через ДП1 записуються з метою подальшого визначення за виразом (2.51) пневматичного опору регулятора тиску газу. На етапі 8 встановлюється початкова умова, що рівноважний максимальний тиск для кожного капіляра k ($k = 1; 2; 3$) ще не досягнутий. З етапу 9 починається цикл вимірювання максимальних тисків для кожного капіляра.

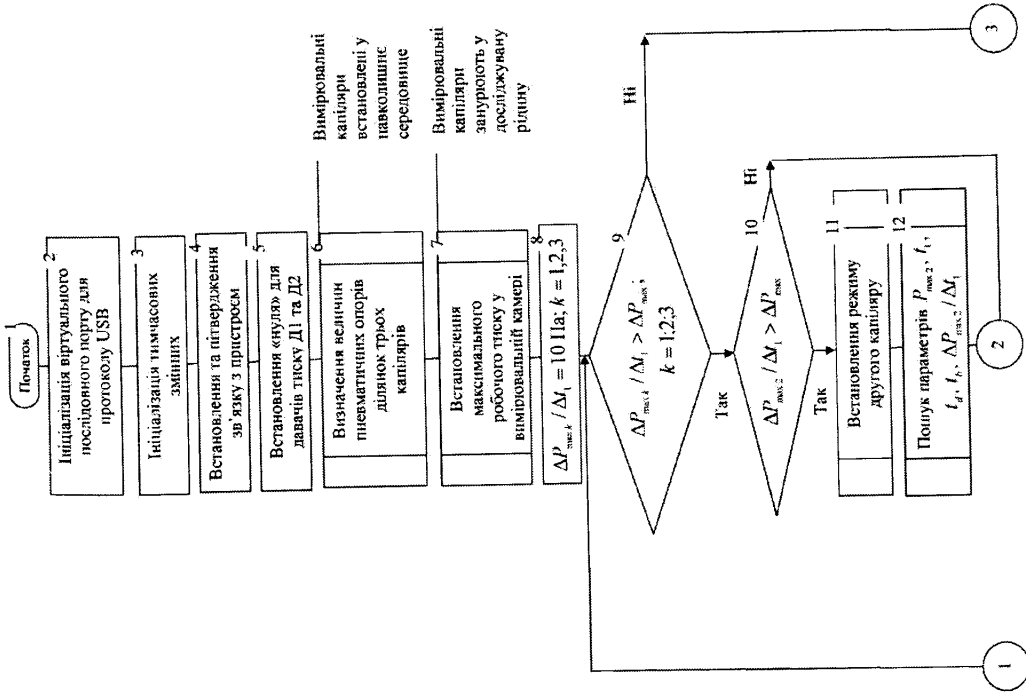


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму дослідження трикапілярним пристроєм поверхневого натягу рідин

На етапі 10 перевіряється умова досягнення рівноважного максимального тиску для другого капіляру. Якщо він ще не досягнутий $\Delta P_{\max 2} / \Delta t_1 > \Delta P_{\max}$ (ΔP_{\max} – встановлене мінімальне значення відношення зміни максимального тиску до зміни часу існування поверхні меніска, при якому досягається момент рівноважного максимального тиску), то встановлюється режим вимірювання для другого капіляра (етап 11).

Для цього програма надсилає до пристрою відповідні команди, при якому ЗЕ1, ЗЕ3, ЗЕ4, ЗЕ5, ЗЕ6, ЗЕ7 вимикаються, а ЗЕ2 вмикається (відкривається). На цьому етапі (згідно описаної в підрозділі 2.4 процедури) визначаються усереднені параметри $P_{\max 2}$, t_1 , t_d , t_b та $\Delta P_{\max 2} / \Delta t_1$. На етапах 13 – 18 аналогічна процедура проходить з першим та третім капілярами.

На 19 етапі відбувається встановлення тиску на крок меншого за попередній, причому величина кроку є адаптивною, а саме чим більший t_1 , тим менший крок. Етапи з 10 по 19 повторюються до досягнення кожним капіляром k значення рівноважного максимального тиску, при якому виконуватиметься умова $\Delta P_{\max k} / \Delta t_1 \leq \Delta P_{\max}$ при $\Delta t_1 \geq 30$ с, або відсутності появи бульбашок за певний заданий час (по замовчуванню 180 с). На етапі 20 на базі визначених кривих $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ для трьох капілярів згідно описаного у підрозділі 2.5 методу визначається густина досліджуваної рідини відносно повітря, РПН рідини, глибини занурення вимірювальних капілярів та криві залежностей ДПН від часу існування поверхні меніска $\sigma = f(t_1)$ до досягнення ДПН свого рівноважного значення для кожного із трьох капілярів.

На цьому етапі замість автоматичного режиму користувач може вручну на графічних залежностях $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ вибрати момент рівноважного максимального тиску для трьох капілярів, або використати кінцеві точки цих кривих (застосовується по замовчуванню в автоматичному режимі). Або шляхом визначення інтерпольованих чи екстрапольованих точок, які отримуються шляхом апроксимації кривих $\Delta P_{\max} = f(\Delta t_1)$ однією із запропонованих аналітичних

функцій, встановити відповідні величини рівноважних тисків для кожного капіляра. На етапі 21 результати дослідження ПН рідини і всі виміряні значення, які використовувалися для його розрахунку, записуються для кожного капіляра в окремі файли і в окрему директорію з назвою, що відповідає даті та часу проведення експерименту.

На етапі 22 результати дослідження виводяться користувачу у графічному режимі. Після цього трикапілярний пристрій переходить у початкове положення, повторно встановлюється максимальний тиск і в разі відсутності дій з боку користувача, починає нову процедуру дослідження ПН рідини.

Код програмного комплексу ВПН-3, який реалізує описаний алгоритм, представлений у Додатку П.

Для здійснення процедури дослідження ПН рідини трикапілярним пристроєм, макет, якого представлений на рис. 3.7, користувачу необхідно:

1) ретельно промити вимірювальні капіляри згідно п. 5.6. проекту методики повірки трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин і розчинів ПАР (Додаток Р);

2) запустити на ПК програму ВПН-3;

3) в основному меню ВПН-3 вибрати пункт «Налаштувати пристрій»;

4) керуючись підказками діалогових вікон ВПН-3 здійснити та перевірити підключення пристрою до електричної мережі та ПК;

5) в основному меню програми ВПН-3 вибрати пункт «Провести діагностику/налаштування пристрою»;

6) в разі успішної діагностики занурити вимірювальні капіляри в досліджувану рідину на довільну глибину та вибрати в основному меню пункт «Провести вимірювання»;

7) зачекати звукового сигналу та інформативного повідомлення, які сигналізуватимуть про завершення автоматизованого дослідження ПН рідини.

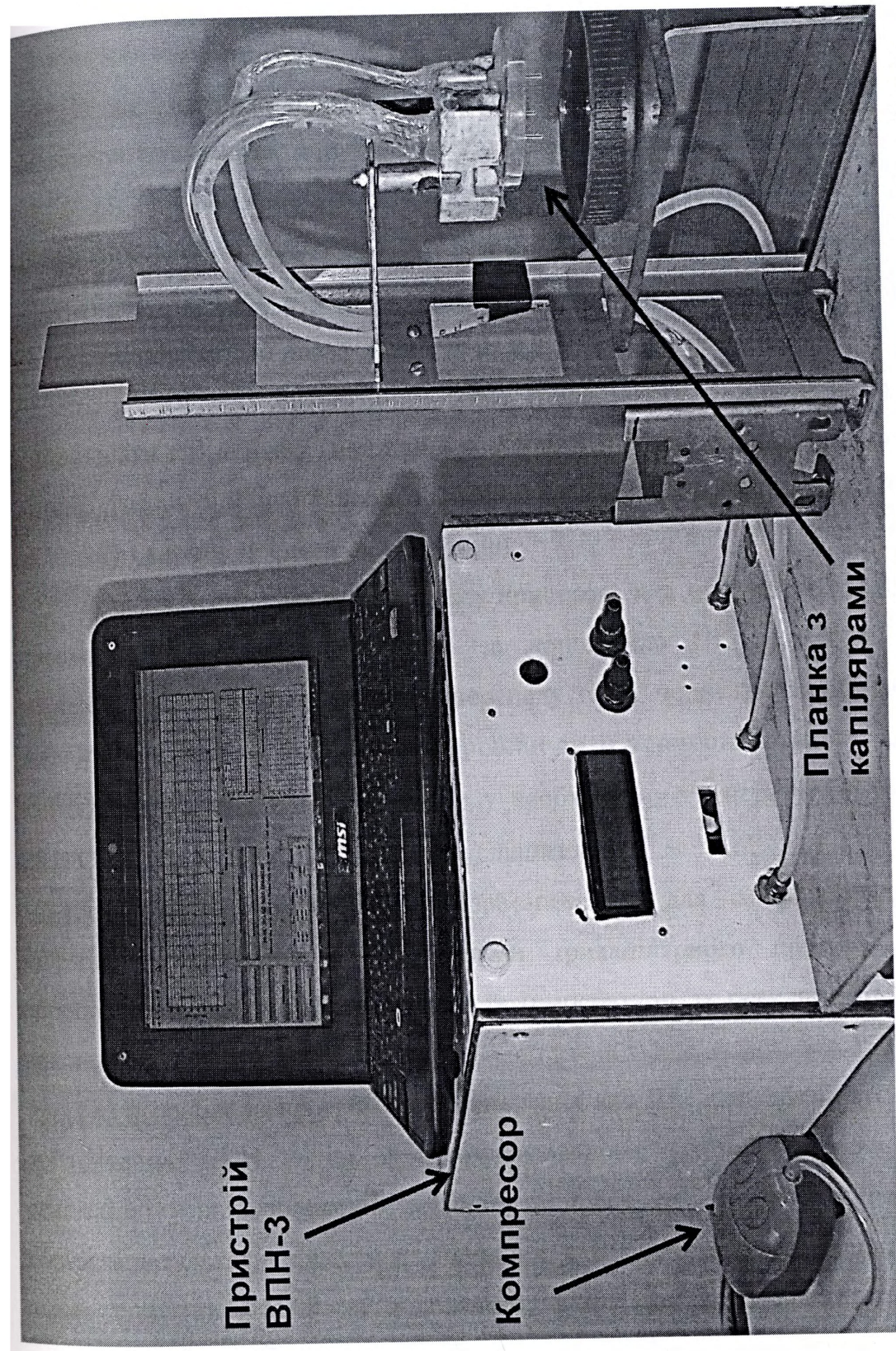


Рис. 3.7. Макет трикапілярного пристрою для дослідження поверхневого налягу рідин і розчинів ЦАР

Висновки до розділу

В даному розділі описаний розроблений трикапілярний пристрій, який забезпечує повну практичну реалізацію запропонованих методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР. На основі поданого в третьому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) розроблено структурну і функціональну схеми трикапілярного пристрою для автоматизованого дослідження РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР;

б) розроблено пневматичну схему трикапілярного пристрою, яка дозволяє здійснювати визначення ПН рідин і розчинів ПАР без попереднього вимірювання різниці густин рідини і газу та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину досліджуваної рідини;

в) розроблено електричну схему пристрою, яка забезпечує повне керування пневматичною схемою пристрою за допомогою ПК, а також паралельне вимірювання тиску газу у камері, перепаду тиску через протічний капіляр ДП1, температури газу і досліджуваної рідини та її термостабілізацію, що дозволяє здійснювати дослідження ПН рідин у необхідному температурному (від $+0^{\circ}$ до $+95^{\circ}$ °C) та часовому (0,1 с до 50000 с) діапазонах;

г) розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, який забезпечує керування усіма вузлами трикапілярного пристрою, первинне оброблення даних від давачів тиску та температури, їх передачу до ПК, а також виконання команд від ПК;

д) розроблено програмне забезпечення для ПК, яке забезпечує весь процес дослідження ДПН рідин в автоматизованому режимі, зокрема програмну реалізацію усіх розроблених методів та процедур, які дозволяють підвищити точність результатів досліджень ПН рідин, а саме: методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів, процедур визначення пневматичних опорів ділянок вимірювальних капілярів і врахування його впливу на виміряний максимальний тиск, визначення моментів максимальних тисків та їх

статичне оброблення, а також калібрування радіусів вимірювальних капілярів за максимальними тисками у бульбашках;

е) розроблено процедуру, яка забезпечує автоматичну діагностику трикапілярного пристрою шляхом визначення перед початком дослідження ПН рідини пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми пристрою та їх порівняння з попередньо визначеними номінальними значеннями цих опорів;

є) розроблено і реалізовано процедуру автоматизованого дослідження ДПН рідин і розчинів ПАР без попереднього вимірювання різниці густин рідини та газу та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину досліджуваної рідини.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І ТРИКАПІЛЯРНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

З метою метрологічного аналізу розроблених методів визначення ПН рідин та трикапілярного пристрою, що їх реалізує, необхідно ще раз записати основний вираз для розрахунку ПН рідини (2.41):

$$\sigma = \frac{P_{\max 3} - P_{\max 2} - \Delta \rho g(z_{02} - z_{01})}{2(1/R_{02} - 1/R_{01})}, \quad (4.1)$$

де $\Delta \rho$ – різниця густин досліджуваної рідини та газу, яка розраховується за виразом (2.39), котрий для зручності аналізу повторно наведений нижче:

$$\Delta \rho = (P_{\max 2} - P_{\max 1}) / g \Delta h, \quad (4.2)$$

$P_{\max 1}$, $P_{\max 2}$ та $P_{\max 3}$ – максимальні тиски для трьох капілярів, які визначаються за виразами (2.58 ÷ 2.60) на основі вимірювань у процесі дослідження ПН рідини значень максимальних тисків у вимірювальній камері $P_{\max 1 \text{ вим.}}$, $P_{\max 2 \text{ вим.}}$, $P_{\max 3 \text{ вим.}}$, перепадів тисків ΔP_{R11} , ΔP_{R12} , ΔP_{R13} через протічний капіляр ДП1 та температури газу T у вимірювальній камері приладу.

Для обчислення похибки визначення трикапілярним пристроєм ПН рідин використовуємо статистичний підхід, який дає більш реалістичну похибку [91]. Інформація про складові похибки визначення σ міститься лише в їх граничних значеннях, тому орієнтуючись на гірший випадок, розподіл складових похибки приймемо рівномірним. Тоді довірчі границі похибки $\Delta \sigma_{\text{дов.}}$ визначення σ , які характеризують сумарну похибку трикапілярного пристрою, розрахуємо так:

$$\Delta \sigma_{\text{дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial P_{\max 3}}\right)^2 \Delta P_{\max 3}^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial P_{\max 2}}\right)^2 \Delta P_{\max 2}^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Delta \rho}\right)^2 \Delta(\Delta \rho)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z_{02}}\right)^2 \Delta z_{02}^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z_{01}}\right)^2 \Delta z_{01}^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_{02}}\right)^2 \Delta R_{02}^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_{01}}\right)^2 \Delta R_{01}^2}, \quad (4.3)$$

де $K(P_{\text{дов.}}, n)$ – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності $P_{\text{дов.}}$ та кількості складових похибки n ($n = 7$). В нашому випадку приймаємо довірчу ймовірність потрапляння визначеного значення ПН рідини σ у довірчий інтервал $P_{\text{дов.}} = 0,95$, тоді $K(P_{\text{дов.}}, n) \approx 1,96$ [91].

Для розрахунку за виразом (4.3) $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ необхідно визначити граничні похибки його аргументів і їх коефіцієнти впливу. Розрахунок відповідних коефіцієнтів впливу може здійснюватися лише для певного значення σ та відповідних йому максимальних тисків P_{max1} , P_{max2} та P_{max3} , оскільки параметри R_{o1} , R_{o2} , z_{o1} та z_{o2} можуть бути розраховані лише для певного σ . Аналітичні вирази коефіцієнтів впливу складових похибки у (4.3) визначаються із виразу (4.1) і є такими:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\sigma}{\partial P_{\text{max3}}} &= \frac{1}{2(1/R_{o2} - 1/R_{o1})}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial P_{\text{max2}}} &= \frac{1}{2(1/R_{o1} - 1/R_{o2})}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial\Delta\rho} &= \frac{g(z_{o1} - z_{o2})}{2(1/R_{o2} - 1/R_{o1})}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial z_{o2}} &= \frac{\Delta\rho g}{2(1/R_{o1} - 1/R_{o2})}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial z_{o1}} &= \frac{\Delta\rho g}{2(1/R_{o2} - 1/R_{o1})}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial R_{o2}} &= \frac{2(P_{\text{max3}} - P_{\text{max2}} + \Delta\rho g(z_{o1} - z_{o2}))}{R_{o2}^2(2/R_{o1} - 2/R_{o2})^2}, \\ \frac{\partial\sigma}{\partial R_{o1}} &= -\frac{2(P_{\text{max3}} - P_{\text{max2}} + \Delta\rho g(z_{o1} - z_{o2}))}{R_{o1}^2(2/R_{o1} - 2/R_{o2})^2}. \end{aligned} \right\} (4.4)$$

Отже, для розрахунку довірчих границь похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ для отриманого у процесі дослідження ПН рідини σ слід визначити граничні похибки кожного із аргументів у виразі (4.3), а саме: ΔP_{max3} , ΔP_{max2} , $\Delta(\Delta\rho)$, ΔR_{o1} , Δz_{o1} , ΔR_{o2} та Δz_{o2} .

Інструментальні граничні похибки $\Delta P_{\max 3}$, $\Delta P_{\max 2}$, $\Delta(\Delta p)$ визначення максимальних тисків для третього і другого капілярів $P_{\max 3}$, $P_{\max 2}$ та різниці густин досліджуваної рідини і газу Δp у процесі дослідження ПН рідини залежать від граничних похибок $\Delta P_{\max 1 \text{ вим.}}$, $\Delta P_{\max 2 \text{ вим.}}$, $\Delta P_{\max 3 \text{ вим.}}$, $\Delta(\Delta P_{R11})$, $\Delta(\Delta P_{R12})$, $\Delta(\Delta P_{R13})$, ΔT вимірювання значень максимальних тисків у камері $P_{\max 1 \text{ вим.}}$, $P_{\max 2 \text{ вим.}}$, $P_{\max 3 \text{ вим.}}$, перепадів тиску ΔP_{R11} , ΔP_{R12} , ΔP_{R13} через протічний капіляр ДП1 та температури газу T для першого, другого та третього капілярів, відповідно.

Похибки ΔR_{o1} , Δz_{o1} , ΔR_{o2} , Δz_{o2} визначення радіусів кривизни та висот менісків R_{o1} , z_{o1} , R_{o2} , z_{o2} для відповідних вимірювальних капілярів у процесі дослідження ПН рідини є складовими методичної похибки трикапілярного пристрою.

Схема накопичення похибок трикапілярного пристрою, що включає вказані методичні і інструментальні похибки відповідних параметрів, які визначаються у процесі дослідження ПН рідини, наведена на рис. 4.1.

4.1 Граничні похибки визначення максимальних тисків для трьох капілярів

Максимальні тиски для трьох капілярів $P_{\max 1}$, $P_{\max 2}$ та $P_{\max 3}$ визначаються за виразами (2.58 ÷ 2.60). З даних виразів видно, що крім похибок параметрів, які вимірюються у процесі дослідження ПН рідини, граничні похибки $\Delta P_{\max 1}$, $\Delta P_{\max 2}$, $\Delta P_{\max 3}$ визначення максимальних тисків для трьох капілярів залежать також від граничних похибок ΔR_4 , ΔR_5 , ΔR_6 , ΔR_3 визначення пневматичних опорів відповідних ділянок трьох капілярів R_4 , R_5 , R_6 та регулятора тиску газу R_3 , які одноразово визначаються у процесі налаштування трикапілярного пристрою.

Зазначимо, що пневматичний опір R_3 визначається для кожного заданого тиску газу у вимірювальній камері пристрою перед процедурою пошуку значень максимальних тисків для трьох вимірювальних капілярів.

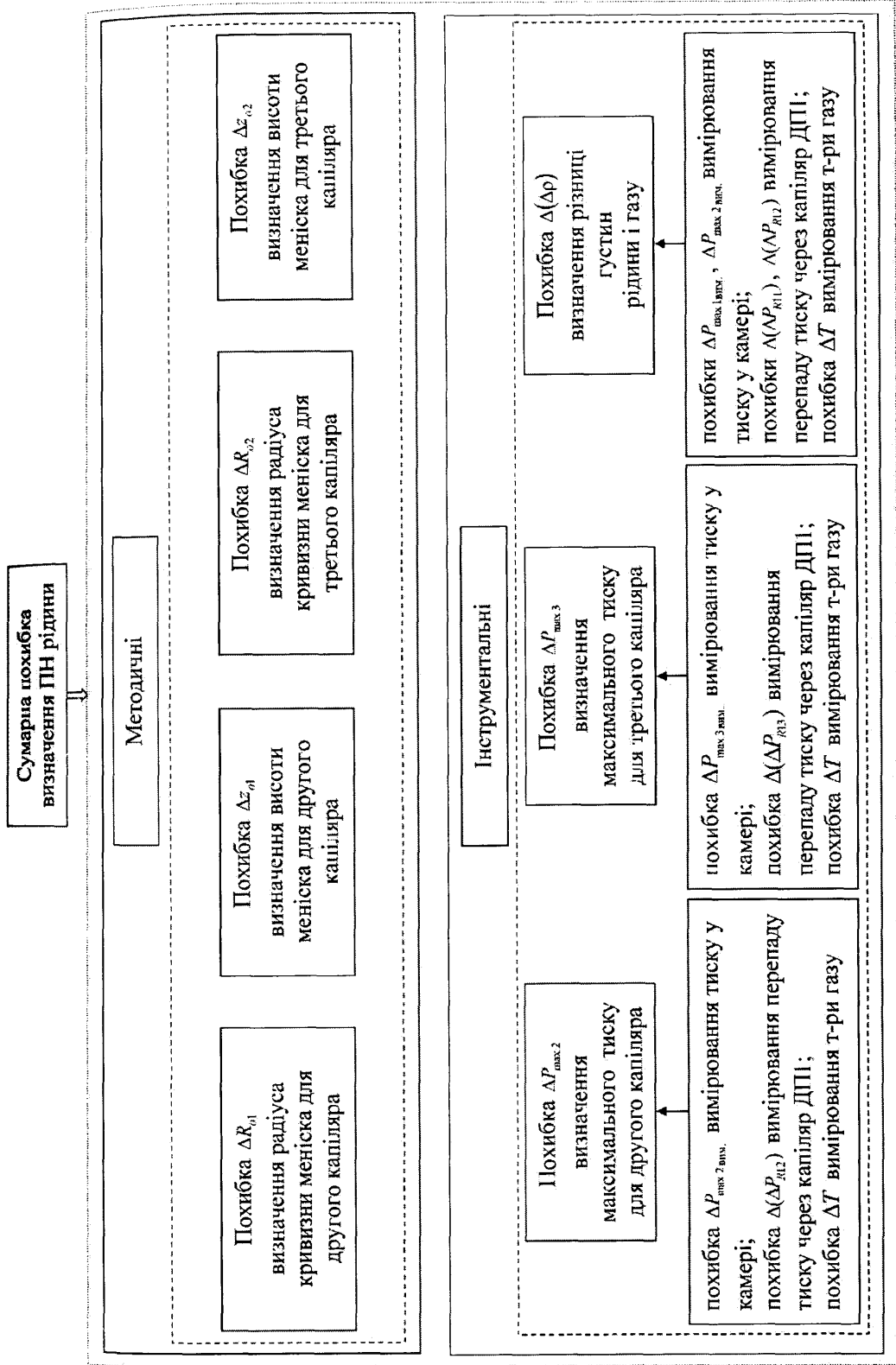


Рис. 4.1. Схема накопичення похибок трикапілярного пристрою у процесі дослідження ПН рідин

Отже, для визначення $\Delta P_{\max 1}$, $\Delta P_{\max 2}$, $\Delta P_{\max 3}$ спочатку необхідно розрахувати граничні похибки ΔR_4 , ΔR_5 , ΔR_6 та ΔR_3 визначення пневматичних опорів відповідних ділянок трьох капілярів R_4 , R_5 , R_6 та регулятора тиску газу R_3 .

Пневматичні опори регулятора тиску газу R_3 та відповідних ділянок для кожного із трьох капілярів R_4 , R_5 , R_6 визначаються за виразами (2.51 ÷ 2.54). Граничні похибки ΔR_3 , ΔR_4 , ΔR_5 , ΔR_6 складаються із сум випадкових та систематичних складових цих похибок.

Розрахунок граничної похибки визначення пневматичного опору ділянки третього капіляра ΔR_6 буде наступний. Результати спостереження аргументів P_{R_6} та $\Delta P_{R_{13}}$ є залежними, так як перепад тиску $\Delta P_{R_{13}}$ через протічний капіляр ДПІ з внутрішнім радіусом r_0 і довжиною l_0 залежить від тиску P_{R_6} у вимірювальній камері пристрою. По цій причині гранична похибка ΔR_6 розраховується за методикою опрацювання результатів опосередкованого багатократного вимірювання із залежними результатами спостережень аргументів [91] наступним чином.

Для виміряних P_{R_6} , $\Delta P_{R_{13}}$ та T визначають середнє значення R_6 пневматичного опору ділянки третього капіляра та вибіркоче стандартне відхилення S_{R_6} при кількості результатів вимірювання P_{R_6} , $P_{R_{13}}$ та T рівним 1000 значень ($m = 1000$) за таким виразом:

$$S_{R_6} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (R_{6i} - R_6)^2} = 9,6567 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}. \quad (4.5)$$

Виміряні параметри P_{R_6} , $\Delta P_{R_{13}}$ та T обсягом у 1000 значень отримують при здійсненні процедури визначення R_6 у процесі налаштування трикапілярного пристрою, котре триває близько 10 с для кожного із трьох капілярів при частоті вибірки результатів вимірювання 105,3 Гц.

Після цього розраховують оцінку стандартного відхилення $S_{\frac{P_{R_6}}{P_{\max 3}}}$ випадкової похибки середнього значення:

$$S_{R_6} = \frac{S_{R_6}}{\sqrt{m}} = 3,05 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}. \quad (4.6)$$

Обчислюють границю систематичної похибки визначення пневматичного опору R_6 . Враховуючи, що кількість параметрів P_{R6} , P_{R13} та T невелика, то границю систематичної складової похибки ΔR_{6C} знаходять як зважену суму граничних похибок кожного із аргументів ΔP_{R6} , ΔP_{R13} , ΔT помножених на їх коефіцієнти впливу за таким виразом:

$$\Delta R_{6C} = \left| \frac{\partial R_6}{\partial P_{R6}} \right| \Delta P_{R6} + \left| \frac{\partial R_6}{\partial \Delta P_{R13}} \right| \Delta(\Delta P_{R13}) + \left| \frac{\partial R_6}{\partial T} \right| \Delta T. \quad (4.7)$$

Похибки вимірюваних параметрів P_{R6} , ΔP_{R13} та T є незалежними, оскільки вимірюються двома давачами тиску різної конструкції Д1 та Д2, що підключені до різних АЦП, а також окремим давачем температури Т2.

Граничні значення систематичних похибок ΔP_{R6} , ΔP_{R13} , ΔT одержуються із відповідних метрологічних характеристик давачів Д1, Д2 та Т2. Так, граничне значення систематичної похибки ΔP_{R6} вимірювання тиску давачем Д1 становить 0,3 Па ($\Delta P_{R6} = 0,3$ Па). Давач Д1 був прокалібрований у складі всієї вимірювальної системи трикапілярного пристрою за допомогою еталонного манометра МКВ-250-0,02, котрий володіє граничною похибкою 0,1 Па у діапазоні від 0 до 600 Па. Граничне значення похибки вимірювання перепаду тиску через протічний капіляр ДП1 давачем Д2, який прокалібрований за таким самим принципом, становить 3 Па ($\Delta(\Delta P_{R13}) = 3$ Па). Граничне значення похибки вимірювання температури робочого газу згідно паспортних даних на цифровий давач температури Т2 рівне 0,5 °С ($\Delta T = 0,5$ °С).

Граничні похибки визначення радіуса r_0 та довжини l_0 протічного капіляра, які були визначені за сприяння Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України за допомогою прецизійного електронного мікроскопу EVO 40XVP, нехтуються через їх незначну величину порівняно з іншими складовими похибки трикапілярного пристрою.

Відповідні коефіцієнти впливу для (4.7) аналітично розраховуються із виразу (2.54) і записуються так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R_6}{\partial P_{R6}} &= \frac{8I_0(1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7}T - 5,9 \cdot 10^{-10}T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12}T^3)}{\Delta P_{R13} \cdot \pi r_0^4}, \\ \frac{\partial R_6}{\partial P_{R11}} &= -\frac{8P_{R6}I_0(1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7}T - 5,9 \cdot 10^{-10}T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12}T^3)}{\Delta P_{R13}^2 \cdot \pi r_0^4}, \\ \frac{\partial R_6}{\partial T} &= \frac{8P_{R6}I_0(1,05 \cdot 10^{-7} + 1,2 \cdot 10^{-9}T + 1,7 \cdot 10^{-11}T^2)}{\Delta P_{R13} \cdot \pi r_0^4}. \end{aligned} \right\} (4.8)$$

Для відомих значень $l_0 = 12,17 \cdot 10^{-3}$ м; $r_0 = 0,18 \cdot 10^{-3}$ м²; $\Delta P_{R6} = 0,3$ Па; $\Delta(\Delta P_{R13}) = 3$ Па; $\Delta T = 0,5$ °С і, відповідно, виміряних $P_{R6} = 8,8$ Па; $\Delta P_{R13} = 1097$ Па; $T = 20$ °С за виразом (4.7) розраховується граничне значення систематичної складової похибки ΔR_{6C} . В результаті отримуємо, що $\Delta R_{6C} = 1,4199 \cdot 10^5$ м⁻¹с⁻¹ при $R_6 = 3,5790 \cdot 10^6$ м⁻¹с⁻¹. Відношення границі систематичної похибки ΔR_{6C} до оцінки стандартного відхилення S_{R_6} випадкової похибки середнього значення є таким:

$$v = \frac{\Delta R_{6C}}{S_{R_6}} \approx 47. \quad (4.9)$$

Оскільки $v > 8$, отже згідно праці [91] складовою випадкової похибки вимірювання нехтуємо. Таким чином, за граничне значення похибки ΔR_6 визначення пневматичного опору ділянки третього капіляра приймаємо граничне значення його систематичної похибки, тобто $\Delta R_6 = \Delta R_{6C} = 1,4199 \cdot 10^5$ м⁻¹с⁻¹.

Аналогічно при розрахунку граничних похибок ΔR_4 та ΔR_5 пневматичних опорів ділянок для першого та другого капілярів, отримують, що відношення границь їх систематичних похибок до оцінок стандартних відхилень випадкових похибок середніх значень даних опорів більше 8. Отже, також обґрунтовано нехтують випадковою похибкою визначення опорів R_4 та R_5 . Тоді в якості граничних похибок визначення цих параметрів приймають значення їх систематичних складових ΔR_{4C} та ΔR_{5C} . Границі похибок ΔR_4 , ΔR_5 визначення пневматичних опорів ділянок першого та другого капілярів R_4 , R_5

розраховуються так:

$$\Delta R_4 = \Delta R_{4C} = \left| \frac{\partial R_4}{\partial P_{R4}} \right| \Delta P_{R4} + \left| \frac{\partial R_4}{\partial \Delta P_{R11}} \right| \Delta(\Delta P_{R11}) + \left| \frac{\partial R_4}{\partial T} \right| \Delta T, \quad (4.10)$$

$$\Delta R_5 = \Delta R_{5C} = \left| \frac{\partial R_5}{\partial P_{R5}} \right| \Delta P_{R5} + \left| \frac{\partial R_5}{\partial \Delta P_{R12}} \right| \Delta(\Delta P_{R12}) + \left| \frac{\partial R_5}{\partial T} \right| \Delta T, \quad (4.11)$$

де $\Delta P_{R4} = \Delta P_{R5} = \Delta P_{R6} = 0,3$ Па; $\Delta(\Delta P_{R11}) = \Delta(\Delta P_{R12}) = \Delta(\Delta P_{R13}) = 3$ Па; $\Delta T = 0,5$ °С. Коефіцієнти впливу у (4.10) і (4.11) визначаються із (2.52) та (2.53), відповідно. В результаті отримують, що $\Delta R_4 = 1,7963 \cdot 10^5$ м⁻¹с⁻¹ при $R_4 = 9,7030 \cdot 10^6$ м⁻¹с⁻¹ та $\Delta R_5 = 1,7232 \cdot 10^5$ м⁻¹с⁻¹ при $R_5 = 8,8114 \cdot 10^6$ м⁻¹с⁻¹.

За такою ж методикою розраховують два значення граничної похибки ΔR_{3low} та ΔR_{3high} визначення пневматичного опору регулятора тиску R_3 , які відповідають нижній та верхній межах його роботи. Для відповідних P_{R3} та ΔP_{R1} значення ΔR_{3low} та ΔR_{3high} розраховують так:

$$\Delta R_3 = \left| \frac{\partial R_3}{\partial P_{R3}} \right| \Delta P_{R3} + \left| \frac{\partial R_3}{\partial \Delta P_{R1}} \right| \Delta(\Delta P_{R1}) + \left| \frac{\partial R_3}{\partial T} \right| \Delta T, \quad (4.12)$$

де $\Delta P_{R3} = 0,3$ Па, $\Delta(\Delta P_{R1}) = 3$ Па, $\Delta T = 0,5$ °С. Коефіцієнти впливу для (4.12) аналітично розраховуються із виразу (2.51) і записуються так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R_3}{\partial P_{R3}} &= \frac{8I_0(1,32 \cdot 10^5 + 1,05 \cdot 10^7 T - 5,9 \cdot 10^{10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{12} T^3)}{\Delta P_{R1} \cdot \pi r_0^4}, \\ \frac{\partial R_3}{\partial P_{R1}} &= -\frac{8P_{R3} I_0(1,32 \cdot 10^5 + 1,05 \cdot 10^7 T - 5,9 \cdot 10^{10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{12} T^3)}{\Delta P_{R1}^2 \cdot \pi r_0^4}, \\ \frac{\partial R_3}{\partial T} &= \frac{8P_{R3} I_0(1,05 \cdot 10^7 + 1,2 \cdot 10^9 T + 1,7 \cdot 10^{11} T^2)}{\Delta P_{R1}^2 \cdot \pi r_0^4}. \end{aligned} \right\} (4.13)$$

В результаті одержують, що для верхньої межі роботи регулятора тиску ($P_{R3} = 600$ Па та $\Delta P_{R1} = 500$ Па) граничне значення похибки $\Delta R_{3high} = 4,2808 \cdot 10^6$ м⁻¹с⁻¹ при пневматичному опорі регулятора тиску для верхньої межі $R_{3high} = 4,7935 \cdot 10^8$ м⁻¹с⁻¹. Аналогічно для нижньої межі роботи регулятора

тиску газу ($P_{R3} = 100 \text{ Па}$ та $\Delta P_{R1} = 1000 \text{ Па}$) отримують, що граничне значення похибки $\Delta R_{3\text{low}} = 4,0914 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$ при $R_{3\text{low}} = 4,5040 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$. В якості граничного значення похибки ΔR_3 для всього робочого діапазону R_3 приймають більше значення серед двох визначених границь похибки, тобто $\Delta R_3 = 4,2808 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$.

Отже, в результаті проведених розрахунків отримують наступні граничні похибки визначення пневматичних опорів регулятора тиску газу і ділянок трьох вимірювальних капілярів: $\Delta R_3 = 4,2808 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\Delta R_4 = 1,7963 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\Delta R_5 = 1,7232 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\Delta R_6 = 1,4199 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}$. Отримані значення дозволяють розрахувати граничні похибки визначення максимальних тисків для трьох капілярів.

Методика оцінки похибки визначення максимального тиску для третього капіляра $P_{\text{max}3}$, який визначається за (2.60), буде наступною. Перепад тиску ΔP_{R13} через протічний капіляр ДПІ у момент максимального тиску у бульбашці залежить від значення тиску $P_{\text{max}3\text{вим}}$ у вимірювальній камері. По цій причині гранична похибка визначення максимального тиску для третього капіляра також розраховується за методикою опрацювання результатів вимірювання із залежними результатами спостережень аргументів [91].

Спочатку для кількох серій спостережень $P_{\text{max}3\text{вим}}$, ΔP_{R13} та T у всьому робочому діапазоні вимірювання $P_{\text{max}3\text{вим}}$ (від 100 Па до 600 Па) шляхом підстановки їх значень у вираз (2.60), визначають середнє значення $\overline{P_{\text{max}3}}$ і максимальне стандартне відхилення $S_{P_{\text{max}3}}$ випадкової похибки максимального тиску для третього капіляра при кількості спостережень кожного з його аргументів $P_{\text{max}3\text{вим}}$, P_{R13} та T рівним m (для $m = 2 \div 10$):

$$S_{P_{\text{max}3}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (P_{\text{max}3i} - \overline{P_{\text{max}3}})^2}. \quad (4.14)$$

Розраховують оцінку стандартного відхилення $S_{\overline{P_{\text{max}3}}}$ випадкової похибки середнього значення максимального тиску:

$$S_{\frac{P}{P_{\max 3}}} = \frac{S_{P_{\max 3}}}{\sqrt{m}}. \quad (4.15)$$

В результаті отримали, що $S_{\frac{P}{P_{\max 3}}} = 0,1$ Па. Враховуючи, що по вище описаних причинах граничні похибки вимірних значень $\Delta P_{\max 3 \text{ вим.}}$, $\Delta(\Delta P_{R13})$ та ΔT є незалежними, а також те, що кількість складових похибки велика ($n = 5$), то для підсумовування похибок знову використаємо статистичний підхід [91]. Тоді довірчі границі систематичної похибки $\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}}$ визначення $P_{\max 3}$ розраховують за таким виразом:

$$\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\max 3}}{\partial P_{\max 3 \text{ вим.}}}\right)^2 \Delta P_{\max 3 \text{ вим.}}^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 3}}{\partial \Delta P_{R13}}\right)^2 \Delta(\Delta P_{R13})^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 3}}{\partial T}\right)^2 \Delta T^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 3}}{\partial R_3}\right)^2 \Delta R_3^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 3}}{\partial R_6}\right)^2 \Delta R_6^2}, \quad (4.16)$$

де $K(P_{\text{дов.}}, n) \approx 1,96$ при $n \geq 4$ і $P_{\text{дов.}} = 0,95$; $\Delta P_{\max 3 \text{ вим.}} = 0,3$ Па; $\Delta(\Delta P_{R13}) = 3$ Па; $\Delta T = 0,5$ °C; $\Delta R_3 = 4,2808 \cdot 10^6$ м⁻¹с⁻¹; $\Delta R_6 = 1,4199 \cdot 10^5$ м⁻¹с⁻¹. З метою розрахунку $\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}}$ необхідно визначити відповідні коефіцієнти впливу аргументів на нього.

Їх аналітичні вирази визначаються з (2.60) і записуються так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_{\max 3}}{\partial P_{\max 3 \text{ вим.}}} &= \frac{R_6}{R_3} + 1, \\ \frac{\partial P_{\max 3}}{\partial \Delta P_{R13}} &= -\frac{\pi R_6 r_0^4}{8l_0(1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}, \\ \frac{\partial P_{\max 3}}{\partial T} &= -\frac{\pi \Delta P_{R13} R_6 r_0^4 (1,05 \cdot 10^{-7} + 1,2 \cdot 10^{-9} T + 1,7 \cdot 10^{-11} T^2)}{8l_0(1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)^2}, \\ \frac{\partial P_{\max 3}}{\partial R_3} &= -\frac{P_{\max 3 \text{ вим.}} R_6}{R_3^2}, \\ \frac{\partial P_{\max 3}}{\partial R_6} &= \frac{P_{\max 3 \text{ вим.}}}{R_3} - \frac{\pi \Delta P_{R13} r_0^4}{8l_0(1,32 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} T - 5,9 \cdot 10^{-10} T^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} T^3)}. \end{aligned} \right\} (4.17)$$

Для розрахунку коефіцієнтів впливу відповідних аргументів у виразі (4.17) задають значення вимірних параметрів $P_{\max 3 \text{ вим.}}$, ΔP_{R13} та T , а також попередньо

визначених пневматичних опорів ділянки третього капіляру R_6 та регулятора тиску газу R_3 , який розраховується за виразом (2.51). Для обчислення похибки $\Delta P_{\max 3 \text{ вим.}}$ розраховують значення $P_{\max 3 \text{ вим.}}$ шляхом ітераційного розв'язку рівняння (2.35) для заданих значень σ , Δp та H . Програмний код такого розрахунку представлений у Додатку Т.

Визначені коефіцієнти впливу аргументів та границі їх похибок дозволяють розрахувати довірчу границю систематичної похибки $\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}}$. Тоді розраховують відношення $\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}}$ до $S_{P_{\max 3}}$:

$$v = \frac{\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}}}{S_{P_{\max 3}}}. \quad (4.18)$$

Проведений автором аналіз свідчить, що для всього робочого діапазону визначення максимального тиску для третього капіляру, а також для першого та другого капілярів, виконується умова $0,8 \leq v < 8$. Тому складову випадкової похибки слід враховувати [91]. У такому випадку довірча сумарна гранична похибка $\Delta P_{\max 3}$ визначення максимального тиску для третього капіляра розраховується за таким виразом [91]:

$$\Delta P_{\max 3} = 0,8 \cdot (\Delta P_{\max 3 \text{ дов.}} + t_p \cdot S_{P_{\max 3}}), \quad (4.19)$$

де $t_p = t(n_{\text{св.}}; P_{\text{дов.}})$ – коефіцієнт Ст'юдента при довірчій ймовірності $P_{\text{дов.}} = 0,95$ та кількості ступенів $n_{\text{св.}} = m - 1$.

За таким же принципом розраховуються довірчі граничні похибки визначення максимальних тисків для першого та другого капілярів. Оцінки стандартних відхилень $S_{P_{\max 1}}$ та $S_{P_{\max 2}}$ випадкових похибок середніх значень максимальних тисків для першого та другого капілярів є рівними 0,11 Па та 0,09 Па, відповідно.

Довірчі границі $\Delta P_{\max 1 \text{ дов.}}$, $\Delta P_{\max 2 \text{ дов.}}$ систематичної похибки визначення максимальних тисків для першого та другого капілярів $\Delta P_{\max 1 \text{ дов.}}$ і $\Delta P_{\max 2 \text{ дов.}}$ обчислюються так:

$$\Delta P_{\max 1 \text{ дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\max 1}}{\partial P_{\max 1 \text{ вим.}}}\right)^2 \Delta P_{\max 1 \text{ вим.}}^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 1}}{\partial \Delta P_{R11}}\right)^2 \Delta(\Delta P_{R11})^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 1}}{\partial T}\right)^2 \Delta T^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 1}}{\partial R_3}\right)^2 \Delta R_3^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 1}}{\partial R_4}\right)^2 \Delta R_4^2}, \quad (4.20)$$

$$\Delta P_{\max 2 \text{ дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\max 2}}{\partial P_{\max 2 \text{ вим.}}}\right)^2 \Delta P_{\max 2 \text{ вим.}}^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 2}}{\partial \Delta P_{R12}}\right)^2 \Delta(\Delta P_{R12})^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 2}}{\partial T}\right)^2 \Delta T^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 2}}{\partial R_3}\right)^2 \Delta R_3^2 + \left(\frac{\partial P_{\max 2}}{\partial R_5}\right)^2 \Delta R_5^2}, \quad (4.21)$$

де $\Delta P_{\max 1 \text{ вим.}} = \Delta P_{\max 2 \text{ вим.}} = 0,3 \text{ Па}$; $\Delta(\Delta P_{R11}) = \Delta(\Delta P_{R12}) = 3 \text{ Па}$; $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$.

Аналогічно, як для третього капіляру, розраховують сумарні довірчі граничні похибки $\Delta P_{\max 1}$, $\Delta P_{\max 2}$:

$$\Delta P_{\max 1} = 0,8 \cdot (\Delta P_{\max 1 \text{ дов.}} + t_p \cdot S_{\frac{P}{P_{\max 1}}}), \quad (4.22)$$

$$\Delta P_{\max 2} = 0,8 \cdot (\Delta P_{\max 2 \text{ дов.}} + t_p \cdot S_{\frac{P}{P_{\max 2}}}), \quad (4.23)$$

В результаті розрахунку отримують сумарні довірчі граничні похибки $\Delta P_{\max 1}$, $\Delta P_{\max 2}$, $\Delta P_{\max 3}$, які для заданих σ , Δr та H , характеризують граничні похибки визначення максимальних тисків для трьох капілярів.

4.2 Граничні похибки визначення радіусів кривизни та висот менісків для трьох вимірювальних капілярів

Граничну похибку ΔR_{01} визначення радіуса кривизни R_{01} для другого капіляру, яка складається із суми складової $\left|\frac{\partial R_{01}}{\partial r_1}\right| \Delta r_1$ та методичної похибки $R_{0 \text{ апрокс}}$ апроксимаційної залежності $R_0 = a \cdot f_2(r/a)$, визначають за таким виразом:

$$\Delta R_{01} = \left|\frac{\partial R_{01}}{\partial r_1}\right| \Delta r_1 + |R_{0 \text{ апрокс}}|, \quad (4.24)$$

де $\frac{\partial R_{01}}{\partial r_1}$ – коефіцієнт впливу граничної похибки Δr_1 визначення радіусу другого

капіляра на R_{o1} , який визначається аналітичним диференціюванням у виразі (2.33) параметру R_o по r (при $r = r_1$); Δr_1 – гранична похибка визначення радіусу другого капіляру.

Граничну похибку ΔR_{o2} визначення радіуса кривизни меніска R_{o2} для третього капіляра визначають так:

$$\Delta R_{o2} = \left| \frac{\partial R_{o2}}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 + |R_{o\text{апрокс}}|. \quad (4.25)$$

де $\frac{\partial R_{o2}}{\partial r_2}$ – коефіцієнт впливу граничної похибки Δr_2 визначення радіусу третього капіляра на R_{o2} , який визначається аналітичним диференціюванням у виразі (2.33) параметру R_o по r (при $r = r_2$); Δr_2 – гранична похибка визначення радіусу третього капіляру.

Граничну похибку Δz_{o1} визначення висоти меніска для другого капіляру обчислюють так:

$$\Delta z_{o1} = \left| \frac{\partial z_{o1}}{\partial r_1} \right| \Delta r_1 + |\Delta z_{o\text{апрокс}}|, \quad (4.26)$$

де $\left| \frac{\partial z_{o1}}{\partial r_1} \right|$ – коефіцієнт впливу граничної похибки Δr_1 визначення радіусу другого капіляра на z_{o1} , який розраховується аналітичним диференціюванням у виразі (2.34) параметру z_o по r (при $r = r_1$); $\Delta z_{o\text{апрокс}}$ – методична похибка визначення апроксимаційної залежності $z_o = a \cdot f_3(r/a)$.

Граничну похибку Δz_{o2} визначення висоти меніска для третього капіляра розраховують так:

$$\Delta z_{o2} = \left| \frac{\partial z_{o2}}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 + |\Delta z_{o\text{апрокс}}|, \quad (4.27)$$

де $\frac{\partial z_{o2}}{\partial r_2}$ – коефіцієнт впливу граничної похибки визначення радіусу третього капіляра Δr_2 на z_{o2} , який розраховується аналітичним диференціюванням у виразі

(2.34) параметру z_o по r (при $r = r_2$).

Для визначення максимальних значень методичних похибок $\Delta R_{оаапрокс}$ і $\Delta z_{оапрокс}$ побудуємо графіки абсолютних похибок апроксимаційних залежностей безрозмірних параметрів R_o/a та z_o/a як функцій від безрозмірного параметру r/a (рис. 4.2 та 4.3). На рис. 4.2 знаходимо максимальну абсолютну похибку апроксимації R_o/a від r/a для всього робочого діапазону трикапілярного пристрою. Вона становить $\Delta R_o/a = 6,70 \cdot 10^{-5}$. Тоді для максимального значення капілярної сталої у робочому діапазоні трикапілярного пристрою $a^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ отримаємо, що $\Delta R_{оаапрокс} = 2,119 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

За таким самим принципом розрахуємо максимальну похибку $\Delta z_{оапрокс}$. На рис. 4.3 знаходимо максимальну абсолютну похибку апроксимації z_o/a від r/a . Вона становить $\Delta z_o/a = 4,98 \cdot 10^{-5}$. Тоді для $a^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ отримують, що $\Delta z_{оапрокс} = 1,575 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Слід відзначити, що до методичних похибок трикапілярного пристрою входить також похибка методу ітерації, який застосовується для розрахунку ПН рідини за виразом (2.40). Вона становить $2,22 \cdot 10^{-16} \text{ Н/м}$ [78, 84]. Вона нехтується, оскільки є нікчемно малою у порівнянні з іншими складовими похибки трикапілярного пристрою.

Для розрахунку за виразами (4.24 ÷ 4.27) граничних похибок визначення радіусів кривизни та висот менісків для трьох вимірювальних капілярів необхідно також оцінити границі похибки визначення радіусів вимірювальних капілярів r_1 та r_2 . Слід зазначити, що r_1 та r_2 визначаються до проведення дослідження ПН рідин, а у процесі експерименту визначаються лише складові методичних похибок визначення R_{o1}, z_{o1} , R_{o2}, z_{o2} . Радіуси r_1 та r_2 визначають за розробленою процедурою, яка описана у підрозділі 2.6. Визначення радіусів капілярів відбувається шляхом застосування зразкової рідини з відомим ПН $\sigma_{зраз}$, різницею густин рідини та газу $\Delta \rho_{зраз}$, глибиною занурення другого та третього капілярів,

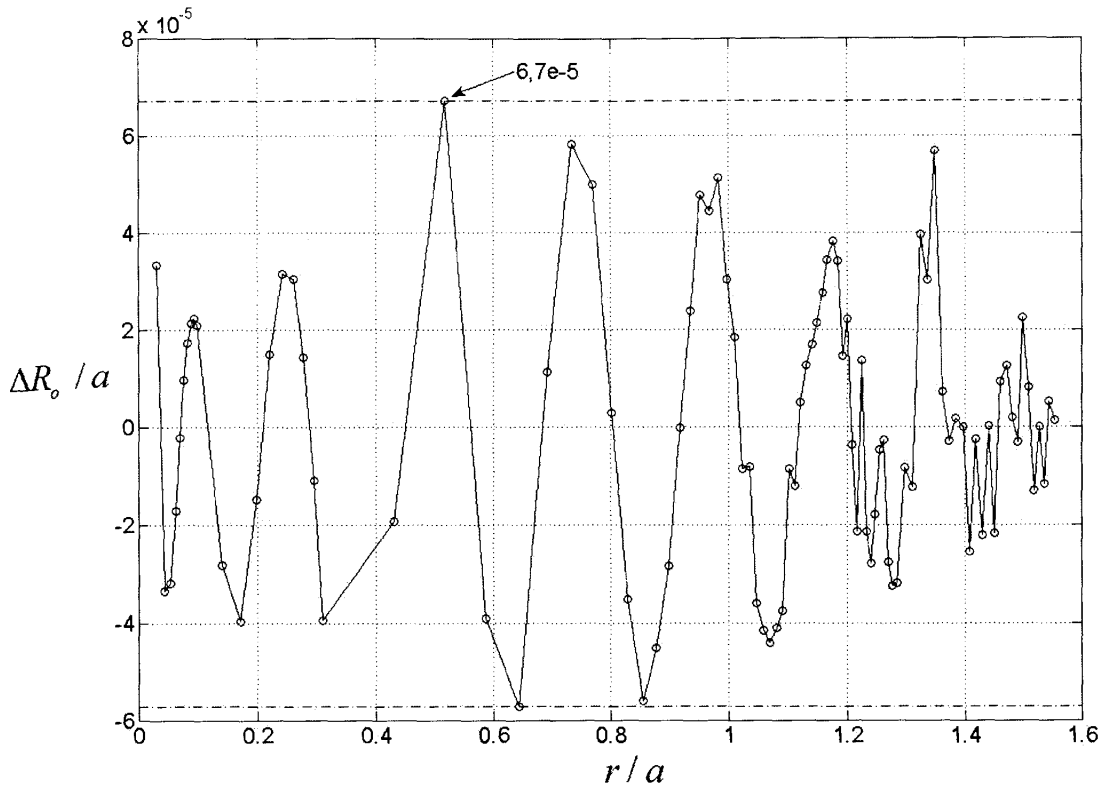


Рис. 4.2. Залежність абсолютної похибки апроксимації R_0/a як функції від r/a

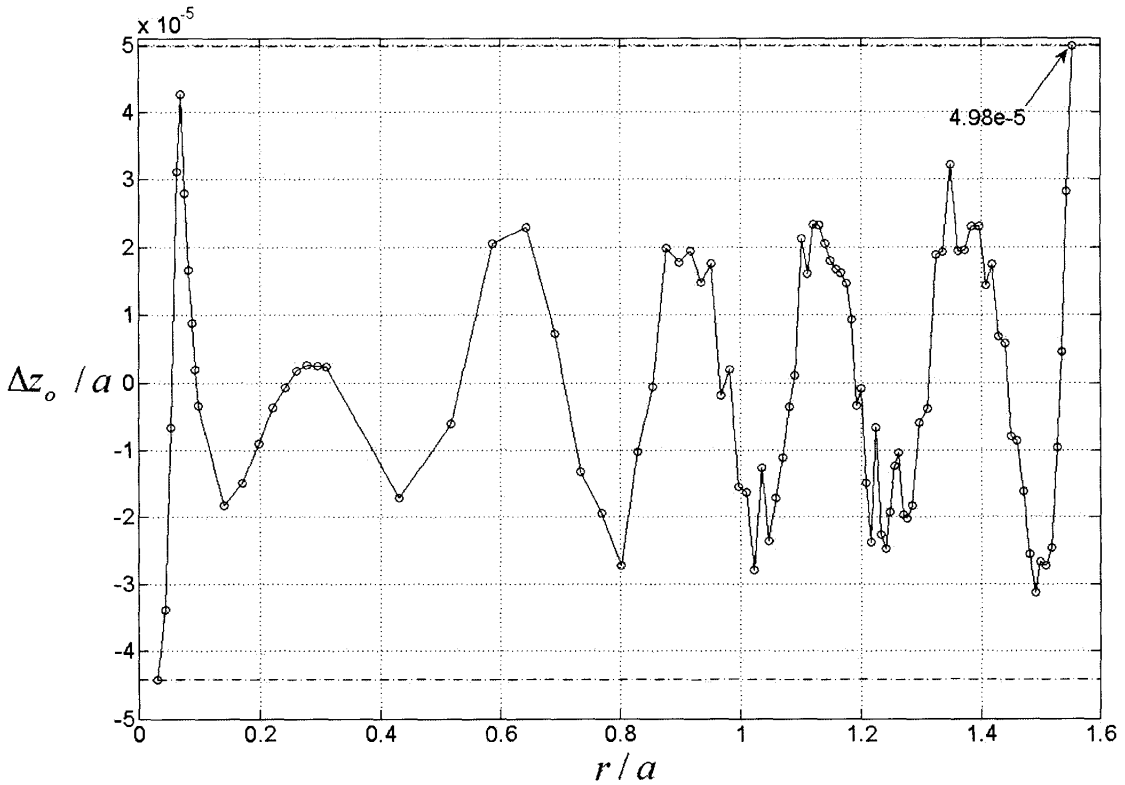


Рис. 4.3. Залежність абсолютної похибки апроксимації z_0/a як функції від r/a

яка рівна Δh , та визначеними максимальними тисками для них $P_{\max 2}$ і $P_{\max 3}$, відповідно. Тоді шляхом розв'язку ітераційним методом рівняння (2.35) із застосуванням апроксимаційних залежностей (2.33) та (2.34) знаходять радіус відповідного вимірювального капіляра.

Значення Δh може визначатися як прямим вимірюванням, так і опосередкованим методом за запропонованою у підрозділі 2.6 методикою. Для Δh допустима похибка вимірювання може сягати 0,01 мм, тому доцільніше вибрати метод, який дасть меншу граничну похибку Δh . Для порівняння визначення Δh було проведено обома методами, а саме пряме вимірювання Δh за допомогою оптичного мікроскопу, що дало значення граничної похибки $\Delta(\Delta h) = 0,01$ мм, а також визначення Δh вище описаним опосередкованим методом.

Так, при відомій різниці густин зразкової рідини і газу $\Delta\rho_{\text{зраз}}$ та визначених значеннях максимальних тисків для першого та другого капілярів $P_{\max 1}^*$ та $P_{\max 2}^*$ параметр Δh визначається за виразом (2.60), який повторно запишемо нижче:

$$\Delta h = \frac{(P_{\max 2}^* - P_{\max 1}^*)}{\Delta\rho g}. \quad (4.28)$$

Оцінка граничної похибки визначення Δh проводиться за методикою опрацювання результатів багаторазового опосередкованого вимірювання із незалежними аргументами [91], оскільки аргументи $P_{\max 1}^*$ та $P_{\max 2}^*$ є незалежними, так як вимірювання їх складових здійснюється по чергово для двох різних капілярів. Визначають оцінки стандартних відхилень $S_{P_{\max 1}^*}$, $S_{P_{\max 2}^*}$ випадкових похибок середнього значення максимальних тисків для першого та другого капілярів при кількості спостережень виміряних максимальних тисків в 100 значень ($m = 100$):

$$S_{P_{\max 1}^*} = \frac{S_{P_{\max 1}^*}}{\sqrt{m}} = \frac{0,22}{\sqrt{100}} = 0,022 \text{ Па}, \quad (4.29)$$

$$S_{P_{\max 2}^*} = \frac{S_{P_{\max 2}^*}}{\sqrt{m}} = \frac{0,23}{\sqrt{100}} = 0,023 \text{ Па.} \quad (4.30)$$

Розраховують сумарну оцінку стандартного відхилення $S_{\Delta h}$ випадкової похибки середнього значення:

$$S_{\Delta h} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 2}^*}\right)^2 S_{P_{\max 2}^*}^2 + \left(\frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 1}^*}\right)^2 S_{P_{\max 1}^*}^2}. \quad (4.31)$$

В результаті отримують, що $S_{\Delta h} = 3,24 \cdot 10^{-6}$ м. Так як, $P_{\max 1}^*$ та $P_{\max 2}^*$ задаються довірчими граничними похибками і самі містять 5 незалежних складових їх похибки, то для оцінки систематичної похибки Δh розрахуємо її довірчі границі:

$$\Delta(\Delta h)_{\text{дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 2}^*}\right)^2 \Delta P_{\max 2 \text{ дов.}}^2 + \left(\frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 1}^*}\right)^2 \Delta P_{\max 1 \text{ дов.}}^2 + \left(\frac{\partial \Delta h}{\partial \Delta \rho_{\text{зраз}}}\right)^2 \Delta(\Delta \rho_{\text{зраз}})^2}, \quad (4.32)$$

де $K(P_{\text{дов.}}, n) = 1,96$; $\Delta P_{\max 2 \text{ дов.}}^* = 0,38$ Па при $P_{\max 2}^* = 498,4$ Па; $\Delta P_{\max 1 \text{ дов.}}^* = 0,41$ Па при $P_{\max 1}^* = 458,1$ Па; $\Delta(\Delta \rho_{\text{зраз}}) = 1$ кг/м³ при $\Delta \rho_{\text{зраз}} = 1000$ кг/м³.

Аналітичні вирази коефіцієнтів впливу у (4.32) визначаються із виразу (4.28) і будуть такими:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 2}^*} &= \frac{1}{\Delta \rho_{\text{зраз}} g}, \\ \frac{\partial \Delta h}{\partial P_{\max 1}^*} &= -\frac{1}{\Delta \rho_{\text{зраз}} g}, \\ \frac{\partial \Delta h}{\partial \Delta \rho_{\text{зраз}}} &= \frac{P_{\max 1}^* - P_{\max 2}^*}{g \Delta \rho_{\text{зраз}}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

В результаті розрахунків отримують, що $\Delta(\Delta h)_{\text{дов.}} = 6,46 \cdot 10^{-5}$ м. Відношення $\Delta(\Delta h)_{\text{дов.}}$ до $S_{\Delta h}$ становить $\nu \approx 20$. Отже, випадковою складовою похибки можна знехтувати [91].

Довірча границя похибки опосередкованого визначення Δh рівна

$6,46 \cdot 10^{-5}$ м, що 6 разів більше, ніж похибка визначення Δh методом прямого вимірювання.

Тому в якості граничного значення похибки $\Delta(\Delta h)$ приймемо похибку прямого вимірювання $\Delta(\Delta h) = 1 \cdot 10^{-5}$ м.

Розрахувавши $\Delta(\Delta h)$ можливо визначити граничні похибки опосередкованого визначення радіусів трьох капілярів r_1 та r_2 наступним чином. Похибка визначення r_1 чи r_2 складається із суми випадкової та систематичної її складових. Як для попереднього випадку, складовою випадкової похибки вимірювання нехтуємо, через її незначне значення.

Для оцінки складової систематичної похибки використаємо статистичний підхід і розрахуємо її довірчі границі, так як кількість складових цієї похибки n є значною ($n=7$) і вони є незалежними між собою. Довірчі границі похибки визначення радіусів першого та другого капілярів $\Delta r_{1\text{дов.}}$ запишуться так:

$$\Delta r_{1\text{дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дог.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial r_1}{\partial P_{\text{max2}}}\right)^2 \Delta P_{\text{max2}}^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial \sigma_{\text{зраз}}}\right)^2 \Delta \sigma_{\text{зраз}}^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial \rho_{\text{зраз}}}\right)^2 \Delta(\Delta \rho_{\text{зраз}})^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial h_0}\right)^2 \Delta h_0^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial \Delta z_{\text{оапрокс}}}\right)^2 \Delta z_{\text{оапрокс}}^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial R_{\text{оапрокс}}}\right)^2 \Delta R_{\text{оапрокс}}^2 + \left(\frac{\partial r_1}{\partial \Delta h}\right)^2 \Delta(\Delta h)^2}, \quad (4.34)$$

де $K(P_{\text{дог.}}, n) = 1,96$; $\Delta P_{\text{max2}} = 0,38$ Па при $P_{\text{max3}} = 498,4$ Па; $\Delta \sigma_{\text{зраз}} = 0,01 \cdot 10^{-3}$ Н/м при $\sigma_{\text{зраз}} = 72,75$ Н/м; $\Delta \rho_{\text{зраз}} = 1$ кг/м³ при $\rho_{\text{зраз}} = 1000$ кг/м³; $\Delta(\Delta h) = 1 \cdot 10^{-5}$ м при $\Delta h = 4,115 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta h_0 = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м при $h_0 = 0$ м (h_0 – гранична похибка встановлення моменту дотику нижнього торця першого капіляра із поверхнею зразкової рідини). Для визначення $\Delta r_{1\text{дов.}}$ з виразів (2.33) – (2.35) необхідно аналітично розрахувати відповідні коефіцієнти впливу, що є нездоланим завданням.

Разом з тим, враховуючи, що радіус капіляра є пасивним елементом, то відповідні коефіцієнти впливу знайдемо методом малих приростів, який ґрунтується на лінійності приросту вихідного параметра при малій зміні вхідного

параметру, залишаючи інші параметри незмінними [92]. В результаті отримують наступні значення емпіричних коефіцієнтів впливу:

$$\frac{\partial r_1}{\partial P_{\max 2}} = 7,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{Па}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial \Delta p_{\text{зраз}}} = 3,04 \cdot 10^{-8} \text{ м}^5/\text{кг}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial \sigma_{\text{зраз}}} = 0,004 \text{ м}^3/\text{Н}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial R_{0\text{апрокс}}} = -1,001 \text{ м};$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial \Delta z_{0\text{апрокс}}} = -0,069 \text{ м}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial \Delta h} = 0,0069 \text{ м}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial h_0} = 0,0069 \text{ м}.$$

Це дозволяє за (4.35) розрахувати довірчу граничну похибку $\Delta r_{1\text{дов.}} = 5,05 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Аналогічно визначаються довірчі границі похибки визначення радіусу третього капіляра $\Delta r_{2\text{дов.}}$:

$$\Delta r_{2\text{дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial r_2}{\partial P_{\max 3}}\right)^2 \Delta P_{\max 2}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial \sigma_{\text{зраз}}}\right)^2 \Delta \sigma_{\text{зраз}}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial \Delta p_{\text{зраз}}}\right)^2 \Delta(\Delta p_{\text{зраз}})^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial h_0}\right)^2 \Delta h_0^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial \Delta z_{0\text{апрокс}}}\right)^2 \Delta z_{0\text{апрокс}}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial R_{0\text{апрокс}}}\right)^2 \Delta R_{0\text{апрокс}}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial \Delta h}\right)^2 \Delta(\Delta h)^2}, \quad (4.35)$$

де $\frac{\partial r_2}{\partial P_{\max 3}} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Па}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial \sigma_{\text{зраз}}} = 0,007 \text{ м}^3/\text{Н}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial \Delta p_{\text{зраз}}} = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^5/\text{кг};$

$$\frac{\partial r_2}{\partial R_{0\text{апрокс}}} = -0,999 \text{ м}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial \Delta z_{0\text{апрокс}}} = -0,0167 \text{ м}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial \Delta h} = 0,0168 \text{ м}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial h_0} = 0,0167 \text{ м}. \quad \text{В}$$

результаті отримують, що $\Delta r_{2\text{дов.}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Таким чином, при оцінці похибок визначення радіусів трьох вимірювальних капілярів та різниці по висоті між нижніми торцями першого та другого капілярів ми отримали, що $\Delta(\Delta h) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \quad \Delta r_{1\text{дов.}} = 5,05 \cdot 10^{-7} \text{ м}; \quad \Delta r_{2\text{дов.}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Довірчі граничні похибки $\Delta r_{1\text{дов.}}$ і $\Delta r_{2\text{дов.}}$ визначення радіусів трьох вимірювальних капілярів приймають в якості граничних похибок Δr_1 і Δr_2 у виразах (4.24 ÷ 4.27), тобто $\Delta r_1 = \Delta r_{1\text{дов.}}$ і $\Delta r_2 = \Delta r_{2\text{дов.}}$.

Це дозволяє для отриманого у результаті дослідження ПН рідини значення σ за (4.24 ÷ 4.27) оцінити граничні похибки ΔR_{o1} , Δz_{o1} , ΔR_{o2} та Δz_{o2} .

4.3 Границі похибки визначення різниці густин рідини та газу

Для розрахунку довірчих границь $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ похибки визначення ПН рідини необхідно також оцінити граничну похибку $\Delta(\Delta\rho)$ визначення різниці густин рідини та газу. Різниця густин рідини та газу $\Delta\rho$ розраховується за виразом (2.39) на основі визначених максимальних тисків для першого та другого капілярів P_{max1} і P_{max2} при відомій різниці по висоті між їх нижніми торцями Δh .

Оцінки похибок ΔP_{max1} , ΔP_{max2} визначення максимальних тисків P_{max1} та P_{max2} задаються довірчими граничними похибками для отриманих у експерименті значень σ , $\Delta\rho$ та H і містять 5 незалежних складових. Тому для оцінки похибки визначення $\Delta\rho$ також використаємо довірчі границі $\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}}$, які можна записати так:

$$\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}} = \pm \frac{K(P_{\text{дов.}}, n)}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial\Delta\rho}{\partial P_{\text{max2}}}\right)^2 \Delta P_{\text{max2}}^2 + \left(\frac{\partial\Delta\rho}{\partial P_{\text{max1}}}\right)^2 \Delta P_{\text{max1}}^2 + \left(\frac{\partial\Delta\rho}{\partial\Delta h}\right)^2 \Delta(\Delta h)^2}, \quad (4.36)$$

де $K(0,95;5) = 1,96$; $\Delta(\Delta h) = 1 \cdot 10^{-5}$ м при $\Delta h = 4,115 \cdot 10^{-3}$ м.

Аналітичні вирази коефіцієнтів впливу у (4.36) визначаються із виразу (4.2) і будуть такими:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\Delta\rho}{\partial P_{\text{max2}}} &= \frac{1}{\Delta h g}, \\ \frac{\partial\Delta\rho}{\partial P_{\text{max1}}} &= -\frac{1}{\Delta h g}, \\ \frac{\partial\Delta\rho}{\partial\Delta h} &= \frac{P_{\text{max1}} - P_{\text{max2}}}{g\Delta h^2}. \end{aligned} \right\} (4.37)$$

Розраховані значення ΔP_{max1} , ΔP_{max2} для отриманих у результаті дослідження ПН рідини σ , $\Delta\rho$ та H дозволяють за виразом (4.36) із врахуванням (4.37) розрахувати довірчі границі похибки визначення різниці густин рідини та газу.

В результаті обчислень була отримана залежність $\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}}$ від ПН рідини σ для всього робочого діапазону трикапілярного пристрою (рис. 4.4).

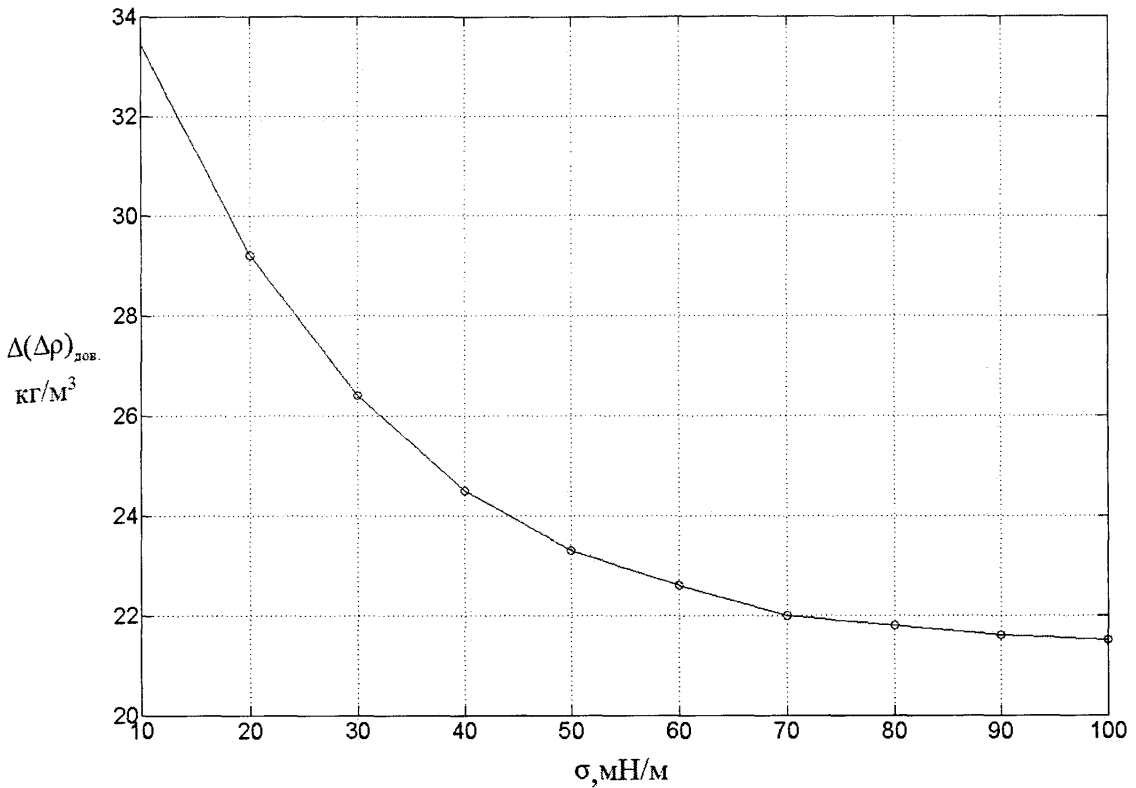


Рис. 4.4. Залежність $\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}}$ від ПН рідини σ при $\Delta\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $H = 10 \text{ мм}$

4.4 Розрахунок довірчих границь похибки визначення поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР і аналіз отриманих результатів

Обчисливши граничні похибки аргументів ΔP_{max3} , ΔP_{max2} , $\Delta(\Delta\rho)$, Δz_{o2} , Δz_{o1} , ΔR_{o2} та ΔR_{o1} за виразом (4.3) розраховують довірчу граничну похибку $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ визначення ПН рідини для отриманих у експерименті значень σ , $\Delta\rho$ та H . Результат такого розрахунку у вигляді залежності $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від σ представлений на рис. 4.5.

З метою розрахунку $\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}}$ і $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$, а також для аналізу впливу σ , $\Delta\rho$ та H на $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ розроблено спеціальний програмний код (наведений у додатку С), який дозволяє в автоматичному режимі розрахувати $\Delta(\Delta\rho)_{\text{дов.}}$ і $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ для визначених у результаті експерименту значень σ , $\Delta\rho$ та H .

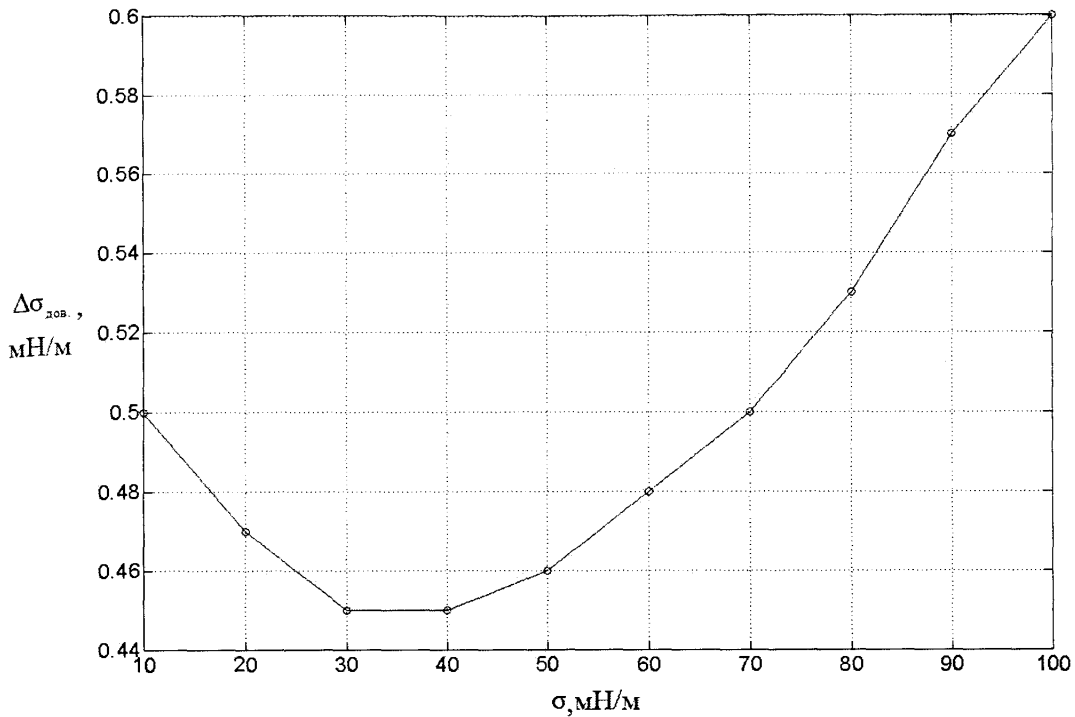


Рис. 4.5. Залежність $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від ПН рідини σ при $\Delta\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $H = 10 \text{ мм}$

Відзначимо, що залежність $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від $\Delta\rho$ (рис. 4.6), а також $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від H (рис. 4.7), свідчать про незначну залежність $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від $\Delta\rho$ та H , хоча проявляється, що із зростанням H та $\Delta\rho$ значення $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ дещо зменшується.

З метою оцінки впливу випадкових похибок вимірювання максимальних тисків для кожного із трьох капілярів на $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ було проаналізовано залежність $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від кількості точок вимірювання максимального тиску N для кожного із трьох капілярів (N – необхідний показник відтворення, який встановлюється перед процедурою вимірювання і по замовчуванню рівний 4).

Аналіз показав, що оптимальним значенням показника відтворення є 4–5, оскільки при $N \leq 3$ різко зростає випадкова складова визначення максимальних тисків, і як наслідок σ , а при $N \geq 6$ зменшення $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ є незначним при суттєвому збільшенні часу експерименту (рис. 4.8). Це підтверджує обґрунтованість здійснення багаторазових спостережень максимальних тисків для кожного із трьох вимірювальних капілярів, що дозволяє підвищити точність дослідження ПН рідин.

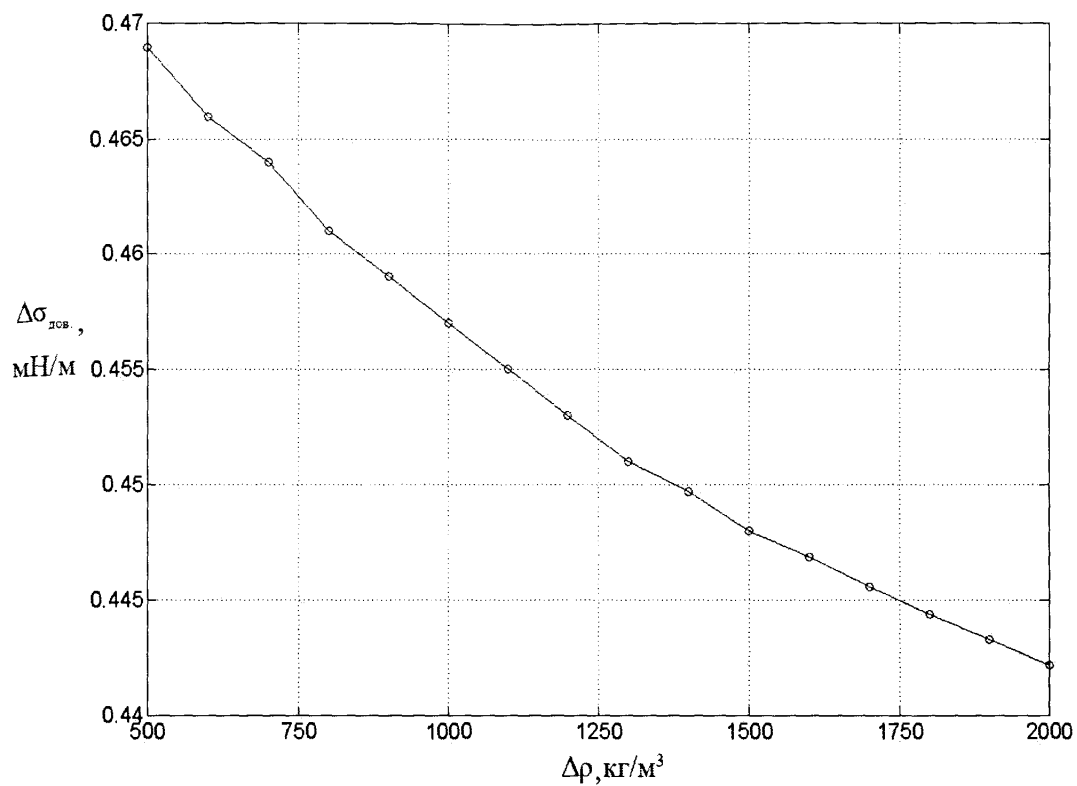


Рис. 4.6. Залежність $\Delta\sigma_{\text{дов}}$ від різниці густин рідини та газу $\Delta\rho$ при $\sigma = 50$ мН/м та $H = 10$ мм

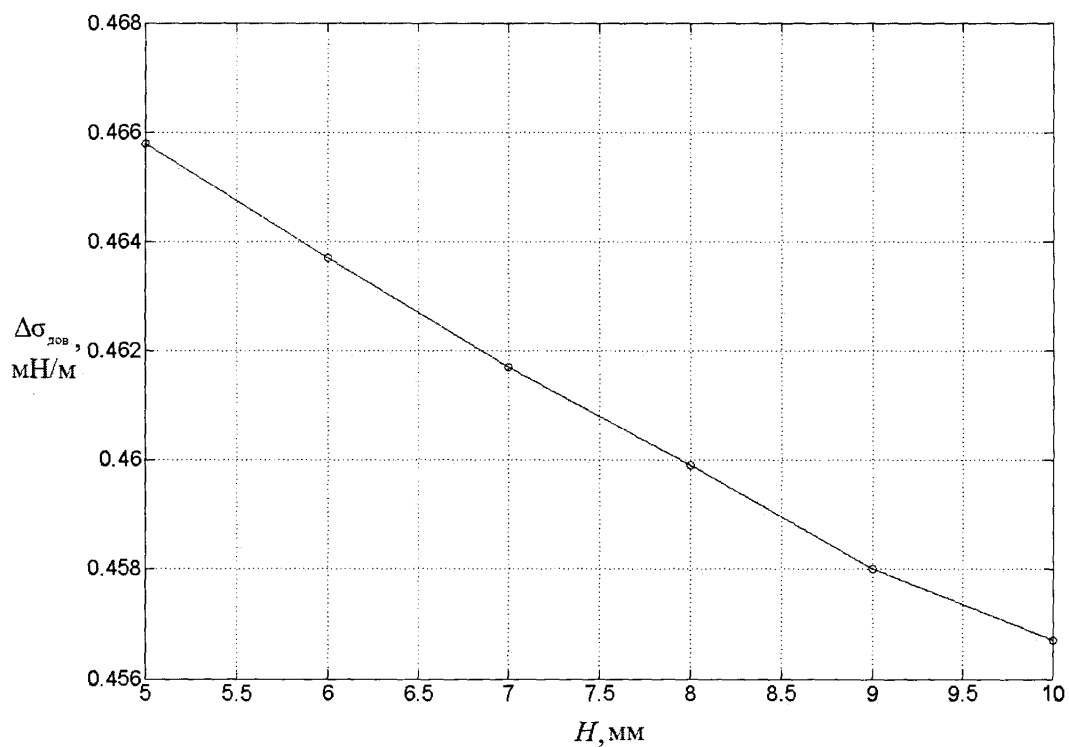


Рис. 4.7. Залежність $\Delta\sigma_{\text{дов}}$ від H при $\sigma = 50$ мН/м та $\Delta\rho = 1000$ кг/м³

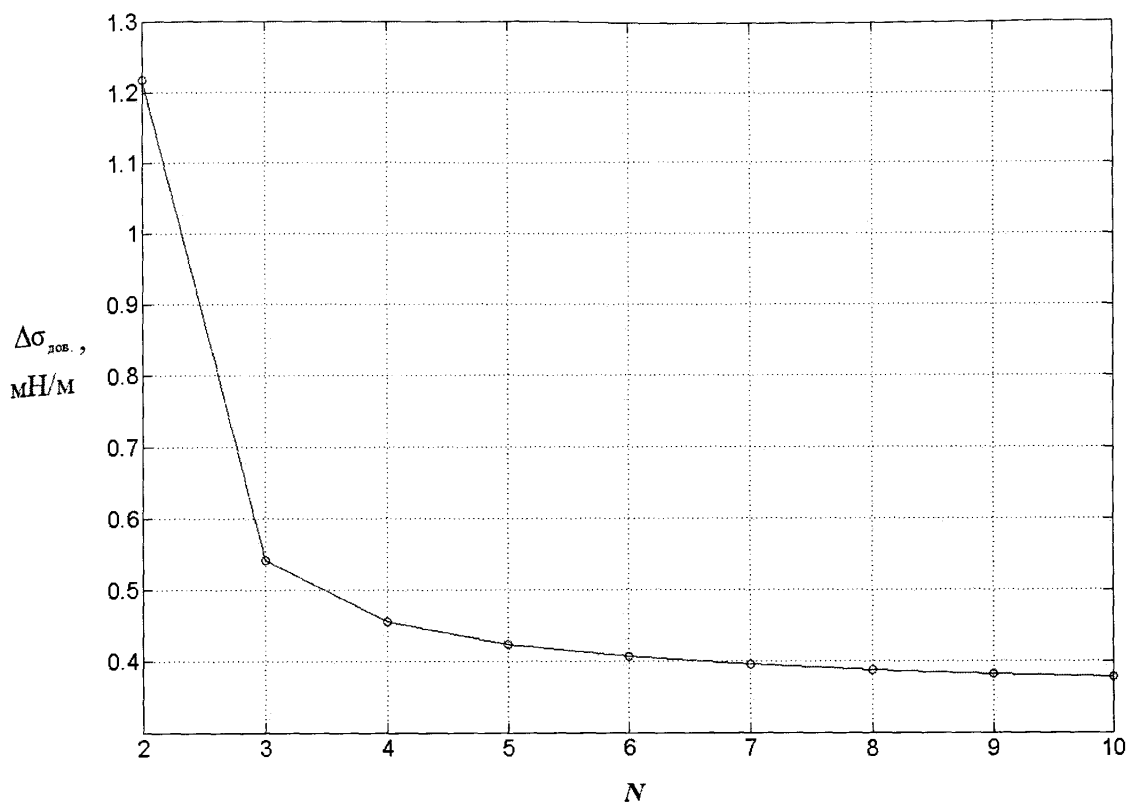


Рис. 4.8. Залежність $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ при $\sigma = 50 \text{ мН/м}$, $\Delta\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $H = 10 \text{ мм}$ від кількості точок виміряного максимального тиску N для кожного із трьох капілярів з метою оцінки впливу складових довірчої граничної похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ визначення ПН рідин, їх значення представлені у табл. 4.1. Аналізуючи табл. 4.1 можна зробити такі висновки.

Основними складовими $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ є похибки визначення максимальних тисків для другого та третього капілярів та похибки визначення радіусів кривизни менісків для цих капілярів, причому основний вклад у похибки останніх роблять похибки визначення радіусів вихідних отворів цих капілярів.

Визначення трикапілярним пристроєм ПН рідини σ за (2.41) здійснюється на основі різниць виміряних максимальних тисків (із врахуванням впливу відповідних пневматичних опорів елементів пристрою) для кожного із трьох капілярів.

Вимірювання максимальних тисків для кожного трьох із капілярів здійснюється по чергово одним і тим же давачем тиску Д1. Похибка вимірювання

максимального тиску давачем Д1 складається з випадкової та систематичної її складових. Випадкова похибка давача Д1 мінімізується шляхом застосування розробленої процедури статистичного усереднення багаторазово вимірних значень максимального тиску для кожного із трьох капілярів. Систематичні похибки давача Д1 для кожного із трьох капілярів можуть компенсуватися при визначенні різниць максимальних тисків для відповідних капілярів. Наведені вище твердження є справедливими і для давача Д2, який використовується для врахування впливу відповідних пневматичних опорів елементів пристрою.

Це веде до взаємної компенсації складових сумарної похибки у (4.3), що забезпечує меншу сумарну похибку визначення ПН рідини, ніж її розраховане граничне значення (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Значення складових довірчої граничної похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ (мН/м) для різних σ

Складові похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$	Поверхневий натяг рідини σ , мН/м			
	10	30	50	100
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial P_{\text{max3}}}\right)\Delta P_{\text{max3}}$	-0,2637	-0,2497	-0,2442	-0,2398
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial P_{\text{max2}}}\right)\Delta P_{\text{max2}}$	0,3622	0,2797	0,2461	0,2285
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial \Delta\rho}\right)\Delta(\Delta\rho)$	$1,4202\cdot 10^{-11}$	$3,0754\cdot 10^{-10}$	$1,2588\cdot 10^{-9}$	$9,2531\cdot 10^{-9}$
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial z_{o2}}\right)\Delta z_{o2}$	$6,6912\cdot 10^{-4}$	$6,8533\cdot 10^{-4}$	$6,8797\cdot 10^{-4}$	$6,9107\cdot 10^{-4}$
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial z_{o1}}\right)\Delta z_{o1}$	$-6,6912\cdot 10^{-4}$	$-6,8533\cdot 10^{-4}$	$-6,8797\cdot 10^{-4}$	$-6,9107\cdot 10^{-4}$
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial R_{o2}}\right)\Delta R_{o2}$	-0,0244	-0,0834	-0,1415	-0,2847
$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial R_{o1}}\right)\Delta R_{o1}$	0,0251	0,0888	0,1505	0,3039
Арифм. сума	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Разом тим, з метою консервативної оцінки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$, приймаючи найгірший випадок розподілу складових $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$, вони беруться по абсолютному значенню, що веде до сумарної довірчої граничної похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}} = 0,45 \div 0,6$ мН/м для $\sigma = 10 \div 100$ мН/м.

4.5 Розроблення проекту методики повірки трикапілярного пристрою

Для визнання результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, які здійснені трикапілярним пристроєм необхідно насамперед розробити методику повірки даного пристрою. Для її здійснення необхідно мати зразкові рідини, значення ПН яких повинно входити в робочий діапазон трикапілярного пристрою та бути визначеними з достатньою точністю.

З цією метою пропонується проект методики повірки трикапілярного пристрою, який базується на багатократному вимірюванні ПН еталонних рідин на довільних глибинах занурення капілярів (у прямому та зворотному напрямі зміни цієї глибини), в якості яких повинні виступати рідини з точно відомим значенням ПН згідно ДСТУ ГОСТ 8.428:2009. Ця методика дозволяє в автоматизованому режимі здійснити перевірку заявлених метрологічних характеристик трикапілярного пристрою і зробити висновок про його придатність. Проект методичних вказівок з проведення повірки представлений у Додатку Р.

Крім запропонованої методики повірки можуть бути розроблені інші методики, які можуть базуватися на використанні рідини з визначеними масою, об'ємом чи її рівнем у посудині.

В цьому випадку висновок про придатність пристрою може бути отриманий на підставі порівняння відомих значень маси, об'єму чи рівня рідини із визначеними їх значеннями згідно описаної в підрозділі 2.5 процедури. Також для повірки трикапілярного пристрою може бути використаний еталонний прецизійний прилад для вимірювання ПН рідин, який має у три рази меншу похибку вимірювання ПН.

Висновки до розділу

На основі поданого в четвертому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) здійснено аналіз інструментальних та методичних складових сумарної похибки розроблених методів та трикапілярного пристрою для дослідження ПН рідин і розчинів ПАР;

б) оцінено вклад кожної складової довірчої граничної похибки визначення ПН рідин трикапілярним пристроєм;

в) виявлено, що основний вклад у довірчу граничну похибку визначення ПН рідин вносять похибки визначення максимальних тисків для другого та третього капілярів, а також похибки визначення радіусів їх вихідних отворів, що підтверджує обґрунтованість застосування запропонованих процедур визначення моментів максимальних тисків та калібрування радіусів вимірювальних капілярів;

г) виявлено значний вплив випадкової похибки вимірювання максимальних тисків на довірчу граничну похибку визначення ПН рідин, що обґрунтовує необхідність застосування запропонованої процедури багаторазових вимірювань значень максимальних тисків та їх статистичне оброблення, що дозволяє мінімізувати випадкову похибку визначення максимальних тисків і, відповідно, підвищити точність результатів досліджень ПН рідин і розчинів ПАР;

д) встановлено, що довірча гранична похибка визначення ПН рідин нелінійно залежить від значення ПН рідини та має незначну залежність від глибин занурення капілярів і різниці густин рідини та газу;

е) встановлено, що оцінена за консервативним підходом довірча гранична похибка визначення трикапілярним пристроєм ПН рідин, приймаючи найгірший випадок розподілу її складових, знаходиться в інтервалі $0,45 \div 0,6$ мН/м для значень ПН у діапазоні $10 \div 100$ мН/м;

є) показано, що оскільки визначення трикапілярним пристроєм ПН рідини σ здійснюється на основі різниць максимальних тисків для кожного із трьох капілярів, то це зумовить взаємну компенсацію похибок визначення цих тисків і

забезпечить меншу похибку визначення ПН рідини, ніж гранична похибка $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$;

ж) встановлено, що довірча гранична похибка визначення різниці густин рідини та газу нелінійно залежить від ПН рідини і становить $21,5 \div 33,4 \text{ кг/м}^3$ у діапазоні у діапазоні значень ПН $10 \div 100 \text{ мН/м}$;

з) розроблено програмний код, який автоматично розраховує довірчі граничні похибки визначення різниці густин і газу та ПН рідини, що дозволяє представляти результат із їх значеннями без додаткових розрахунків.

і) підготовлено проект методики повірки трикапілярного пристрою, який базується на вимірюванні ПН еталонних рідин на довільних глибинах занурення капілярів (у прямому та зворотному напрямі зміни цієї глибини), в якості яких повинні виступати рідини з точно відомим значенням ПН згідно ДСТУ ГОСТ 8.428:2009.

РОЗДІЛ 5

ЛАБОРАТОРНІ І НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ ТРИКАПІЛЯРНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН І РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

5.1 Методика проведення лабораторних випробувань трикапілярного пристрою

Метою лабораторних випробувань трикапілярного пристрою ВПН-3 є експериментальна перевірка відповідності його фактичних параметрів заявленим метрологічним характеристикам.

При їх проведенні в приміщенні повинні бути дотримані наступні умови:

- температура повітря: $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- атмосферний тиск: $86 \div 106$ кПа;
- відносна вологість повітря при вказаній температурі: $30 \div 80\%$;
- напруга живлення електричної мережі: $220 \pm 5\text{В}$;
- частота змінного струму електричної мережі 50 ± 1 Гц;
- відсутність вібрацій, ударів, протягів повітря, а також надмірних електричних чи магнітних полів, які можуть впливати на роботу пристрою.

Приміщення для проведення лабораторних випробувань повинно відповідати пожежним, санітарно-гігієнічним вимогам та вимогам техніки безпеки при роботі з побутовим електрообладнанням.

Методика проведення лабораторних випробувань трикапілярного пристрою полягає у такій послідовності операцій. Спочатку здійснюють загальний огляд пристрою на наявність будь-яких зовнішніх дефектів чи ушкоджень вимірювальних капілярів. В разі їх виявлення випробування трикапілярного пристрою не проводяться.

Здійснюють промивання вимірювальних капілярів за процедурою, яка описана у п. 5.6 методичних вказівок з проведення повірки трикапілярного

пристрою (Додаток Р). Після цього проводять підключення трикапілярного пристрою до електричної мережі та ПК, його налаштування та діагностику.

Під час діагностики здійснюють порівняння визначених значень пневматичних опорів елементів вимірювальної схеми пристрою для кожного із трьох капілярів із їх попередньо отриманими номінальними значеннями. У разі виявлення їх відхилення більше, ніж на 5%, проводять повторне налаштування та діагностику трикапілярного пристрою.

Після проведення успішної діагностики пристрою вимірювальні капіляри занурюють у досліджувану рідину та здійснюють дослідження її ПН. Під час проведення лабораторних випробувань трикапілярного пристрою слід використовувати однокомпонентні рідини та промислові розчини ПАР з різною концентрацією ПАР, ПН яких входить у робочий діапазон трикапілярного пристрою ($\sigma = 10 \div 100$ мН/м). З метою перевірки надійності апаратних комплектуючих трикапілярного пристрою тривалість безперервної роботи пристрою повинна бути не меншою 8 годин.

Після заміни кожної досліджуваної рідини проводять продування і промивання вимірювальних капілярів згідно п. 5.6 методичних вказівок з проведення повірки трикапілярного пристрою, а також повторну процедуру його діагностики.

При успішних результатах діагностики трикапілярного пристрою, останній вважається справним і готовим до проведення подальших випробувань.

Лабораторні випробування трикапілярного пристрою вважаються успішними при відповідності фактично отриманих значень ПН досліджуваних рідин розрахованим метрологічним параметрам трикапілярного пристрою.

5.2 Результати лабораторних випробувань трикапілярного пристрою і їх аналіз

При проведенні лабораторних випробувань трикапілярного пристрою використовувалися такі рідини: дистильована вода, водні розчини тіполу з різною

концентрацією, водні розчини етанолу з різною концентрацією, водні розчини NaCl з різною густиною.

Для лабораторних випробувань трикапілярного пристрою на різних глибинах занурення вимірювальних капілярів використовувалися дистильована вода із значенням ПН 72,75 мН/м при 20°C. Отримані значення максимальних тисків (рис. 5.1) дозволили за виразом (2.41) розрахувати її ПН (рис. 5.2). Проведені дослідження свідчать про похибку результатів досліджень ПН в межах $\pm 0,3$ мН/м та похибку густини рідини у межах ± 20 кг/м³ (табл. 5.1).

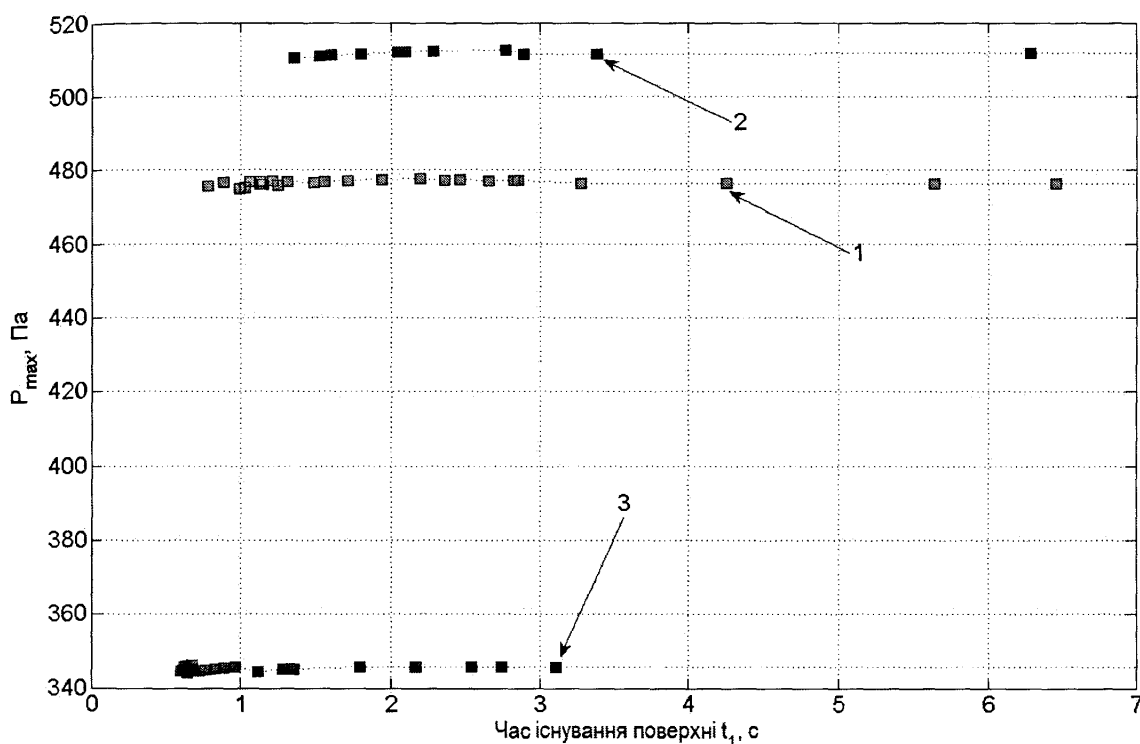


Рис. 5.1. Значення максимальних тисків для трьох капілярів, рідина:

дистильована вода при 20°C; 1 – капіляр 1; 2 – капіляр 2; 3 – капіляр 3

Дослідження водних розчинів етанолу з різною концентрацією та водних розчинів NaCl з різною густиною свідчать про похибку визначення ПН цих рідин в межах 0,5 мН/м (табл. 5.2. і табл. 5.3).

Для лабораторних випробувань трикапілярного пристрою при дослідженні ДПН промислових розчинів ПАР використовувалися водні розчини тіполу з концентрацією 0,025% і 0,1% відповідно.

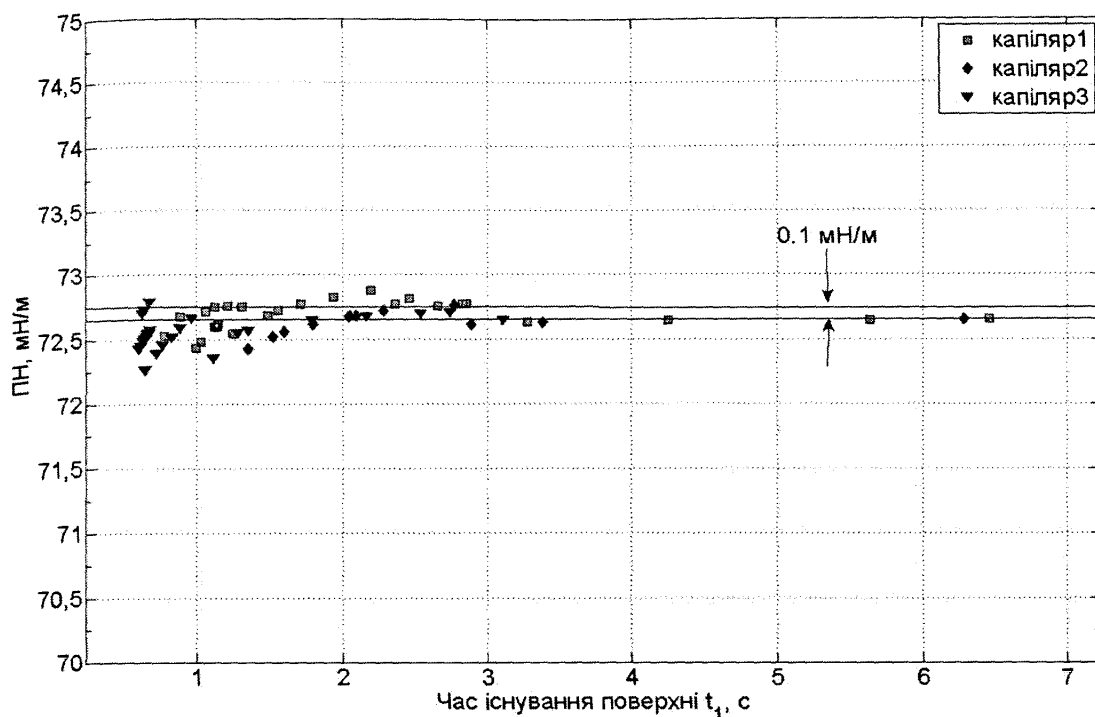


Рис. 5.2. Значення ПН дистильованої води при 20°C

Таблиця 5.1

Результати дослідження ПН дистильованої води при 20 °С,
розрахована довірча гранична похибка 0,51 мН/м

№ вимірювання	ПН, мН/м	Густина, кг/м ³	Глибина занурення 2 і 3 капілярів, мм	Примітка
1	72,8	1010,0	5,1	Глибина 1
2	72,4	1020,0	5,2	Глибина 1
3	72,7	1011,0	5,1	Глибина 1
4	72,6	1009,0	5,2	Глибина 1
5	73,0	1017,1	4,0	Глибина 2
6	72,7	1001,0	3,9	Глибина 2
7	72,8	1015,0	4,0	Глибина 2
Середнє зн.	72,7	1011,9	—	—
Макс. похибка	0,3	20	—	—

Таблиця 5.2

Результати дослідження трикапілярним пристроєм ПН водних розчинів етанолу різної концентрації при 20°C

№ п/п	Концентрація водного розчину етанолу, % (ПН, мН/м)	ПН, виміряний трикапілярним пристроєм, мН/м	Розрах. довірча гранична похибка, мН/м	Кількість експериментів, здійснених трикапілярним пристроєм
1	10 (49,7)	50,0±0,3	0,46	5
2	30 (32,8)	33,2 ±0,4	0,44	5
3	50 (28,2)	27,7±0,3	0,45	5
4	80 (24,8)	25,3±0,4	0,45	5
5	100 (22,4)	22,0±0,3	0,46	5

Таблиця 5.3

Результати дослідження трикапілярним пристроєм ПН водних розчинів NaCl з різною густиною при 20°C

№ п/п	Густина водного розчину NaCl, кг/м ³ (ПН, мН/м)	ПН, виміряний трикапілярним пристроєм, мН/м	Розрах. довірча гранична похибка, мН/м	Кількість експериментів, здійснених трикапілярним пристроєм
1	1010 (74,4)	74,9±0,3	0,5	5
2	1110 (79,6)	79,0 ±0,3	0,53	5
3	1150 (81,6)	82,0±0,4	0,54	5
4	1190 (83,8)	83,3±0,3	0,55	5
5	1210 (85,1)	85,7±0,3	0,55	5

Отримані криві максимальних тисків від часу існування поверхні меніска (рис. 5.3 та рис. 5.5) дозволили методом, який описаний в підрозділі 2.5, розрахувати криві ДПН для кожного із трьох капілярів (рис. 5.4 і рис. 5.6).

Багатократні дослідження ПН тіпалу з різною концентрацією на різній глибині свідчать про похибку результатів визначення РПН в межах ±0,5 мН/м та похибку визначення густини рідини відносно повітря ±30,8 кг/м³. (табл. 5.4 і табл. 5.5).

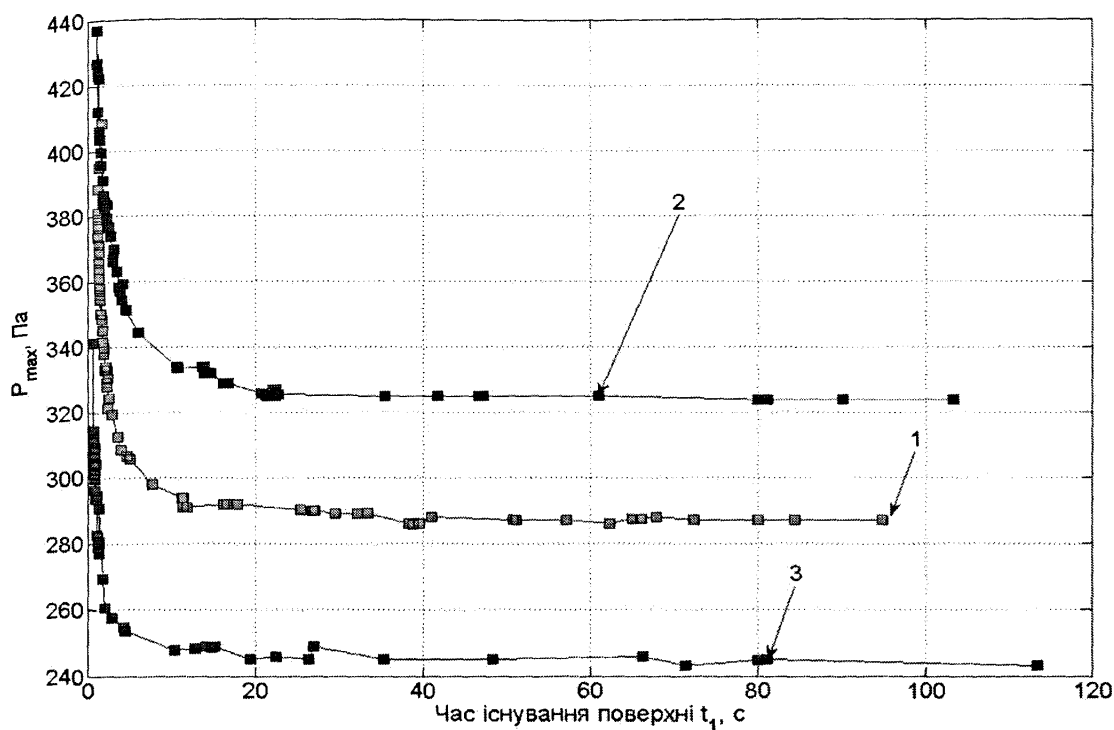


Рис. 5.3. Значення максимальних тисків для трьох капілярів, рідина: 0,025% водний розчин тіполу при 18°C; 1 – капіляр 1; 2 – капіляр 2; 3–капіляр 3

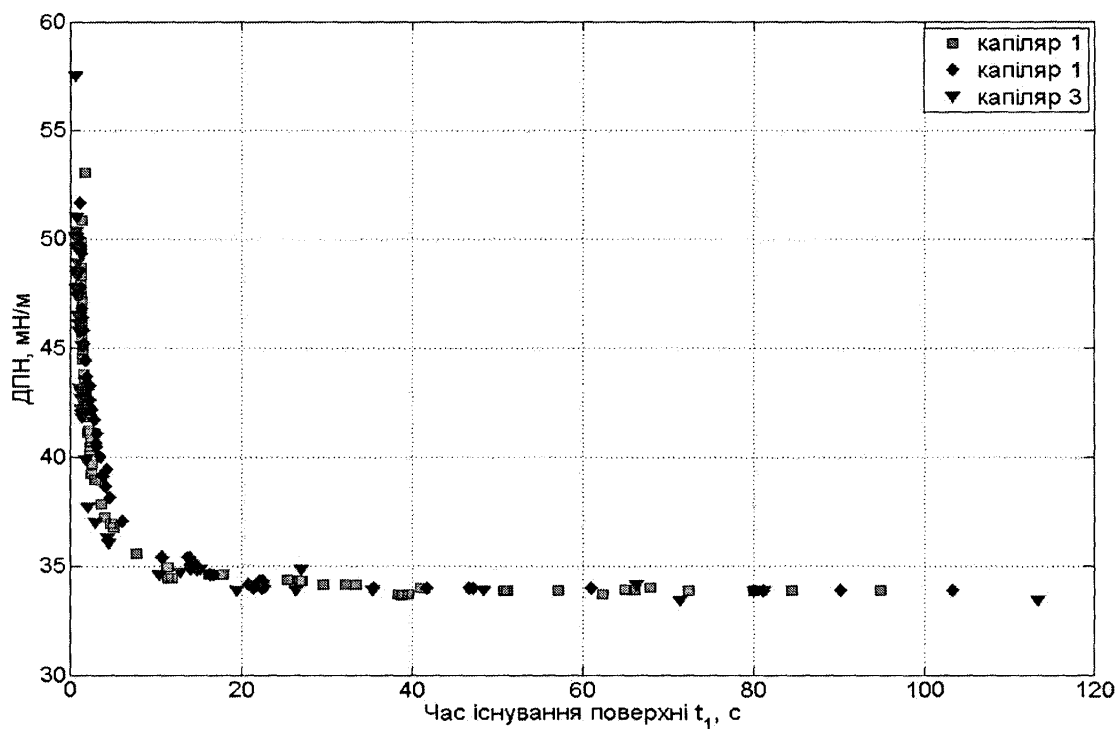


Рис. 5.4. Значення ДПН 0,025% водного розчину тіполу при 18°C на основі трьох капілярів

Таблиця 5.4

Результати дослідження ПН 0,025% водного розчину тіполу при 18°C,
розрахована довірча гранична похибка 0,44 мН/м

№ експерименту	ПН, мН/м	Густина, кг/м ³	Глибина занурення 2 і 3 капілярів, мм	Примітка
1	34,4	1021,0	10,1	Глибина 1
2	34,2	1000,0	10,0	Глибина 1
3	34,6	1018,6	10,0	Глибина 1
4	34,2	1032,0	8,0	Глибина 2
5	34,3	1015,0	7,9	Глибина 2
6	34,2	1020,0	8,1	Глибина 2
Середнє зн.	34,3	1020,0	–	–
Макс. відхилення	0,3	12,0	–	–

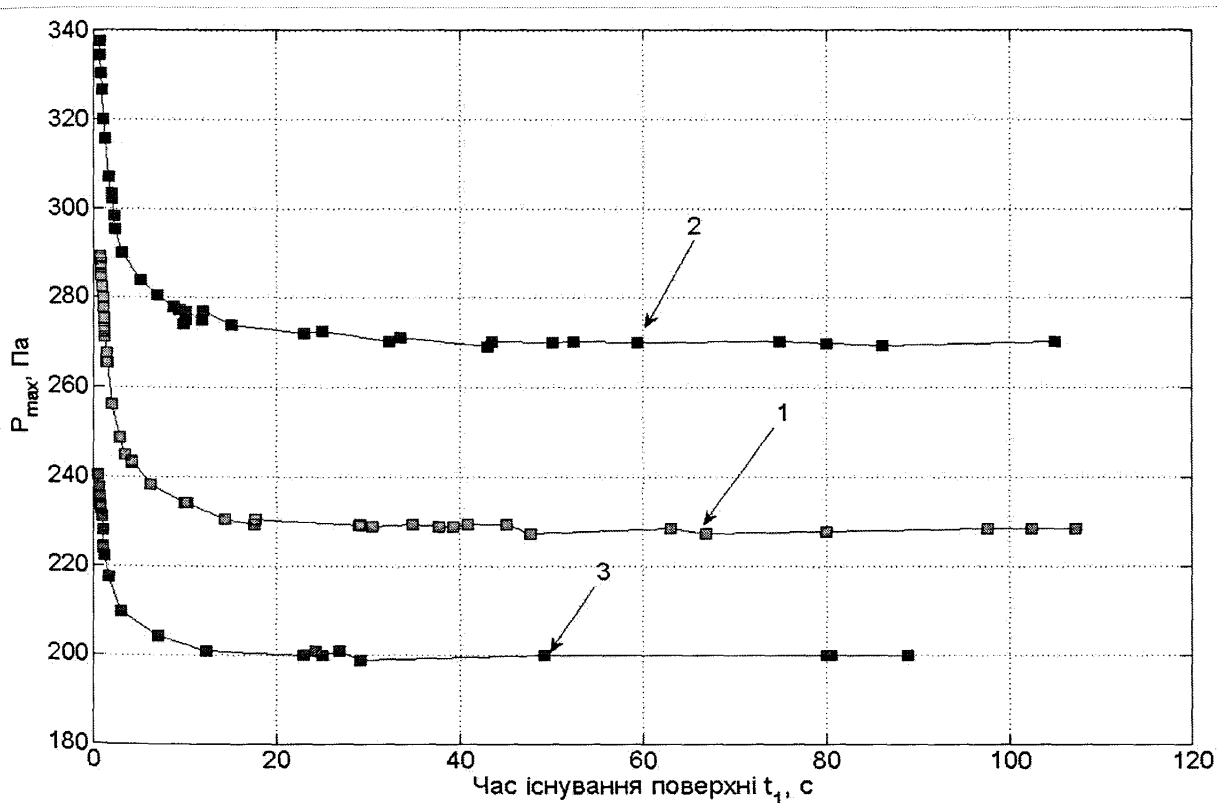


Рис. 5.5. Значення максимальних тисків для трьох капілярів, рідина:
0,1% водний розчин тіполу при 18°C;
1 – капіляр 1; 2 – капіляр 2; 3 – капіляр 3

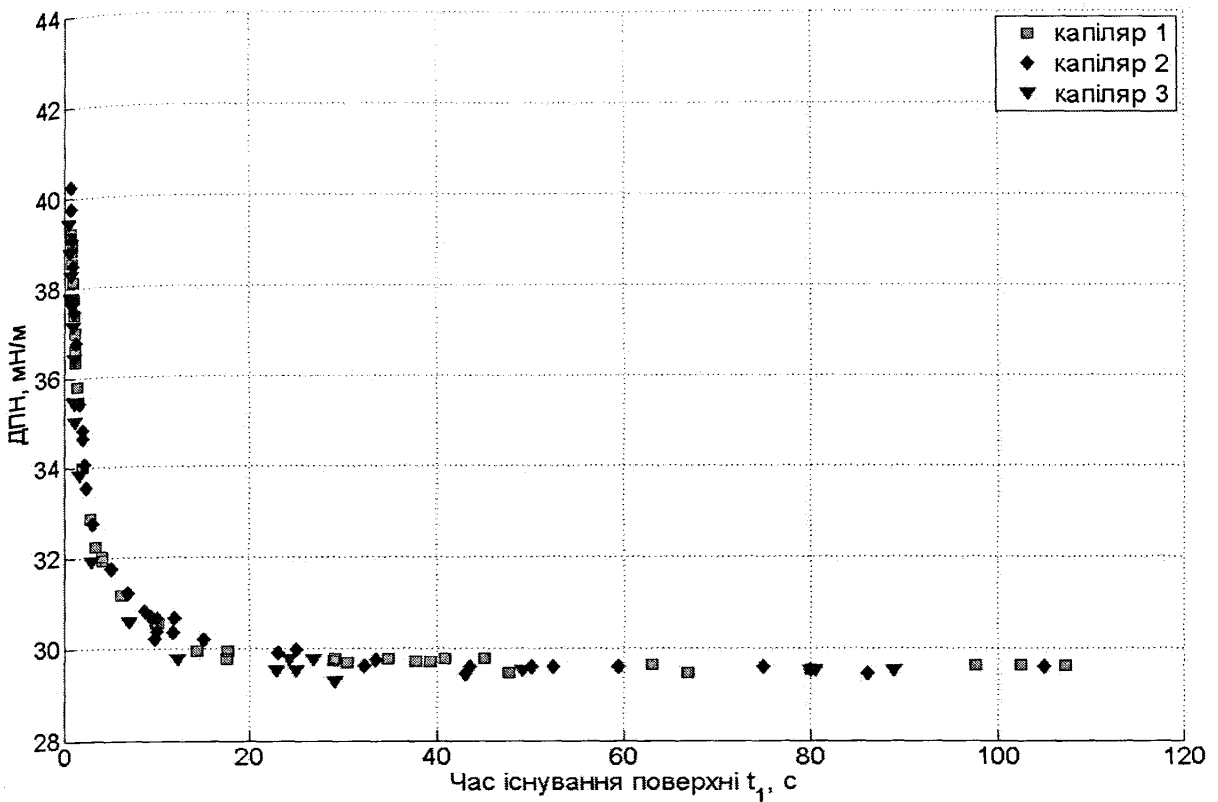


Рис. 5.6. Значення ДПН 0,1% водного розчину тіполу при 18°C
на основі трьох капілярів

Таблиця 5.5

Результати дослідження ПН 0,1% водного розчину тіполу при 18°C,
розрахована довірча гранична похибка 0,5 мН/м

№ експерименту	ПН, мН/м	Густина, кг/м ³	Глибина занурення 2 і 3 капілярів, мм	Примітка
1	29,7	1021,4	5,9	Глибина 1
2	29,8	1011,9	5,8	Глибина 1
3	30,1	1013,1	5,8	Глибина 1
4	30,5	1020,6	6,0	Глибина 1
5	30,0	1017,1	6,7	Глибина 2
6	29,6	1029,3	6,7	Глибина 2
7	30,0	1054,8	6,8	Глибина 2
Середнє зн.	30,0	1024,0	—	—
Макс. відхилення	0,5	30,8	—	—

Аналіз результатів досліджень кривих ДПН водних розчинів тіполу (рис. 5.4 і рис. 5.6) свідчить про розходження експериментальних кривих ДПН у короткочасовому діапазоні існування поверхні меніска для капілярів з різним радіусом їх вихідних отворів.

Якщо деяке розходження в цьому діапазоні кривих ДПН для першого і другого капілярів, які мають однаковий внутрішній радіус, але різні глибини занурення можна пояснити похибкою експерименту та неідеальною рівністю їх внутрішніх радіусів, то відхилення результатів ДПН для третього капіляра носить явний тенденційний характер, який виражається у нижчих значеннях ДПН рідини у короткочасному діапазоні часу існування поверхні меніска. З метою аналізу цього явища було проведено порівняння вимірених кривих максимального тиску від часу існування поверхні меніска для розчинів ПАР наступним чином.

Спочатку було проведено інтерполяцію трьох кривих максимального тиску, щоб знайти значення максимальних тисків для однакових часів існування поверхні меніска t_1 для кожного із трьох капілярів. Далі при однакових t_1 побудовано криву різниці між значеннями цих тисків між другим та третім капілярами з різними радіусами r_1 та r_2 , відповідно (крива 1, рис. 5.7), а також криву різниці між значеннями максимальних тисків при однакових t_1 між другим та першим капілярами з однаковими радіусами їх вихідних отворів r_1 (крива 2, рис. 5.7). Аналізуючи рис. 5.7, можна відмітити, що крива 1 для капілярів з різними радіусами у короткочасовому діапазоні має суттєву динаміку, на відміну від кривої 2 для капілярів з однаковими внутрішніми радіусами, де остання є незначною. З метою подальшого аналізу було побудовано залежність площі меніска у момент максимального тиску у бульбашках для трьох капілярів (рис. 5.8).

З нього чітко спостерігається, що для капіляра з більшим радіусом (капіляр 3) значення рівноважної площі меніска в момент максимального тиску у бульбашці настає значно раніше, ніж для капілярів з меншим внутрішнім радіусом. На основі їх аналізу можна висунути гіпотезу, що явище нижчих значень ДПН у

короткочасовому діапазоні часу існування меніска для капіляра з більшим внутрішнім радіусом пояснюється наступним чином.

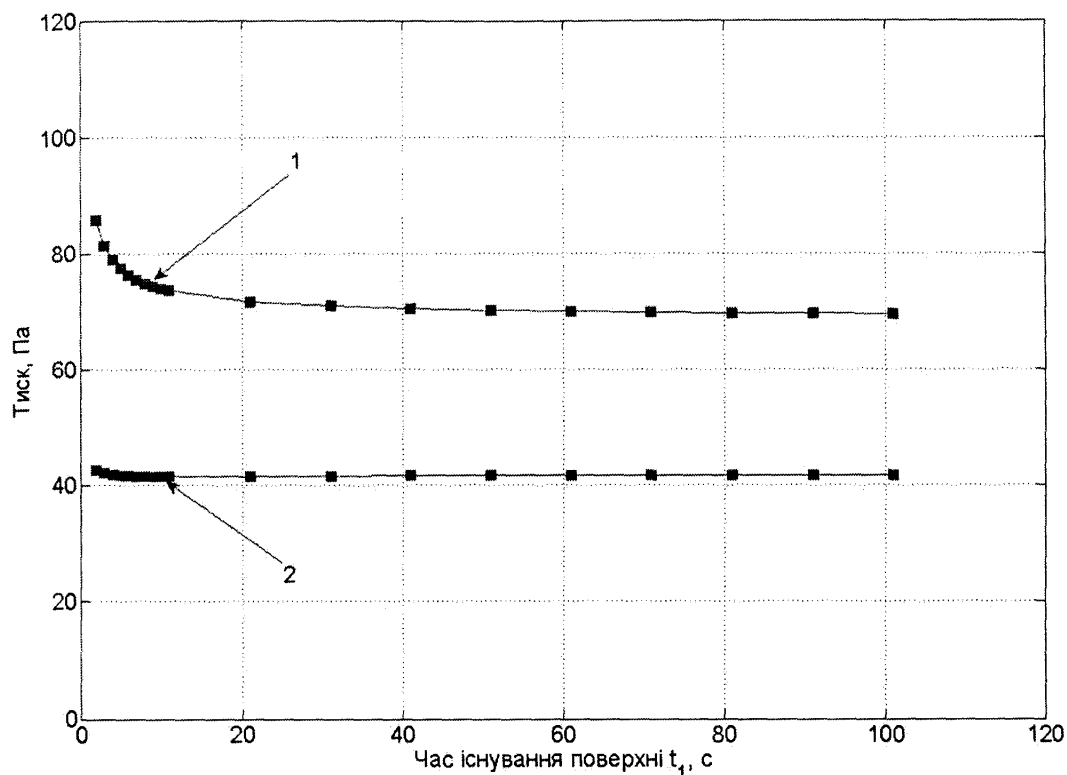


Рис. 5.7. Різниці кривих максимальних тисків від часу існування поверхні меніска для трьох капілярів; рідина: 0,1% водний розчин тіполу при 18°C:

1 – різниця кривих максимальних тисків між капілярами 2 і 3;

2 – різниця кривих максимальних тисків між капілярами 1 і 2

Площа меніска у момент максимального тиску для капіляра з більшим радіусом наростає швидше, ніж для капіляра з меншим радіусом (рис 5.8). Отже у короткочасовому діапазоні на поверхню меніска із більшою площею, який існує на нижньому торці капіляра з більшим радіусом, встигає адсорбуватися більше ПАР, ніж на меніск з меншою площею за той же період часу існування поверхні меніска. Це відповідно веде до зменшення виміряного ДПН для капілярів з більшим радіусом. На довших часах існування поверхні настає баланс адсорбційних процесів, інакше кажучи, всі ПАР встигають адсорбуватися на поверхні меніска, а отже не спостерігається залежність виміряного ПН від зміни площі меніска у момент максимального тиску у бульбашці.

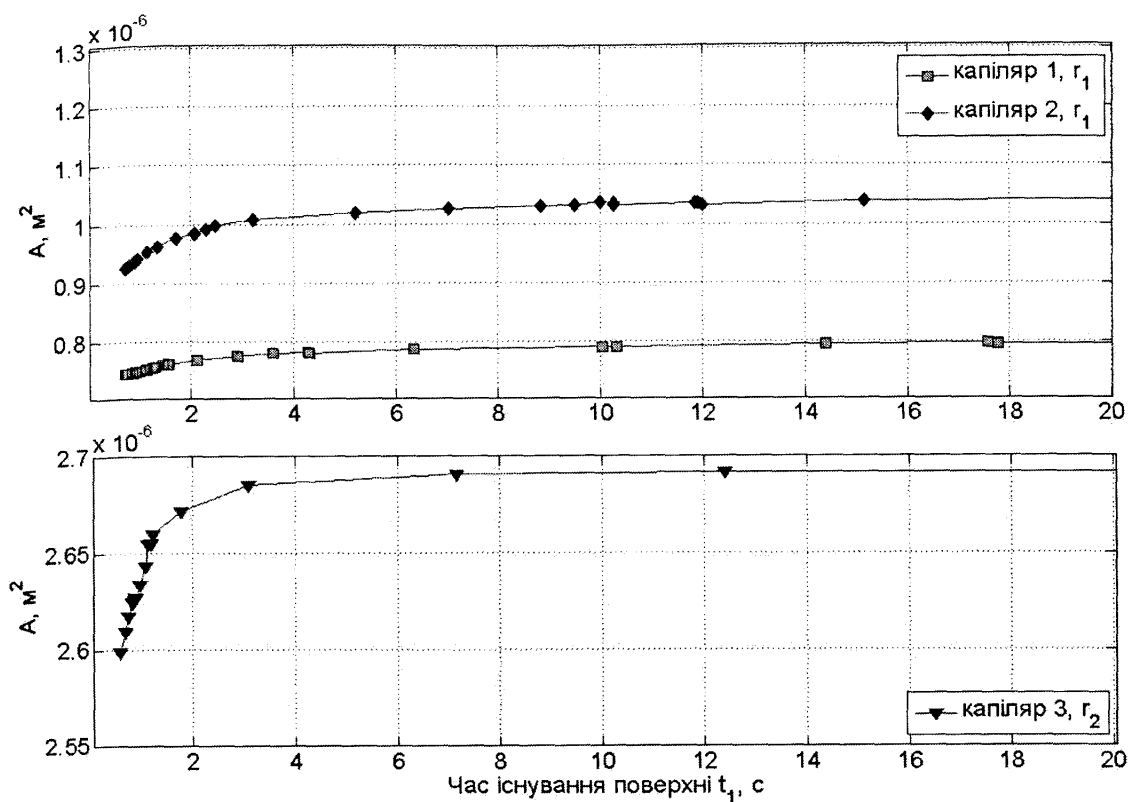


Рис. 5.8 Залежність площі меніска в момент максимального тиску в ньому від часу існування поверхні для трьох капілярів:

1 – різниця між капілярами 2 і 3 (капіляри з різними радіусами і з однаковою глибиною занурення); 2 – різниця між капілярами 2 і 1 (капіляри з однаковими радіусами і з різною глибиною занурення)

5.3 Натурні випробування трикапілярного пристрою і аналіз отриманих результатів

З метою натурних випробувань трикапілярного пристрою були проведені паралельні вимірювання ПН водних розчинів «ВУК LPD 6296» з різною концентрацією за допомогою однокапілярного приладу ППНЛ-1 [29] та розробленим трикапілярним пристроєм. Причому вимірювання ПН рідин трикапілярним пристроєм проводилося на різних довільних глибинах занурення вимірювальних капілярів багаторазово і в автоматичному режимі, а приладом ППНЛ-1 однократно на заданій глибині занурення капіляра (2 мм). ПАР типу

«ВУК LPD 6296» використовується у технологічному процесі виробництва лінолеуму торгової марки «Tarkett» ТОВ «Вінісін» (м. Калуш, Івано-Франківська обл.). Якість цього розчину ПАР впливає на якісні характеристики лінолеуму, а отже контроль величини ПН розчинів ПАР «ВУК LPD 6296» та його відповідності до заводських даних є актуальним завданням при виробництві лінолеуму (акт впровадження результатів дисертаційної роботи наведений в Додатку Ф). Отримані результати (табл. 5.4) свідчать про близькість результатів, отриманих однокапілярним приладом ППНЛ-1 та трикапілярним пристроєм, і похибку визначення ПН рідини трикапілярним пристроєм в 0,4 мН/м.

Таблиця 5.6

Результати багатократного дослідження ПН водних розчинів «ВУК LPD 6296» різної концентрації однокапілярним приладом ППНЛ-1 та трикапілярним пристроєм при 20°C

№ п/п	Концентрація водного розчину «ВУК LPD 6296», %	ПН, виміряний трикапілярним пристроєм, мН/м	Розрах. довірча гранична похибка, мН/м	Кількість експериментів, здійснених трикапілярним пристроєм	ПН, виміряний ППНЛ-1, мН/м
1	0,0625	69,8±0,4	0,5	15	70,1
2	0,125	68,6 ±0,4	0,5	6	68,8
3	0,25	66,6 ±0,3	0,5	5	66,2
4	0,5	63,3±0,4	0,5	6	63,2

Слід відмітити, що отриманий розкид виміряних ПН є достатньо симетричний (рис. 5.9), що підтверджує факт основного впливу саме випадкових похибок на результат вимірювання і можливість їх мінімізації шляхом багатократних спостережень значень максимального тиску та їх статистичної обробки в автоматизованому режимі.

З аналогічною метою та методикою було проведено паралельні вимірювання ДПН 0,5% водного розчину WG 15SAA/1, який застосовується в якості комплексної добавки для струменевої цементації, в довгочасовому діапазоні існування поверхні меніска. На відміну від інших розчинів ПАР для даної рідини максимальний час очікування на появу бульбашок був встановлений величиною в

600 с (10 хв.).

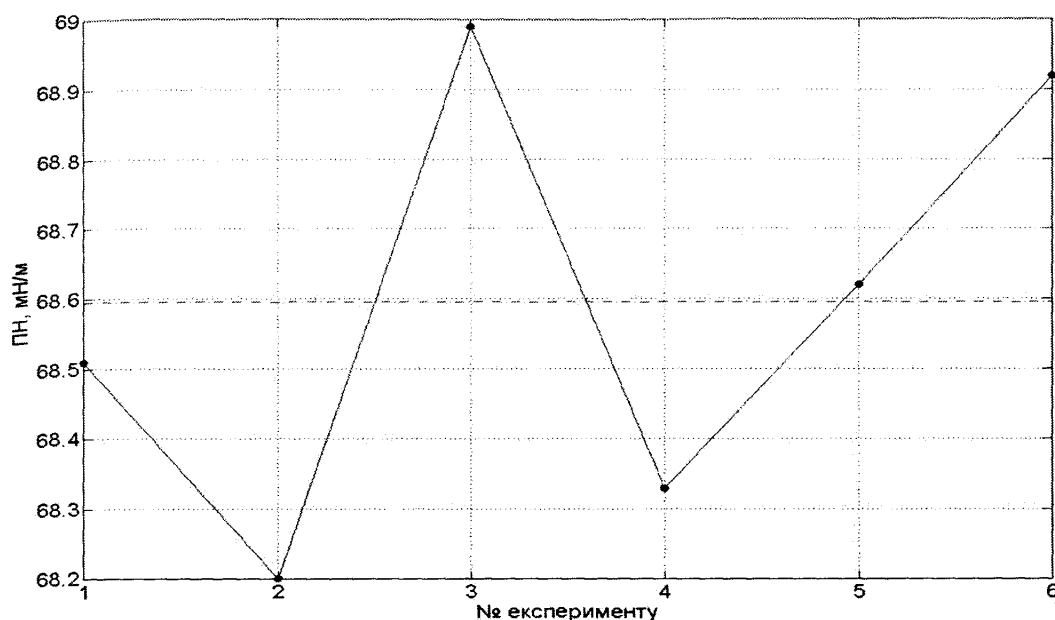


Рис.5.9. Результати дослідження 0,125% водного розчину
«ВУК LPD 6296» при 20°C

Отримані результати (табл. 5.7) також свідчать про близькість результатів проведених випробувань трикапілярного пристрою з приладом ППНЛ-1 та похибку визначення ПН розробленим пристроєм у межах 0,5 мН/м.

Таблиця 5.7

Результати дослідження водного розчину «WG 15SAA/1» за допомогою
однокapілярного приладу ППНЛ-1 та трикапілярним пристроєм при 19,5°C

№ п/п	Час існування поверхні меніска, с	ДПН, виміряний трикапілярним пристроєм, мН/м	ДПН, виміряний ППНЛ-1, мН/м
1	60	55,	55,5
2	240	53,4	53,8
3	480	52,5	53,0

З метою обґрунтування можливості застосування запропонованих методів для дослідження ПН біологічних рідин (БР) людини за сприяння Івано-Франківського та Чернівецького обласних онкологічних диспансерів (акт впровадження результатів дисертаційної роботи наведений в Додатку У) було

проведено експериментальні дослідження ДПН сироватки крові пацієнтів, які страждають на онкологічні захворювання, оскільки найвищий кореляційний зв'язок встановлено між ДПН сироватки крові і онкологічними захворюваннями людського організму, проте такий зв'язок виявлений і для інших захворювань людини [85÷101].

Процедура натурних випробувань трикапілярного пристрою при дослідженні БР людини була наступна. Зразки сироватки крові від моменту їх отримання зберігалися не більше однієї доби при температурі 4°C. Перед початком дослідження рідина виймалася із холодильника і витримувалася до досягнення неї кімнатної температури (18°C). Дослідження проводилося до досягнення часу існування поверхні меніска 180 секунд.

Отримані значення екстраполювалися до досягнення свого рівноважного значення. Після проведення експерименту зразок утилізувався, проводилася очистка вимірювальної посудини і капілярів, тоді описана процедура дослідження проводилася над наступним зразком. Після кількох експериментів для контролю роботи пристрою проводилося контрольне дослідження ПН зразкової рідини (дистильованої води). За дослідженнями ПН сироватки крові 8 пацієнтів різного віку та статті, які страждають на рак прямої кишки помічено схожість кривих 1 та 2 для пацієнтів однієї статті та близького віку, кривих 3 та 8, а також групи 4,5,6 та 7 (рис. 5.10). Близька динаміка кривих ДПН БР була виявлена і для двох пацієнтів, які страждають на рак шийки матки (рис. 5.11). Разом з тим отримані залежності не можуть бути використанні для ствердження відповідних кореляційних зв'язків у зв'язку із мізерною кількістю вибірки.

Експериментальні дослідження БР людини показали, що надзвичайно важливим є мінімізація часу та маніпуляцій між отриманням зразків БР людини, її підготовкою (наприклад, отримання сироватки крові із зразка крові) та проведення самого вимірювання ДПН БР. Оптимальним підходом є проведення вимірювання ДПН медичним персоналом одразу після отримання та підготовки зразка БР без жодних попередніх вимірювань її додаткових параметрів,

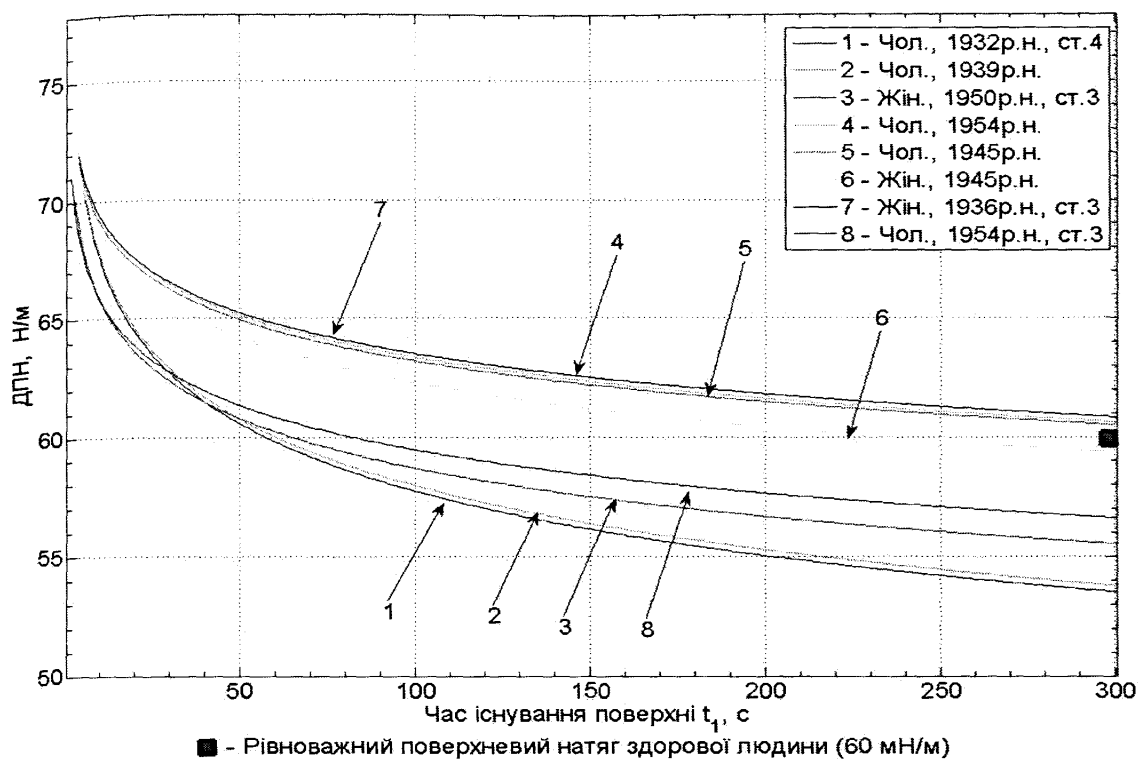


Рис. 5.10. Залежність ДПН зразків сироватки крові пацієнтів, які страждають на рак прямої кишки від часу існування поверхні меніска

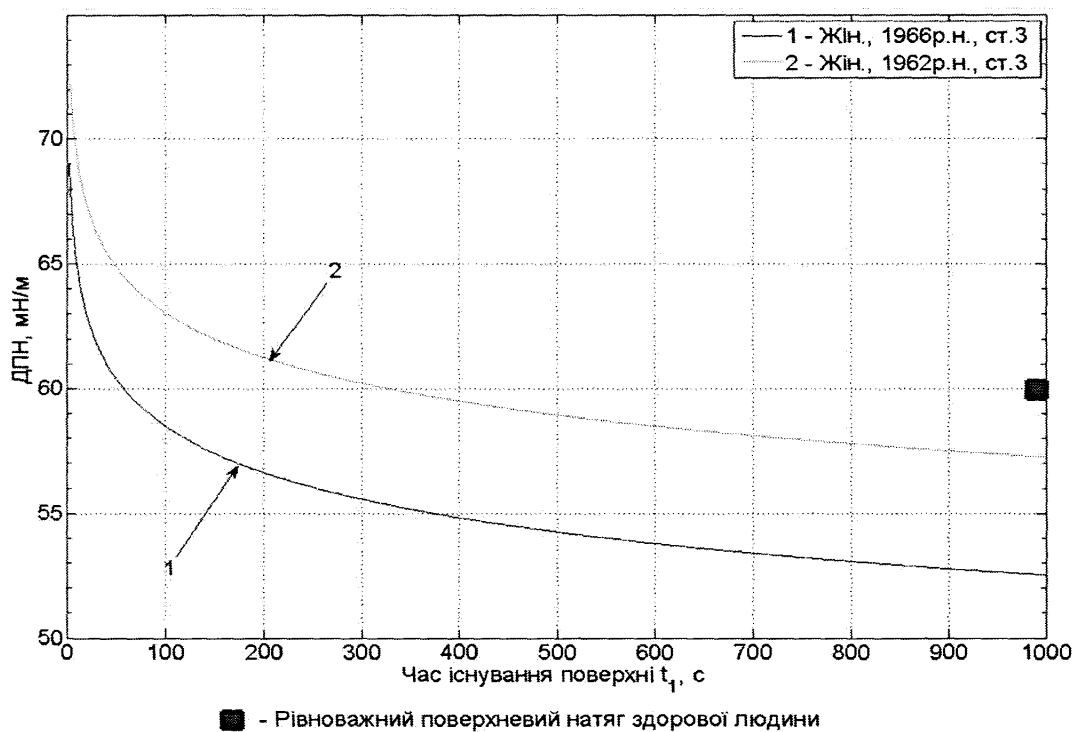


Рис. 5.11. Залежність ДПН сироватки крові від часу існування поверхні меніска пацієнтів, які страждають на рак шийки матки

наприклад, її густини за допомогою густиномірів, оскільки будь-які додаткові процедури можуть привести до забруднення зразка БР сторонніми ПАР чи речовинами, які здатні вплинути на поведінку органічних ПАР у зразку. У разі неможливості проведення вимірювання ДПН одразу після отримання зразків БР необхідно забезпечити правильний та єдиний режим їх зберігання (при встановленому періоді зберігання, температурі, вологості, стерильності і т.п.) в залежності від специфічних властивостей кожної БР.

Висновки до розділу

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

а) розроблено методику лабораторних випробувань, яка дозволяє перевірити відповідність фактичних параметрів виготовленого трикапілярного пристрою його розрахованим метрологічним параметрам;

б) отримані результати лабораторних та натурних випробувань макету трикапілярного пристрою при дослідженні ПН однокомпонентних рідин і промислових розчинів ПАР за допомогою трьох капілярів свідчать, що дійсна похибка визначення ПН рідин знаходиться у межах розрахованих значень довірчої граничної похибки пристрою для відповідних значень ПН рідин і не перевищує 0,5 мН/м;

г) експериментально підтверджено явище розходження виміряного ДПН розчинів ПАР для капілярів з різними внутрішніми радіусами їх вихідних отворів у короткочасовому діапазоні часу існування поверхні меніска;

д) натурні випробування розробленого трикапілярного пристрою при автоматизованому дослідженні ДПН БР людини підтвердили можливість його застосування для здійснення таких експериментів медичним персоналом установи без залучення висококваліфікованого персоналу у сфері вимірювальної техніки та метрології.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна задача, яка полягає в розробленні удосконалених методів підвищення точності результатів досліджень РПН і ДПН однокомпонентних рідин, промислових розчинів ПАР та БР людського організму, а також трикапілярного пристрою для реалізації цих методів, який дозволяє автоматизовано здійснювати дослідження РПН і ДПН таких рідин у діапазоні часу існування розділу фаз від 0,1 с до 50000 с без попереднього визначення густини таких рідин і прецизійного занурення капілярів на задану їх глибину. В результаті проведеної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Здійснено аналіз відомих методів досліджень РПН і ДПН рідин за максимальним тиском у бульбашці та приладів на їх основі з використанням одного вимірювального капіляру і двох капілярів з різними радіусами вихідних отворів, що дозволило виявити їх основні недоліки, які впливають на точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

2. Вперше розроблено методику фіксації моменту досягнення максимального тиску у бульбашці у процесі розрахунку геометричних параметрів меніска, що дозволило врахувати несферичність меніска у цей момент, підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР, а також визначати геометричні параметри меніска у момент максимального тиску у бульбашці.

3. Вперше розроблено ітераційну методику визначення ПН рідин із застосуванням трьох капілярів за вимірними максимальними тисками у бульбашках, що утворюються з цих капілярів, яка не вимагає попереднього визначення густини досліджуваної рідини та прецизійного занурення вимірювальних капілярів на задану глибину у цю рідину. Це дозволило розробити удосконалені методи визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

4. Вперше розроблено процедуру визначення моменту максимального тиску у процесі його вимірювання із застосуванням математичних фільтрів Савицького – Голя другого порядку, що дозволило підвищити точність вимірювання

максимального тиску, а відповідно, і точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

5. Розроблено методику урахування впливу пневматичних опорів елементів виміральної схеми трикапілярного пристрою на виміряні максимальні тиски у бульбашках, що утворюються із трьох капілярів, а також методику визначення радіусів цих капілярів, що дозволило підвищити точність результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

6. Розроблено структурну, пневматичну, електричну схеми, конструкцію трикапілярного пристрою та програмне забезпечення для мікроконтролера і ПК, а також виготовлено цей пристрій, що реалізує розроблені методи підвищення точності результатів досліджень РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР.

7. Здійснено метрологічний аналіз розроблених методів визначення РПН і ДПН рідин і розчинів ПАР та трикапілярного пристрою, що реалізує ці методи. Показано, що довірча гранична похибка визначення ПН рідини нелінійно залежить від його значення та знаходиться в інтервалі $0,45 \div 0,6$ мН/м для значень ПН у діапазоні $10 \div 100$ мН/м, а також розроблено проект методики перевірки трикапілярного пристрою.

8. Проведені лабораторні та натурні випробування макету трикапілярного пристрою, які підтвердили працездатність розроблених методів, а також показали, що дійсна максимальна похибка визначення ПН рідин і розчинів ПАР цими методами знаходиться у межах розрахованої граничної похибки та становить $0,5$ мН/м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кісіль І. С. Удосконалена методика і прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / І. С. Кісіль, А. В. Кулиняк, Ю. М. Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – №17. – С. 45–50.
2. Кучірка Ю. М. Удосконалений пристрій для вимірювання поверхневого натягу на межі контакту рідина–повітря [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль, А. В. Кулиняк // Матеріали шостої науково–технічної конференції «Приладобудування – 2007: стан і перспективи». – К.: – 2007.– С.186–188.
3. Кучірка Ю. М. Удосконалена методика та прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали V Міжнародної науково–технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 2–5 грудня 2008 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – С.202–205.
4. Кучірка Ю. М. Вимірювання динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево–активних речовин на межі їх розділу з газом [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи», 20–23 жовтня 2009 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – С.125–127.
5. Кісіль І. С. Удосконалений прилад для дослідження динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево–активних речовин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / І. С. Кісіль, Ю. М. Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – №23. – С. 60–65.
6. Пат. 89128 Україна, МПК (2009): G01N 13/00. Спосіб вимірювання поверхневого натягу рідин [Текст] / І. С. Кісіль, Р. І. Кісіль, Ю. М. Кучірка; Заявник і патентовласник Івано–Франківський національний технічний

університет нафти і газу.–а200807743; заявл. 06.06.2008; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24, 2009 р.

7. Кучірка Ю.М. Удосконалення методики вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Тези доповідей науково–технічної конференції «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України», 16–18 листопада 2010 р., м. Івано–Франківськ. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – С. 187–191.

8. Кучірка Ю. М. Удосконалення методики визначення поверхневого натягу рідин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали дев'ятої науково–технічної конференції «Приладобудування – 2010: стан і перспективи». – К.: – 2010.– С. 134–136.

9. Пат. 92867 Україна, МПК (2009): G01N 13/00. Спосіб вимірювання динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево–активних речовин [Текст] / І. С. Кісіль, Р. І. Кісіль, Ю. М. Кучірка; заявник і патентовласник Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу.–а200910440; заявл. 15.10.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 11, 2010 р.

10. Малько А.О. Розроблення методики метрологічної атестації стандартних градуювальних характеристик концентрації поверхнево–активних речовин у воді за значеннями їх рівноважного поверхневого натягу [Текст] / А. О. Малько, О. Б. Барна, Ю. М. Кучірка // Матеріали VIII Міжнародної науково–технічної конференції «Метрологія і вимірювальна техніка», 9–11 жовтня 2012 р., м. Харків.– С.152.

11. Кучірка Ю.М. Удосконалена методика та прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в газовій бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали VI Міжнародної науково–технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», м. Івано–Франківськ, 29 листопада –

2 грудня 2011 р. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ. – С.220–223.

12. Кучірка Ю. М. Удосконалена методика вимірювання динамічного поверхневого натягу поверхнево–активних речовин методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю.М.Кучірка, І.С.Кісіль, Б.В.Костів // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – №27. – С. 48–51.

13. Kuchirka Y. M. Technique improvement of measurement of surface tension of surfactants solutions by maximum bubble pressure method [Text] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль, Ф. Рейндерс // Матеріали першої науково–технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні тенденції розвитку приладобудування», 19–20 листопада 2012 р., м. Луганськ.– С. 45.

14. Kisil I.G. Improvement of technique of measurement of surface tension of surfactants solutions by maximum bubble pressure method [Text] / I.G. Kisil, Y. M. Kuchirka, O. I. Osmolovskyi // Proceedings «The fifth world congress «Aviation in the XXI–st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27 September 2012, Kyiv.– P. 1.9.29–1.9.32.

15. Кучірка Ю.М. Удосконалені методи підвищення точності результатів дослідження поверхневого натягу рідин та пристрій для їх реалізації [Текст] / Ю. М. Кучірка // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2013. – № 1. – С. 58–63.

16. Кучірка Ю. М. Удосконалення методики вимірювання поверхневого натягу розчинів ПАР методом максимального тиску у бульбашці [Текст] / Ю. М. Кучірка, І. С. Кісіль // Матеріали одинадцятої Міжнародної науково–технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2012)», 9–11 жовтня 2012 р., м. Вінниця. – С. 37.

17. Кісіль І.С. Підвищення точності розрахунку геометричних розмірів газового пухирця в момент максимального тиску в ньому [Текст] / І.С.Кісіль, Ю.М.Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – №20. – С.30–35.

18. Кісіль І.С. Метрологічний аналіз методик вимірювання поверхневого натягу рідин методом максимального тиску в бульбашці [Текст] / І.С.Кісіль, Ю.М.Кучірка, Р.І.Кісіль // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – №1(23). – С. 178–185.
19. Kazakov V. N. Dynamic surface tensiometry in medicine [Text] / V. N. Kazakov, O. V. Sinyachenko, V. B. Fainerman. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 373 p.
20. Zhang X. Measurement of dynamic surface tension by a growing drop technique [Text] / X. Zhang, M. T. Harris, O. A. Basaran // J. Colloid Interface Sci.– 1994.–V. 168.– P. 47–60.
21. Фельдман И.Н. Прибор для измерения поверхностного натяжения [Текст] / И. Н. Фельдман, И. В. Малкова, В. И. Соколовський, Р. А. Затуренський // Журнал прикладной химии.–1980.– Т. 53, № 9.– С. 2131–2133.
22. Cuny K.H. Präzisierung der Blasendruckmethode zur Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten [Text] / K. H. Cuny, K. L. Wolf // Annalen der Physik.– 1956.– V. 452.– P. 57–77.
23. Miller R. Dynamic surface and interfacial tensions of surfactant and polymer solutions [Text] / R. Miller, P. Joos, V. B. Fainerman // Advances in Colloid and Interface Science.– 1994.– V. 49.– P. 249–302.
24. Simon M. Recherches sur la capillarite [Text] / M. Simon // Annales de chimie et de physique.– 1851.–V. 32.–P. 5–41.
25. Ребиндер П. А. О зависимости поверхностной активности поверхностного натяжения от температуры и концентрации [Текст] / П. А. Ребиндер // Журнал физической химии – 1924.–Т.111.– С. 447–464.
26. Русанов А. И. Межфазная тензиометрия [Текст] / А. И. Русанов, В. А. Прохоров .–СПб: Химия, 1994. – 400 с.
27. Кисиль И.С., Малько А.Г., Дранчук М.М. О точности измерения поверхностного натяжения по методу максимального давления в газовом

пузырьке [Текст] // Журн. физ. химии. – 1981. – Т. 55, № 2. – С. 318–326.

28. Cantor M. Ueber Capillaritätsconstanten [Text] / M. Cantor // Annalen der Physik. – 1892. – V. 283, № 11. – P. 399–423.

29. Кісіль І.С. Визначення поверхневого натягу рідин на основі виміряного максимального тиску в газовому меніску [Текст] // Методи та прилади контролю якості. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ, 1997. – №1. – С. 50–54.

30. Sugden S. The determination of surface tension from the maximum pressure in bubbles [Text] / S. Sugden // Journal of the Chemical Society. – 1922. – V. 121. – P. 858–866.

31. Волков Б. Н. К вопросу о расчете капиллярной постоянной [Текст] / Б. Н. Волков, Л. Д. Воляк // Журнал физической химии. – 1972. – Т. 46, № 4. – С. 1025–1026.

32. Dugne J. Mesure de la tension superficielle par la methode de la pression maximale de bulle [Text] / J. Dugne // Thesis conference national arts, Paris. – 1971. – P. 245–247.

33. Bendure R. L. Dynamic surface tension determination with the maximum bubble pressure method [Text] / R. L. Bendure // Journal of Colloid and Interface Science. – 1971. – V. 35, № 2. – P. 238–248.

34. Кісіль І. С. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз : у 2 т.: монографія. Т.1: Методи максимального тиску у бульбашці, лежачої і висячої крапель та об'єму краплі [Текст] / І. С. Кісіль, Р. І. Кісіль. – Івано–Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 298 с.

35. Sugden S. The variation of surface tension with temperature and some related functions [Text] / S. Sugden // Journal of the Chemical Society. – 1924. – V. 125. – P. 32–41.

36. Jaeger F. M. Jaeger's method outlined [Text] / F. M. Jaeger // Akad. Wiss. Wien. – 1891. – V. 100. – P. 245–270.

37. Jaeger F. M. Jaeger's method [Text] / F. M. Jaeger // Z. Anorg Chem. – 1917. – V. 101. – P. 1–214.

38. Warren E. L. The surface tension balance [Text] / E. L. Warren // *Philos. Mag.*— 1927.—V.4.—P. 358–400.

39. А. с. 147322 СССР, МКИ³ В 25 J 15/00. Установка для измерения физико-химических характеристик веществ [Текст] / П. П. Пугачевич, В. П. Бычков (СССР). — №161770; опубли. 16.04.1963, Бюл. №10.

40. Белов Б. Т. К точному определению поверхностного натяжения жидкостей. Пример реализации метода максимального давления в пузырьке / Б. Т. Белов // *Журнал физической химии.*—1981. —Т. 55.— С. 533–535.

41. Lunkenheimer K. Investigations on the possibility of purifying surfactant solutions by adsorption on solids [Text] / K. Lunkenheimer, R. Miller, J. Becht // *Colloid Polym. Sci.*— 1982.—V. 260, № 12.—P. 1145–1147.

42. Ross J. L. Surface tension measurements of benzyl benzoate using the Sugden maximum bubble pressure method [Text] / J. L. Ross, W. D. Bruce, W. S. Janna // *Langmuir.*— 1992.—V. 8, № 11—P. 2644.

43. Fainerman V.B. Application of the maximum bubble pressure technique for dynamic surface tension studies of surfactant solutions using the Sugden two-capillary method [Text] / V. B. Fainerman, V. D. Mys, A. V. Makievski, R. Miller // *Journal of Colloid and Interface Science.* — 2006. — V. 304.— P. 222–225.

44. Пат. 2416090 Российская Федерация, МПК⁷ G01N13/02. Способ и устройство для измерения поверхностного натяжения жидкостей [Текст] / Шюманн Д., Мюнцнер Р.; заявитель и патентообладатель Е.Г.О. Электро-Герэтебау ГмбХ. — № 2007134963/28; заявл. 21.02.2006; опубли. 27.03.2009, Бюл. № 11.

45. Fainerman V.B. Maximum bubble pressure tensiometry— an analysis of experimental constraints [Text] / V. B. Fainerman, R. Miller // *Advances in Colloid and Interface Science.*— 2004.—V. 108.— P. 287–301.

46. Fainerman V.B. Accurate analysis of the bubble formation process in maximum bubble pressure tensiometry [Text] / V. B. Fainerman, A. V. Makievski, R. Miller // *Review of Scientific Instruments.*— 2004.—V. 75, № 1.— P. 213–221.

47. Austin M. The measurement of the dynamic surface tension of manoxol OT solutions for freshly formed surfaces [Text] / M. Austin, B. B. Bright, E. A. Simpson // *J. Colloid Interface Sci.*—1967.—V.23, № 1.— P. 108–112.
48. Padday J. The Measurement of Surface Tension [Text] / J. Padday // *J. Colloid Interface Sci.*—1969.— V.1.—P.128–132.
49. Fainerman V. B. The measurement of dynamic surface tension by the maximum bubble pressure method [Text] / V. B. Fainerman, R. Miller, P. Joos // *Colloid Polymer Sci.*—1994.—V. 272, № 6.—P.731–738.
50. Miller R. Messung der dynamische Oberflächenspannung von Tensidlösungen mit dem automatischen Blasendrucktensiometer MPT1 [Text] / R. Miller, V. B. Fainerman, K.–H. Schano, W. Heyer, A. Hofmann, R. Hartmann // *Labor Praxis.*—1994.—V.18.—P.56.
51. Fainerman V. B. Adsorption kinetics from concentrated micellar solutions of ionic surfactants at the water—air interface [Text] / V. B. Fainerman // *Colloids Surfaces.*— 1992.—V.62, № 4.—P. 333–347.
52. Kloubek J. Measurement of the dynamic surface tension by the maximum bubble pressure method. II. Calculation of the effective age of the solution-air interface [Text] / J. Kloubek // *J. Colloid Interface Sci.*—1972—V. 41., №1.— P. 1–6.
53. Kao R. L. Measurement of interfacial dilatational viscosity at high rates of interface expansion using the maximum bubble pressure method. I. Gas—liquid surface [Text] / R. L. Kao, D. A. Edwards, D. T. Wasan, E. Chen // *J. Colloid Interface Sci.*—1992.—V.148, №1.—P. 247–256.
54. Fainerman V. B. Drops and Bubbles in Interfacial Science [Text] / V. B. Fainerman, R. Miller, in: D. Mobius, R. Miller // *Studies of Interface Science.*— Amsterdam, Elsevier.—1998.— V.6.— P. 279–326.
55. Lylyk S. V. The effect of capillary characteristics on the results of dynamic surface tension measurements using the maximum bubble pressure method [Text] / S. V. Lylyk, A. V. Makievski, V. I. Kovalchuk, K.–H. Schano, V. B. Fainerman, R. Miller // *Colloids Surfaces A.*—1998.—V.135, №1.— P. 27–40.

56. Garret P. R. A reexamination of the measurement of dynamic surface tensions using the maximum bubble pressure method [Text] / P. R. Garret, D. R. Ward // *J. Colloid Interface Sci.*–1989.–V. 132.–P. 475–490.

57. Horosov T. S. Effect of the surface expansion and wettability of the capillary on the dynamic surface tension measured by the maximum bubble pressure method [Text] / T. S. Horosov, C. D. Dushkin, K. D. Danov, L. N. Arnaudov, O. D. Velev, A. Mereteab, G. Brose // *Colloid Surf. A.*–1996.–V. 113.–P. 117–126.

58. Miller R. Dynamic Surface Tension Measurements with the Automated Bubble Pressure Tensiometer MPT1 [Text] / R. Miller, V. B. Fainerman, K.–H. Schano, A. Hofmann, W. Heyer // *Tenside Surfactants Detergents.*–1997.–V. 34.–P. 357–363.

59. Mysels K. J. Some limitations in the interpretation of the time dependence of surface tension measured by the maximum bubble pressure method [Text] / K. J. Mysels // *Langmuir.*–1989.–V. 5, № 2.–P. 442–447.

60. Dushkin C. D. The kinetics of the surface tension of micellar surfactant solutions [Text] / C. D. Dushkin, I. B. Ivanov, P. A. Kralchevsky // *Colloid Surf.*–1991.–V.60.–P.235–261.

61. Hallowell C. P. Unusual Characteristics of the Maximum Bubble Pressure Method Using a Teflon Capillary [Text] / C. P. Hallowell, D. T. Hirt // *J. Colloid Interface Sci.*– 1994.– V. 168, №2.– P. 281–288.

62. Hirt D. E. Dynamic surface tension of hydrocarbon and fluorocarbon surfactant solutions using the maximum bubble pressure method [Text] / D. E. Hirt, R. K. Prud'homme, B. Miller, L. Rebenfeld // *Colloids Surf.*–1990.–V. 44.– P. 101–117.

63. Kovalchuk V.I. Dynamic effects in maximum bubble pressure experiments [Text] / V. I. Kovalchuk, S. S. Dukhin // *Physicochemical and Engineering Aspects.*–2001.– V. 192.–P. 131–155.

64. Пугачевич П.П. Газовые приборы для измерения межфазового поверхностного натяжения жидкостей [Текст] / П. П. Пугачевич // *Заводская лаб.*–1963. – Т.29, №5. – С. 622–624.

65. Пугачевич П.П. Гравитационный газовый прибор для измерения

поверхностного натяжения [Текст] / П. П. Пугачевич // Ж. физич. химии. – 1964. – Т. 38., № 5. – С. 1377–1379.

66. Cuny K. H. Development of the Bubble–Pressure Method for Determination of the Surface Tension of Liquids [Text] / K. H. Cuny, W. Wolf // Annalen der Physik. – 1956. – V. 17. – P. 57–77.

67. Razouk R. Surface tension measurement by the differential maximum bubble pressure method using a pressure transducer [Text] / R. Razouk, D. Walmsley // J. Colloid Interface Sci. – 1974. – V. 47. – P. 515–519.

68. Mysels K. J. Surface tension measurement while stirring. A tool in unraveling adsorption kinetics [Text] / K. J. Mysels, R. E. Stafford // Colloids Surfaces. – 1989. – V. 36, № 3. – P. 289–296.

69. Mysels K. J. Time and concentration resolved surface tension [Text] / K. J. Mysels, R. E. Stafford // Colloids Surfaces. – 1989. – V. 51. – P. 105–114.

70. Mysels K. J. The maximum bubble pressure method of measuring surface tension, revisited [Text] / K. J. Mysels // Colloid Surfaces. – 1990. – V. 43. – P. 241–262.

71. Forsythe G. Computer Methods for Mathematical Computations [Text] / G. Forsythe, M. Malcolm, C. Moler. – New Jersey, Prentice–Hall, 1977. – 259 p.

72. Kahaner D. Numerical Methods and Software [Text] / D. Kahaner, C. Moler, S. Nash. – New Jersey, Prentice–Hall, 1989. – 495 p.

73. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.– мат. лит., 1987. – 240 с.

74. Bogacki P. A 3(2) pair of Runge–Kutta formulas [Text] / P. Bogacki, L. F. Shampine // Appl. Math. Letters. – 1989. – V. 2. – P. 1–9.

75. Dormand J. R. A family of embedded Runge–Kutta formulae [Text] / J. R. Dormand, P. J. Prince // J. Comp. Appl. Math. – 1980. – V. 6. – P. 19–26.

76. Shampine L. F. Computer Solution of Ordinary Differential Equations: the Initial Value Problem [Text] / L. F. Shampine, M. K. Gordon. – San Francisco, W. H. Freeman, 1975. – 484 p.

77. Brent R. Algorithms for Minimization Without Derivatives [Text] / R. Brent.— New Jersey, Prentice–Hall, 1973.— 195 p.
78. Forsythe G. E. Computer Methods for Mathematical Computations [Text] / G. E. Forsythe, M. A. Malcolm, C. B. Moler.— New Jersey, Prentice–Hall, 1976.— 259 p.
79. Montgomery R. B. Viscosity and thermal conductivity of air and diffusivity of water vapor in air [Text] / R. B. Montgomery // J. Meteor.—1947.—V. 4.—P. 193–196.
80. De Boor C. A Practical Guide to Splines [Text] / C. De Boor.—New York, Springer–Verlag, 2001.— 372 p.
81. Orfanidis S. J. Introduction to Signal Processing [Text] / S. J. Orfanidis.— New Jersey, Prentice–Hall, 1996.—798 p.
82. Bashforth F. An attempt to test the theories of capillary action [Text] / F. Bashforth, J. C. Adams.— Cambridge: At the university press, 1883. — 140 p.
83. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. [Текст] / М.Дорожовець, В.Мотало, Б. Стадник, В.Василюк, Р. Борець, А. Ковальчик; За ред. Б.Стадника.— Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005.—Т.1. Основи метрології.—532 с.
84. Полішко С.П., Трубенюк О.Д. Точність засобів вимірювань: Навчальний посібник [Текст] /Пер. з рос. В. В. Клищенко.—К.: Вища шк., 1992.—173 с.
85. Kunzel O. Die Oberflächenspannung in Serum und Liquor [Text] / O. Kunzel // Ergeb. Inneren Med. Kinderheil.—1941.—V. 60.— P. 565–656.
86. Hencir E. Surface tension of blood [Text] / E. Hencir, J. Rosina // Physiological Research.—1997.—V. 46.— P. 319–325.
87. Brydon H. Reduced bacterial adhesion to hydrocephalus shunt catheters mediated by cerebrospinal fluid proteins [Text] / H. Brydon, R. Hayward, W. Harkness, R. Bayston // British J. Neurosurgery.—1995.—V. 9.— P. 645–650.
88. Efentakis M. Gastric juice as a dissolution medium: surface tension and pH [Text] / M. Efentakis, J. B. Dressman // European J. Drug Metabolism and Pharmacokinetics.—1998.—V. 23.— P. 97–105.

89. Kazakov V. N. Dilation rheology as medical diagnostics of human biological liquids [Text] / V. N. Kazakov, E. L. Barkalova, L. A. Levchenko, T. M. Klimenko, V. B. Fainerman, R. Miller // *Colloids Surfaces A.*–2011.–V. 391.–P. 190–194.

90. Absoloma D. R. Determination of surface tensions of proteins II. Surface tension of serum albumin, altered at the protein-air interface [Text] / D. R. Absoloma, C. J. Van Oss, W. Zingg, A.W. Neumann // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Protein Structure.*–1981.–V. 670, № 1.–P. 74–78.

91. Dani C. Bilirubin influence on oxidative lung damage and surfactant surface tension properties [Text] / C. Dani, E. Martelli, M. Tronchin, G. Buonocore, M. Longini // *Pediatric pulmonology.*–2004.–V. 8, № 4.– P. 179–185.

92. Horiuchi T. Increased surface tension of the lung and surfactant in bleomycin-induced pulmonary fibrosis in rats [Text] / T. Horiuchi, M. Ikegami, R. M. Cherniack, R. J. Mason // *American journal of respiratory and critical care medicine.*–1996.–V. 154, № 4.–P. 1002–5.

93. Єрмолаєва М. В. Діагностична оцінка поверхневого натягу крові, сечі та синовіальної рідини при різних клінічних варіантах ревматоїдного артриту [Текст]: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.01.02 / М. В. Єрмолаєва; Луганський держ. медичний ун-т. – Луганськ, 1998. – 16 с.

94. Антонова Л. М. Діагностичне значення динамічного поверхневого натягу біологічних рідин при неврологічних захворюваннях [Текст]: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.01.15 / Л. М. Антонова; Київська медична академія післядипломної освіти ім. П.Л.Шупика. – К., 2004. – 20 с.

95. Айко А. Є. Клінічне значення динамічного поверхневого натягу крові та сечі при гломерулонефритах [Текст]: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.01.02 / А. Є. Айко; Луганський держ. медичний ун-т. – Луганськ, 1996. – 20 с.

96. Прокопенко Б. Б. Клінічне значення динамічного поверхневого натягу і показників реометрії сироватки крові у хворих з гострою нирковою недостатністю [Текст]: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.01.30 / Б. Б. Прокопенко; Донецький держ. медичний ун-т ім. М.Горького, НДІ травматології та ортопедії. – Донецьк,

2006. – 20 с.

97. Sinyachenko O. V. Dynamic surface tension of biologic fluids by computerized tensiometer [Text] / O.V. Sinyachenko, V. N. Kazakov, V. B. Fainerman, L. N. Antonova, M. V. Ermolaeva // School Fundam. Med. J.–1996.–V.2, №1.–P.87–88.

98. Антонова Л. Н. Межфазная тензиометрия крови и спинномозговой жидкости как новый метод диагностики при заболеваниях нервной системы [Текст] / Л. Н. Антонова // Арх. клин. эксперим. мед.–2000.–Т.9, №2.–С.22–26.

99. Антонова Л.Н. Межфазная тензиометрия крови и спинномозговой жидкости у больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения [Текст] / Л. Н. Антонова // Укр. мед. альманах.–2002.– № 6.– С. 8–9.

100. Kazakov V. N. Studies on the application of dynamic surface tensiometry of serum and cerebrospinal liquid for diagnostics and monitoring of treatment in patients who have rheumatic, neurological or oncological diseases [Text] / V.N. Kazakov, A. F. Vozianov, O.V. Sinyachenko, D.V. Trukhin, V.I. Kovalchuk, U. Pison // Advances in Colloid and Interface Science.–2000.–V. 86, № 1.–P. 1–38.

101. Синяченко О. В. Динамическая межфазная тензиометрия сыворотки крови и спинномозговой жидкости при ушибах головного мозга [Текст] / О. В. Синяченко, В. Н. Казаков, В. Б. Файнерман, Л. Н. Антонова, В. Г. Назаренко // Ортопед. травматол. протезиров.–1998.–№4.– С.95–97.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма розрахунку геометричних параметрів меніска у момент

максимального тиску

```

clc;%%очищення екрану clear;%% очищення всіх змінних
format long g; %% задання формату виводу результатів
dl=1e-5; %% крок інтегрування
rizn=2*dl;%% різниця між основною і додатковою поверхнею,
% чим менша різниця тим точніший результат, але якщо різниця рівна або близька до кроку інтегрування, то може
наступити передчасне визначення максимуму
R=1; %% лічильник результатів
Bm=[]; % ініціалізація векторів результатів
R0_r=[];
r_a=[];
Fm=[];
Z0_r=[];
drgr_Pmax=[];
sigma_r_P=[];
A_r2=[];
V_r3=[];
Table=[];
Change_B=0;
TypeMetode=1;%
% вибір методу інтегрування Рунге-Кутта (4,5) якщо 1 чи Адамса-Башфорта-Мултона якщо 0
for B=[0.001:0.001:0.01 0.02:0.01:0.1 0.2:0.1:5 5.2:0.2:10]
Change_B=Change_B+1;
disp('rizn=');
disp(rizn);
disp('dl=');
disp(dl);
dB=rizn*B;%% відстань між поверхнями
PRUV_next=sqrt((B+dB)/B);
[B_L,B_X,B_F,B_Z]=RungeToCorner(B,0,dl,TypeMetode,pi); %% побудова основної поверхні для кута від 0 до 180
[B_L_next,B_X_next,B_F_next,B_Z_next]=RungeToCorner(B,dB,dl,TypeMetode,pi);% побудова додаткової поверхні
для кута від 0 до 180
for k=1:length(B_F_next) % знищення точок наступної (B+dB) поверхні до 90 градусів, оскільки для інтерполяції %
Z_intprl_next потрібна монотонна функція
if B_F_next(k)>pi/2
B_L_next(1:(k-1))=[];
B_X_next(1:(k-1))=[];
B_F_next(1:(k-1))=[];

```

Продовження додатку А

```

B_Z_next(1:(k-1))=[];
break;
end
end
for k=1:length(B_F)
if (B_F(k)<pi/2) %% пропуск точок основної поверхні до кута 90 градусів
continue;
end
Z_intprl_next=interp1(B_X_next,B_Z_next,B_X(k)/PRUV_next,'spline');%% знаходження інтерпольованої координати
z для додаткової поверхні
P_B=2/B+B_Z(k); %% розрахунок тиску основної поверхні
P_B_next=2/(B+dB)+Z_intprl_next;%% розрахунок тиску додаткової поверхні
if (P_B>P_B_next*PRUV_next)%% якщо тиск основної поверхні більший за макс. наступної поверхні то це момент
макс. тиску
% розрахунок площі та об'єму основної поверхні для максимального тиску
Am=pi*B_X(1)*B_L(1);
Vm=(1/3)*pi*(B_X(1)^2)*abs(B_Z(1));
for i=1:k-1
Am=Am+pi*(B_X(i)+B_X(i+1))*(B_L(i+1)-B_L(i));
Vm=Vm+(1/3)*pi*(abs(B_Z(i+1))-abs(B_Z(i)))*(B_X(i)^2+B_X(i)*B_X(i+1)+B_X(i+1)^2);
end
axis square
axis([0 2 0 2])
plot(B_X(1,1:k),B_Z(1,1:k)); %% побудова профілю меніска до точки максимального тиску
disp('Тиск основної поверхні: P_B=');
disp(P_B);
disp('Приведений тиск наступної поверхні:P_B_next=');
disp(P_B_next);
disp('points already done R=');
disp(R);
disp('Знайдений максмальний тиск');
Bm(R)=B;
disp('Bm(R)=');
disp(Bm(R));
R0_r(R)=1/B_X(k); %% приведення отриманих результатів до r
disp('R0_r(R)=');
disp(R0_r(R));
r_a(R)=B_X(k)*sqrt(Bm(R));
disp('r_a(R)='); disp(r_a(R)); Fm(R)=B_F(k)*180/pi;

```


Продовження додатку А

```

disp('Fm(R)=');
disp(Fm(R));
Z0_r(R)=B_Z(k)*R0_r(R);
disp('Z0_r(R)=');
disp(Z0_r(R));
drgr_Pmax(R)= 1/(R0_r(R)*P_B);
disp('drgr_Pmax(R)=');
disp(drgr_Pmax(R));
sigma_r_P(R)=drgr_Pmax(R)/Bm(R)*(R0_r(R))^2;
disp('sigma_r_P(R)=');
disp(sigma_r_P(R));
A_r2(R)=Am*(R0_r(R))^2;
disp('A_r2(R)=');
disp(A_r2(R));
V_r3(R)=Vm*(R0_r(R))^3;
disp('V_r3(R)=');
disp(V_r3(R));
R=R+1;
break;
end
end
end
Bm=transp(Bm); %% переведення результатів із стовпців в рядки
R0_r=transp(R0_r);
r_a=transp(r_a);
Fm=transp(Fm);
Z0_r=transp(Z0_r);
drgr_Pmax=transp(drgr_Pmax);
sigma_r_P=transp(sigma_r_P);
A_r2=transp(A_r2);
V_r3=transp(V_r3);
Table(:,1)=Bm; %% створення таблиці з результатами
Table(:,2)=R0_r; Table(:,3)=r_a;
Table(:,4)=Fm; Table(:,5)=Z0_r;
Table(:,6)=drgr_Pmax;
Table(:,7)=sigma_r_P;
Table(:,8)=A_r2;
Table(:,9)=V_r3;
save('dl5adamsrefine24_rizn2dl.mat'); %% запис результатів (таблиці) з результатами

```

Додаток Б

Підпрограма побудови основної та додаткової поверхні меніска методом Рунге-Кутта 4(5) порядку чи методом Адамса-Башфорта-Мултона

```

function [L,X,F,Z]=RungeToCorner(B,dB,dl,SelectMetod,corner)
B=B+dB;
if (SelectMetod==1)
pmyfunc=@ode45; %% вибрати для обчислень метод Рунге-Кутта 4(5) порядку
else
pmyfunc=@ode113; %% вибрати для обчислень метод Адамса-Башфорта-Мултона
end
options=odeset('AbsTol',[eps eps eps],'OutputFcn',@solproc,'InitialStep',1e-6,'Refine',24,'MaxStep',dl); %% встановити
параметри точності обчислень
solv=pmyfunc(@formul,[0 10],[realmin 0 0],options); %% встановити початкові граничні умови
L=solv.x;
X=solv.y(1,:);
F=solv.y(2,:);
Z=solv.y(3,:);
function dy = formul(1,y)
dy=zeros(3,1); %% система диференціальних рівнянь
dy(1)=cos(y(2));
dy(2)=2+B*y(3)- 1/y(1)*sin(y(2));
dy(3)=sin(y(2));
end
function status =solproc(1,y,flag)
status=(isempty(flag))&&(abs(y(2))>=corner); %% умова завершення розрахунку(тут розрахунок буде завершений
при досягненні кута corner)
end
end

```

Додаток В

Результати розрахунку параметрів меніска у момент максимального тиску у бульбашці методом Рунге-Кутта 4(5) порядку

Таблиця В.1

β	R_0/r	r/a	φ	z_0/r	σ/rP_{\max}	A/r^2	V/r^3
0,001	1,000167	0,031618	90,000367	0,999776	0,499833	6,282179	2,093892
0,002	1,000333	0,044706	90,000427	0,999546	0,499667	6,281142	2,093373
0,003	1,000499	0,054745	90,000449	0,999316	0,499501	6,280101	2,092853
0,004	1,000666	0,063203	90,000432	0,999086	0,499336	6,279059	2,092332
0,005	1,000832	0,070652	90,028569	0,999347	0,499170	6,281097	2,093351
0,006	1,000999	0,077382	90,076291	0,999948	0,499004	6,285280	2,095442
0,007	1,001166	0,083569	90,118868	1,000459	0,498838	6,288903	2,097254
0,008	1,001333	0,089324	90,157438	1,000901	0,498673	6,292089	2,098846
0,009	1,001501	0,094726	90,194303	1,001313	0,498508	6,295090	2,100347
0,010	1,001669	0,099833	90,229457	1,001695	0,498343	6,297905	2,101754
0,02	1,003354	0,140949	90,544210	1,004873	0,496703	6,322074	2,113836
0,03	1,005053	0,172334	90,840337	1,007723	0,495081	6,344293	2,124941
0,04	1,006765	0,198656	91,131563	1,010485	0,493476	6,366064	2,135820
0,05	1,008488	0,221725	91,420732	1,013208	0,491889	6,387698	2,146630
0,06	1,010225	0,242470	91,708975	1,015913	0,490320	6,409320	2,157432
0,07	1,011973	0,261445	91,996252	1,018598	0,488768	6,430926	2,168224
0,08	1,013734	0,279011	92,283133	1,021274	0,487233	6,452578	2,179039
0,09	1,015506	0,295419	92,569591	1,023940	0,485714	6,474276	2,189875
0,1	1,017290	0,310853	92,855597	1,026596	0,484213	6,496015	2,200730
0,2	1,035747	0,431779	95,700757	1,052797	0,470091	6,716883	2,310977
0,3	1,055205	0,519068	98,505564	1,078183	0,457485	6,942704	2,423667
0,4	1,075487	0,588065	101,254085	1,102564	0,446247	7,171595	2,537924
0,5	1,096416	0,644926	103,933660	1,125800	0,436228	7,401756	2,652899
0,6	1,117809	0,692960	106,531560	1,147738	0,427286	7,631096	2,767578
0,7	1,139492	0,734239	109,038458	1,168274	0,419288	7,857717	2,881026
0,8	1,161304	0,770192	111,447208	1,187335	0,412112	8,079831	2,992344
0,9	1,183107	0,801858	113,755133	1,204912	0,405648	8,296163	3,100877
1	1,204766	0,830036	115,958090	1,220972	0,399796	8,505166	3,205817
1,1	1,226187	0,855342	118,057602	1,235566	0,394474	8,706109	3,306763
1,2	1,247273	0,878272	120,053243	1,248714	0,389604	8,898001	3,403172
1,3	1,267967	0,899215	121,949202	1,260503	0,385126	9,080612	3,494891
1,4	1,288207	0,918498	123,746903	1,270978	0,380983	9,253355	3,581581
1,5	1,307959	0,936378	125,450810	1,280228	0,377130	9,416201	3,663195
1,6	1,327193	0,953072	127,064394	1,288323	0,373527	9,569052	3,739649
1,7	1,345908	0,968744	128,594028	1,295375	0,370144	9,712370	3,811156
1,8	1,364077	0,983552	130,041556	1,301428	0,366951	9,845948	3,877586
1,9	1,381723	0,997599	131,414323	1,306603	0,363927	9,970572	3,939328
2	1,398833	1,010995	132,714476	1,310944	0,361051	10,086221	3,996358
2,1	1,415431	1,023814	133,948028	1,314548	0,358307	10,193587	4,049024
2,2	1,431510	1,036137	135,116680	1,317449	0,355680	10,292676	4,097323
2,3	1,447113	1,048000	136,227731	1,319758	0,353162	10,384502	4,141778
2,4	1,462233	1,059471	137,282014	1,321494	0,350739	10,468999	4,182355
2,5	1,476897	1,070582	138,284148	1,322726	0,348404	10,546791	4,219378
2,6	1,491121	1,081369	139,237247	1,323501	0,346150	10,618265	4,253051

Продовження додатку В

Продовження табл. В.1

2,7	1,504926	1,091860	140,144640	1,323869	0,343970	10,683871	4,283612
2,8	1,518318	1,102088	141,007856	1,323853	0,341857	10,743760	4,311145
2,9	1,531341	1,112057	141,832524	1,323528	0,339811	10,798817	4,336117
3	1,543989	1,121802	142,618375	1,322894	0,337823	10,848910	4,358464
3,1	1,556292	1,131331	143,369226	1,322001	0,335892	10,894630	4,378500
3,2	1,568262	1,140660	144,086892	1,320871	0,334014	10,936227	4,396361
3,3	1,579914	1,149803	144,773187	1,319528	0,332185	10,973960	4,412188
3,4	1,591263	1,158771	145,429918	1,317994	0,330404	11,008089	4,426124
3,5	1,602323	1,167573	146,058881	1,316291	0,328667	11,038882	4,438311
3,6	1,613109	1,176217	146,661863	1,314439	0,326973	11,066604	4,448895
3,7	1,623637	1,184710	147,240635	1,312459	0,325321	11,091523	4,458020
3,8	1,633922	1,193055	147,796956	1,310369	0,323708	11,113906	4,465829
3,9	1,643957	1,201273	148,330137	1,308162	0,322131	11,133602	4,472250
4	1,653781	1,209350	148,844258	1,305880	0,320591	11,151280	4,477633
4,1	1,663385	1,217304	149,338525	1,303515	0,319086	11,166775	4,481897
4,2	1,672761	1,225154	149,811984	1,301055	0,317610	11,179902	4,484950
4,3	1,681970	1,232866	150,271236	1,298570	0,316170	11,191751	4,487360
4,4	1,690979	1,240475	150,712721	1,296019	0,314759	11,201698	4,488807
4,5	1,699802	1,247981	151,137866	1,293417	0,313377	11,209961	4,489407
4,6	1,708452	1,255383	151,548081	1,290776	0,312023	11,216757	4,489276
4,7	1,716942	1,262680	151,944757	1,288110	0,310697	11,222295	4,488523
4,8	1,725287	1,269870	152,329270	1,285431	0,309399	11,226784	4,487256
4,9	1,733472	1,276971	152,700210	1,282721	0,308126	11,229971	4,485350
5	1,741511	1,283982	153,058820	1,279994	0,306877	11,232043	4,482902
5,2	1,757168	1,297742	153,741094	1,274495	0,304449	11,233111	4,476524
5,4	1,772322	1,311155	154,382626	1,268986	0,302114	11,230921	4,468612
5,6	1,786979	1,324264	154,983507	1,263453	0,299860	11,225363	4,459120
5,8	1,801220	1,337049	155,552007	1,257961	0,297689	11,217646	4,448668
6	1,815036	1,349554	156,086890	1,252487	0,295591	11,207460	4,437108
6,2	1,828501	1,361760	156,595494	1,247083	0,293567	11,195855	4,424971
6,4	1,841594	1,373714	157,075346	1,241717	0,291609	11,182342	4,412016
6,6	1,854348	1,385418	157,529660	1,236405	0,289714	11,167329	4,398451
6,8	1,866793	1,396878	157,961273	1,231162	0,287879	11,151166	4,384451
7	1,878956	1,408097	158,372659	1,225998	0,286102	11,134142	4,370160
7,2	1,890827	1,419105	158,762522	1,220892	0,284378	11,115982	4,355443
7,4	1,902457	1,429885	159,135961	1,215879	0,282708	11,097376	4,340640
7,6	1,913828	1,440469	159,490914	1,210931	0,281085	11,077944	4,325563
7,8	1,924988	1,450839	159,831940	1,206078	0,279510	11,058290	4,310508
8	1,935910	1,461032	160,156261	1,201289	0,277979	11,037942	4,295241
8,2	1,946636	1,471032	160,467937	1,196589	0,276491	11,017431	4,280019
8,4	1,957172	1,480849	160,767223	1,191973	0,275045	10,996733	4,264829
8,6	1,967517	1,490496	161,054099	1,187433	0,273636	10,975787	4,249639
8,8	1,977671	1,499986	161,328280	1,182961	0,272264	10,954504	4,234404
9	1,987669	1,509306	161,593063	1,178576	0,270929	10,933300	4,219322
9,2	1,997504	1,518470	161,847786	1,174268	0,269628	10,912031	4,204321
9,4	2,007169	1,527495	162,091539	1,170023	0,268357	10,890528	4,189317
9,6	2,016694	1,536369	162,327151	1,165858	0,267119	10,869139	4,174476
9,8	2,026068	1,545108	162,553371	1,161759	0,265910	10,847653	4,159693
10	2,035317	1,553702	162,772782	1,157739	0,264731	10,826383	4,145115

Додаток Г

Ітераційна процедура визначення поверхневого натягу рідини для вимірних значень максимального тиску, різниці густин між досліджуваною рідиною та газом і встановленій глибині занурення вимірювального капіляра

```
function iterformul();
clear; % очистити екран
clc; % стерти всі змінні
format long; % встановити формат виводу результатів
r=0.1E-3; %встановити радіус капіляра в м
Pmax=1460;% ввести значення максимального тиску
delta_ro=1000;%ввести різницю густин досліджуваної рідини та газу в кг/м3
g=9.8;% прискорення вільного падіння
H=2e-3;% ввести глибину занурення капіляра
f=@(sigma)((R0(r,sigma, delta_ro, g)/2)*(Pmax-delta_ro*g*(H+z0(r,sigma, delta_ro, g)))-sigma) % формула розрахунку
ПН
z=fzero(f,[10e-3 100e-3])% функція пошуку ПН в діапазоні від 10 до 100 мН/м
function Cap_const_a=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)
Cap_const_a=(sqrt(sigma/(g*delta_ro))); % формула розрхунку капілярної сталої
end
function z0=z0(r,sigma, delta_ro, g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
z0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168*r_a-
36.990684667380286*r_a^2+43.823733638082880*r_a^3-
25.646434108785900*r_a^4+6.616357594546090*r_a^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240*r_a+42.636406466905065*r_a^2-
21.468316667902630*r_a^3+2.900558342028609*r_a^4+r_a^5));
end
function R0=R0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
x=r_a; w=2.064006154225540;
a0=7.538335628900215; a1=-0.949653873696233; b1=-11.732394127778775; a2=-8.706697763134265;
b2=-0.570453267792374; a3=-1.049907159035991; b3=5.769903690006246; a4=3.162638328628503;
b4=0.894258757353888; a5=0.548176726783395; b5=-1.411823364440087; a6=-0.487164305772356;
b6=-0.237015527609773; a7=-0.071153087516410; b7=0.117899637375715; a8=0.016604248643217;
b8=0.011194689911517;
R0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*(a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) +
a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +a6*cos(6*x*w) +
b6*sin(6*x*w) + a7*cos(7*x*w) + b7*sin(7*x*w) +a8*cos(8*x*w) + b8*sin(8*x*w));
end
end
```

Додаток Д

Ітераційна процедура визначення поверхневого натягу рідини за
допомогою трьох капілярів

```

function iterformul();
clear; % очистити екран clc; % стерти всі змінні
format long; % встановити формат виводу результатів
g=9.8;% прискорення вільного падіння
dh=2e-3; % різниця по висоті між капілярами
r1=0.1E-3;r2=0.5E-3; %встановити радіуси 1 і 2 капілярів
Pmax1=1.439908237067570e+003;% ввести значення максимального тиску
Pmax2=1.459508237067570e+003;% ввести значення максимального тиску
Pmax3=3.119281571401756e+002;% ввести значення максимального тиску
delta_ro=(Pmax2-Pmax1)/(dh*g);% різниця густин досліджуваної рідини та газу в кг/м3
f=@(sigma)((Pmax3-Pmax2-(Pmax2-Pmax1)*(z0(r2,sigma,delta_ro,g)-z0(r1,sigma,delta_ro,
g))/dh)/(2*(1/R0(r2,sigma,delta_ro,g)-1/R0(r1,sigma,delta_ro,g)))-sigma) % формула розрахунку ПН
IterResult_sigma=fzero(f,72.5e-3)% функція пошуку ПН в діапазоні від 10 до 100 мН/м
function Cap_const_a=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)
Cap_const_a=(sqrt(sigma/(g*delta_ro))); % формула розрхунку капілярної сталой
end
function z0=z0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
z0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168*r_a-
36.990684667380286*r_a^2+43.823733638082880*r_a^3-
25.646434108785900*r_a^4+6.616357594546090*r_a^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240*r_a+42.636406466905065*r_a^2-
21.468316667902630*r_a^3+2.900558342028609*r_a^4+r_a^5)); end
function R0=R0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
x=r_a; w=2.064006154225540; a0=7.538335628900215; a1=-0.949653873696233;
b1=-11.732394127778775; a2=-8.706697763134265; b2=-0.570453267792374; a3=-1.049907159035991;
b3=5.769903690006246; a4=3.162638328628503; b4=0.894258757353888; a5=0.548176726783395;
b5=-1.411823364440087; a6=-0.487164305772356; b6=-0.237015527609773; a7=-0.071153087516410;
b7=0.117899637375715; a8=0.016604248643217; b8=0.011194689911517;
R0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*(a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) +
a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +a6*cos(6*x*w) +
b6*sin(6*x*w) + a7*cos(7*x*w) + b7*sin(7*x*w) +a8*cos(8*x*w) + b8*sin(8*x*w));
end end
H2_3=H2_3=Pmax2/(delta_ro*g)-2*IterResult_sigma/(R0(r1,IterResult_sigma,
delta_ro,g)*delta_ro*g)-z0(r1,IterResult_sigma,delta_ro,g)
H1=H2_3-dh % глибина занурення першого капіляра

```

Додаток Е

Процедура програмного визначення моменту максимального тиску та часових параметрів максимального тиску, а також їх статистичного оброблення

```
function FindMaxProgramOverDiffPressure(t,Pressure,DiffPressure,handles,TolAbsPmax,TolRelTlife)
% змінні потрібні для пошуку максимумів
global ArrayMinMax TYmin NofoundMax NofoundMin RepeatedArrayMinMax IndexesMax NumberRequiredMinMax
StartTimeFromSearchToMin TimeFromLastMinimum DeegreeLoess MaxNumberRepeatedArrayMinMax DminPmax
Buf=[t;Pressure]; % масив значень тиску
SmoothingBuf=smooth(Buf(:,1),Buf(:,2),DeegreeLoess,'sgolay'); % створення профільованого масиву тиску
DiffPressure=DiffPressure'; % транспонувати масив значень перепаду тиску DiffPressure
% оброблення «порції» даних значень тиску і перепаду тиску
for i=1:length(Buf) % знайти мінімум тиску
if (NofoundMin) % якщо 1 то знайти мінімум тиску за тиском
if (TYmin(1,2)>=Buf(i,2)) % якщо буферний мінімум є більшим за поточний тиск, то записати у буферний мінімум
значення тиску
TYmin(1,1)=Buf(i,1); % час мінімуму TYmin(1,2)=Buf(i,2); % тиск мінімуму
TYmin(1,3)=DiffPressure(i); % різниця тиску мінімуму
continue;
else
if Buf(i,2)-TYmin(1,2) > DminPmax*TYmin(1,2) % якщо різниця між поточним тиском і буферним мінімумом є
більшою DminPmax *TYmin(1,2), який встановлений для кожного капіляра окремо
% то записати наступний час мінімуму тиску
ArrayMinMax(end+1,1)=TYmin(1,1); % час мінімуму тиску
ArrayMinMax(end,2)=TYmin(1,2); % тиск мінімуму
ArrayMinMax(end,3)=TYmin(1,3); % точка різниці тиску мінімуму
NofoundMax=1; % умова для початку пошуку максимуму
NofoundMin=0; % точка мінімуму знайдена
TYmin=[0 0 0 0 1000 0]; % встановити ініціалізовану точку максимуму
StartTimeFromSearchToMin=tic;
end
end
end
if (NofoundMax) % був знайдений мінімум
if SmoothingBuf(i)>= TYmin(1,4) % якщо поточний згладжений тиск є більший за поточний максимум то % записати
поточний тиск в поточний максимум тиску
if TYmin(1,2) <= Buf(i,2) % вибрати максимальний тиск на кривій
TYmin(1,2)=Buf(i,2); % записати реальний максимальний тиск
TYmin(1,3)=DiffPressure(i); % записати перепад тиску в момент МТБ буде мінімальним end
```

Продовження додатку Е

```

TYmin(1,1)=Buf(i,1); % записати час
TYmin(1,4)=SmoothingBuf(i); % записати згладжене значення тиску для майбутнього порівня
continue;
else
% почати шукати точку мінімуму для цього максимуму або іншого, якщо за час пошуку мінімуму він зміниться
if TYmin(1,2) <= Buf(i,2) % якщо знаходження макс. точки SmoothingBuf буде ще більший тиск, то записати його
як максимальний і вибрати максимальний тиск на кривій тиску
TYmin(1,1)=Buf(i,1); % записати час TYmin(1,2)=Buf(i,2); % записати реальний максимальний тиск
TYmin(1,3)=DiffPressure(i); % записати перепад тиску у момент МТБ, який буде мінімальним
TYmin(1,4)=SmoothingBuf(i); % записати згладжене значення тиску для майбутнього порівня
continue;
end
if (TYmin(1,6)>=Buf(i,2))% якщо буферний мінімум є більшим за
% тиск, то записати в буферний мінімум значення тиску
TYmin(1,5)=Buf(i,1); % час мінімуму TYmin(1,6)=Buf(i,2); % тиск мінімуму
TYmin(1,7)=DiffPressure(i); % різниця тиску мінімуму
continue;
else
if Buf(i,2)-TYmin(1,6) > DminPmax*TYmin(1,6)% якщо різниця між поточним тиском
% і буферним мінімумом є більшою DminPmax, який встановлений для кожного капіляру окремо
% то записати наступний максимум
ArrayMinMax(end,4)=TYmin(1,1); % час максимуму
ArrayMinMax(end,5)=TYmin(1,2); % тиск максимуму
ArrayMinMax(end,6)=TYmin(1,3); % перепад тиску максимуму
% записати наступний мінімум
ArrayMinMax(end+1,1)=TYmin(1,5); % час мінімуму тиску
ArrayMinMax(end,2)=TYmin(1,6); % тиск мінімуму
ArrayMinMax(end,3)=TYmin(1,7); % точка різниці тиску мінімуму
NofoundMax=1; %умова для початку пошуку наступного максимуму
NofoundMin=0; % точка мінімуму знайдена
TYmin=[0 0 0 0 1000 0]; % встановити ініціалізовану точку максимуму
StartTimeFromSearchToMin=tic;
end
end
end % проходить тут усереднення результатів
if ~isempty(ArrayMinMax)
if (length(ArrayMinMax(:,1)))>=NumberRequiredMinMax) % якщо к-сть знайдених max рівна або більша ніж
встановлена к-сть для усереднення
% то почати усереднювати максимуси

```


Додаток Ж

Програма визначення радіусу капіляра для вимірюного максимального тиску, різниці густин досліджуваної рідини та газу, поверхневого натягу цієї рідини та глибини занурення вимірювального капіляра

```

function iterformul();
clear; % очистити екран
clc; % стерти всі змінні
format long; % встановити формат виводу результатів
sigma =72.5e-3; % ввести значення ПН
Pmax=1460;% ввести значення максимального тиску
delta_ro=1000;% ввести різницю густин досліджуваної рідини та газу в кг/м3
g=9.8;% прискорення вільного падіння
H=2e-3;% ввести глибину занурення капіляра
f=@(r)((R0(r,sigma, delta_ro, g)/2)*(Pmax-delta_ro*g*(H+z0(r,sigma, delta_ro, g)))-sigma) % формула розрахунку
радіусу капіляра
z=fzero(f, f,[0.01e-3 1.5e-3])% функція знаходження радіусу в діапазоні від 0,01 до 1,5 мм
function Cap_const_a=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)
Cap_const_a=(sqrt(sigma/(g*delta_ro))); % формула розрхунку капілярної сталої
end
function z0=z0(r,sigma, delta_ro, g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
function z0=z0(r,sigma, delta_ro, g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
z0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168*r_a-
36.990684667380286*r_a^2+43.823733638082880*r_a^3-
25.646434108785900*r_a^4+6.616357594546090*r_a^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240*r_a+42.636406466905065*r_a^2-
21.468316667902630*r_a^3+2.900558342028609*r_a^4+r_a^5));
end
function R0=R0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
x=r_a; w=2.064006154225540; a0=7.538335628900215; a1=-0.949653873696233;
b1=-11.732394127778775; a2=-8.706697763134265; b2=-0.570453267792374; a3=-1.049907159035991;
b3=5.769903690006246; a4=3.162638328628503; b4=0.894258757353888; a5=0.548176726783395;
b5=-1.411823364440087; a6=-0.487164305772356; b6=-0.237015527609773; a7=-0.071153087516410;
b7=0.117899637375715; a8=0.016604248643217; b8=0.011194689911517;
R0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*(a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) +
a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +a6*cos(6*x*w) +
b6*sin(6*x*w) + a7*cos(7*x*w) + b7*sin(7*x*w) +a8*cos(8*x*w) + b8*sin(8*x*w)); end end

```


Додаток Л

Програмний код мікроконтролера ADUC834

```

//якщо ще не підключено то підключити файл-заголовок бібліотеки 834keil.lib
#ifndef __lib834_H__
#include <lib834.H>
#define __lib834_H__
#endif
//підключити файл-заголовок для цього файлу
#ifndef __main_H__
#define __main_H__
#include <main.H>
#endif
//підключити файл-заголовок ADUC834.H де записані адреси регістрів МК
#ifndef __ADUC834_H__
#define __ADUC834_H__
#include <ADUC834.H>
#endif
//підключити файл-заголовок stdio.h для стандартних процедур вводу-виводу
#ifndef __stdio_H__
#define __stdio_H__
#include <stdio.h>
#endif
#ifndef __stdlib_H__
#define __stdlib_H__
#include <stdlib.h>
#endif
#define NumberSensorTemp 2; // к-сть датчиків т-ри
// ф-ї дисплею із файлу асамблеру
extern unsigned int POD_PER_COM_LCD_COM(unsigned char); // ф-я надсилання команди в дисплей
extern unsigned int POD_PER_COM_LCD_DATA(unsigned char); // ф-я надсилання даних в дисплей
extern void Pod_Init_LCD(void); // ініціалізувати дисплей
extern void Pod_CLEAR_LCD(void); // очистити дисплей
// змінні
unsigned char buf[16]=0; // тимчасовий масив для дисплею
// змінні термостату
sbit ThermoResistor=P0^1; // вивід для керування терморезистором (для нагрівання)
sbit Cooler=P2^0; // вивід для керування вентилятором (для охолодження)
// адрес електророзподільників
sbit ElectroValve1=P0^0; //електророзподільник 1 для капіляра 1 (короткий та вузький)- по замовчуванню закритий
sbit ElectroValve2=P2^1; // електророзподільник 2 для капіляра 2 (довгий та вузький)- по замовчуванню закритий
sbit ElectroValve3=P3^7; // електророзподільник 3 для капіляра 3 (довгий та широкий) - по замовчуванню закритий
sbit ElectroValve4=P3^5; // електророзподільник 4:перемикач максимум шкали (вимірювання тиску до протічного
капіляра) - вимірювання тиску в робочій камері
sbit ElectroValve5=P0^6; // електророзподільник 5: відрізає вимірювальну камеру від подачі тиску

```

Продовження додатку Л

```

sbit ElectroValve6=P0^2; // електророзподільник 6 закриває вимірювальну камеру від спуску в атмосферу через
регулятор тиску
sbit ElectroValve7=P0^3; // електророзподільник 7: продування
// адреси керуючих виводів схеми L293В для крокового двигуна
sbit In1=P1^1;
sbit In2=P3^3;
sbit In3=P3^2;
sbit In4=P1^0;
// модуль передачі даних на ком-порт
bit SentData=0; // 1 - ідентифікує завершення передачі блоку даних на UART та відправки даних з АЦП0 та ///
датчиків температури
bit AllowDataSend=0; // 1 - дозволяє передачу даних на COM порт, 0 не дозволяє
bit AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
extern unsigned char get[4]=0; // глобальний буфер результатів для датчика т-ри
bit ModeForDisplayPressureAndTemp=1; // ідентифікує на дисплеї, що потрібно відображати тиск і температуру
// якщо 0 то тільки т-ру
bit ShowLastAction=0; // ідентифікує на дисплеї потрібно відображати останню дію
unsigned char h=4; // відповідає за порядок читання даних з масиву get датчиків т-ри
// змінні даних основного АЦП
unsigned char myADC1H_neddedPressure=0; // змінна для верхніх значень АЦП для датчика тиску
unsigned char myADC1L_neddedPressure=0; // змінна для нижніх значень АЦП для датчика тиску
// змінні крокового двигуна
unsigned char CurrentStepForStepMotor=1;
bit myDirection; // напрям крокового двигуна;
unsigned char SpeedStepMotor=1; // коефіцієнт швидкості руху
void SetStepMotorPosition(bit Direction, unsigned int NumberStep)
{
  unsigned char i;
  for (i=0; i<NumberStep; i++)
  {
    if (AllowStepMotor==0)
    {
      In1=0;
      In2=0;
      In3=0;
      In4=0;
      return;
    }
  }
  if (Direction==1)
  {

```

Продовження додатку Л

```
switch(CurrentStepForStepMotor)
{
case(1):
{
In1=1;
In2=0;
In3=1;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=2;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(2):
{
In1=0;
In2=0;
In3=1;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=3;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(3):
{
In1=0;
In2=1;
In3=1;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=4;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(4):
{
In1=0;
In2=1;
In3=0;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=5;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
```

Продовження додатку Л

```
break;
}
case(5):
{
In1=0;
In2=1;
In3=0;
In4=1;
CurrentStepForStepMotor=6;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(6):
{
In1=0;
In2=0;
In3=0;
In4=1;
CurrentStepForStepMotor=7;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(7):
{
In1=1;
In2=0;
In3=0;
In4=1;
CurrentStepForStepMotor=8;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(8):
{
In1=1;
In2=0;
In3=0;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=1;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
```

Продовження додатку Л

```
break;
}
} }
// реверсний режим крокового двигуна
else // реверсний режим крокового двигуна
{
switch(CurrentStepForStepMotor)
{
case(1):
{
In1=1;
In2=0;
In3=0;
In4=1;
CurrentStepForStepMotor=8;
PllDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(2):
{
In1=1;
In2=0;
In3=0;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=1;
PllDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(3):
{
In1=1;
In2=0;
In3=1;
In4=0;
CurrentStepForStepMotor=2;
PllDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}
case(4):
```


Продовження додатку Л

```
{  
In1=0;  
In2=0;  
In3=1;  
In4=0;  
CurrentStepForStepMotor=3;  
PIIDly(SpeedStepMotor*48);  
break;  
}  
case(5):  
{  
In1=0;  
In2=1;  
In3=1;  
In4=0;  
CurrentStepForStepMotor=4;  
PIIDly(SpeedStepMotor*48);  
break;  
}  
case(6):  
{  
In1=0;  
In2=1;  
In3=0;  
In4=0;  
CurrentStepForStepMotor=5;  
PIIDly(SpeedStepMotor*48);  
break;  
}  
case(7):  
{  
In1=0;  
In2=1;  
In3=0;  
In4=1;  
CurrentStepForStepMotor=6;  
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
```

Продовження додатку Л

```

break;
}
case(8):
{
In1=0;
In2=0;
In3=0;
In4=1;
CurrentStepForStepMotor=7;
PIIDly(SpeedStepMotor*48);
break;
}} }
// вимкнути кроковий двигун
In1=0;
In2=0;
In3=0;
In4=0;
}
void LCD_sendstring(unsigned char x,unsigned char y, bit IsClearDisplay, unsigned int Delays, unsigned char *var) //
надіслати рядок у дисплей до 16 символів
{
if(IsClearDisplay) Pod_CLEAR_LCD();
// set cursor
if((x<1||x>2)&&(y<1||y>16))
{
x=1;
y=1;
}
if(x == 1)
POD_PER_COM_LCD_COM(0x80+y);
else
POD_PER_COM_LCD_COM(0xBF+y);
// send string
while(*var) //till string ends
POD_PER_COM_LCD_DATA(*var++); //send characters one by one
PIIDly(Delays);
}
bit Init() // функція ініціалізації приладу
{
// ініціалізація МК

```

Продовження додатку Л

```

PIIWcd(0); //встановити частоту 12.582912 мГц
PIDly(1000);
// ініціалізація термостата
ThermoResistor=0;
Cooler=0;
// ініціалізація електророзподільників
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve6=0;
ElectroValve7=0;
//Ініціалізація крокового двигуна
In1=0;
In2=0;
In3=0; In4=0;
// встановлення параметрів роботи для основного АЦП
ADC0CON=0x50; // налаштування режиму роботи основного АЦП вхідний діапазон +-20 мВ, біполярний режим,
Вхід: AIN3-AIN4, зовн. референс включений
ADC1CON=0x78; // налаштування режиму роботи додаткового АЦП вхідний діапазон 0 - 2,5 В, уніполярний
режим, вхід: AIN5-AGND, зовн. референс включений
SF=0x0D; // частота збору даних для основного та додаткового АЦП - 105,3 Гц
//ініціалізація UART
T3CON = 0x81; // швидкість передачі даних - 115200 bit/s
T3FD = 0x2D;
SCON = 0x52;
InitTemperatureSensor(); // ініціалізація датчиків температури
EA=1; // включити всі переривання
EADC=1; // включити переривання від АЦП
// розпочати вимірювання
ADCMODE = 0x33; // запустити основне АЦП у постійному режимі конверсії
TicGo(0,0,0,0); // увімкнути лічильник часу вимірювання
// ініціалізувати кроковий двигун регулятора тиску
// цю функцію слід запускати лише після запуску АЦП
//Ініціалізація ЖК дисплею
PIDly(1000); // чекаємо 10 с поки підключать блок живлення на 24 вольтя оскільки звідти береться
живлення на дисплей
Pod_Init_LCD();

```

Продовження додатку Л

```

POD_PER_COM_LCD_COM(0x28);
// кінець ініціалізації ЖК дисплею
sprintf(buf, "Init");
LCD_sendstring(1,4,1,1,buf);
sprintf(buf, "Finished");
LCD_sendstring(2,3,0,2000,buf);
return 0;
}
void AllowDataSendFunc()
{
EA=1; // дозволити всі переривання
EADC=1; // дозволити переривання від АЦПО
ADCMODE=0x33; // запустити основне АЦП в постійному режимі конверсії
h=4; // встановити лічильник даних т-ри в початкове положення
StartMeasTemp(2); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 2 - відповідає першому датчику
StartMeasTemp(3); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 3 - відповідає другому датчику якщо
// потрібно додати ще датчики то - буде 4,5 і т.д. і провести ще одну процедуру FindDevice();
sprintf(buf, "Allow");
LCD_sendstring(1,4,1,1,buf);
sprintf(buf, "data send");
LCD_sendstring(2,3,0,2000,buf); // затримка для отримання першого результату з двох датчиків з температури,
Read_Temperature(2); // прочитати т-ру з першого датчика
Read_Temperature(3); // прочитати т-ру з другого датчика
// після цього в МК спроможний відправляти на ПК поточний тиск і температуру з початку
AllowDataSend=1; // дозволити передачу даних з АЦП і датчиків температури на ком-порт по перериванню з АЦПО
}
void SetSystemAction()
{
unsigned char i=0;
if (RI) // якщо щось отримано на вході то RI встановлюється в 0
{
i=SBUF; // прочитати один символ з послідовного порту
RI=0;
switch (i)
{
case (100): // якщо отримано число 100, то одержати поточний час та дату
{
while(!RI);
buf[0]=SBUF; // отримати значення поточної години

```

Продовження додатку Л

```

RI=0;
while(!RI);
buf[1]=SBUF; // отримати значення поточної хв
RI=0;
while(!RI);
buf[2]=SBUF; // отримати значення поточної сек
RI=0;
TicGo(buf[0],buf[1],buf[2],0);
break;
}
case(99):
{
AllowDataSendFunc(); //дозволити передачу даних і рестарт для датчиків т-ри
break;
}
case(98):
{
ElectroValve4=1; // режим через компресор вимірювання тиску до протічного капіляра
RI=0;
break;
}
case(97):
{
AllowDataSend=0; //заборонити передачу даних на ком порт
sprintf(buf,"Set max scale");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
EADC = 0;
EA = 0;
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
ADCMODE = 0x37; // системне калібрування повної шкали для обох АЦП (для калібрування додаткового АЦП
слід встановити режим максимальної витрати, тобто вимірювати тиск до протічного капіляра з повністю відкритим
регулятором тиску
while (RDY0 == 0);
while (RDY1 == 0);
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
sprintf(buf,"Set max finished");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);

```

Продовження додатку Л

```

//дозволити перелачу даних на ком порт
AllowDataSendFunc();
break;
}
case(96):
{
//це можна робити в режимі продування
AllowDataSend=0;//заборонити передачу даних на ком порт
ElectroValve5=1; // закрити вхід системи
ElectroValve6=0; // відкрити вихід регулятора тиску якщо закритий
PIIDly(20000); // чекати 20 с
sprintf(buf,"Set system 0");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
EADC = 0;
EA = 0;
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
ADCMODE = 0x36; // системне калібрування нуля шкали для обох АЦП
while (RDY0 == 0);
while (RDY1 == 0);
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
sprintf(buf,"Set sys0 finished");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
AllowDataSendFunc(); //дозволити перелачу даних на ком порт
break;
}
case(95):
{
//заборонити передачу даних на ком порт
AllowDataSend=0
sprintf(buf,"Set internal 0");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
EADC = 0;
EA = 0;
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
ADCMODE = 0x34; // set int zero
while (RDY0 == 0);

```

Продовження додатку Л

```

while (RDY1 == 0);
RDY0 = 0;
RDY0 = 1;
sprintf(buf,"Set int 0 finished");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
AllowDataSendFunc(); //дозволити передачу даних на ком порт
break;
}
case(94):
{
AllowDataSend=0;//заборонити передачу даних на ком порт
sprintf(buf,"Set internal max");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
EADC = 0;
EA = 0;
RDY0 = 0;
RDY1 = 0;
ADCMODE = 0x35; // set int max
while (RDY0 == 0);
while (RDY1 == 0);
RDY0 = 0;
RDY0 = 1;
sprintf(buf,"Set int max finished");
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
AllowDataSendFunc(); //дозволити передачу даних на ком порт
break;
}
case(93):
{
while(!RI);
i=SBUF;
RI=0;
switch (i)
{
case (42):
{
ModeForDisplayPressureAndTemp=0; // відображати на екрані тиск
ShowLastAction=0;
break; }
}
}

```

Продовження додатку Л

```

case (41):
{
ModeForDisplayPressureAndTemp=1; // відобразити на екрані тиск, температуру і таймер
ShowLastAction=0;
break;
}
case (40):
{
ModeForDisplayPressureAndTemp=0; // відобразити на екрані останню дію.
ShowLastAction=1;
break;
}
default:
{
ModeForDisplayPressureAndTemp=0; // відобразити на екрані тиск
ShowLastAction=0;
break;
}
break;
}
}
case(92):
{
while(!RI);
i=SBUF;
RI=0;
sprintf(buf,"Set valve %bd",i);
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf);
if((i&0x01) != (ElectroValve1)) {ElectroValve1=(i&0x01);}
i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve2)) {ElectroValve2=(i&0x01);}
i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve3)) {ElectroValve3=(i&0x01);}
i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve4)) {ElectroValve4=(i&0x01);}
i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve5)) {ElectroValve5=(i&0x01);}
i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve6)) {ElectroValve6=(i&0x01);}
}
}

```


Продовження додатку Л

```

i=i>>1;
if((i&0x01) != (ElectroValve7)) {ElectroValve7=(i&0x01);}
break;
}
case(91):
{
Init(); // повторна ініціалізація приладу
break;
}
case(90):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
SetStepMotorPosition(1,200); // поворот крокового двигуна на зростання тиску на 200 кроків
sprintf(buf,"Set motor ");
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"higher pressure");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case(89):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
SetStepMotorPosition(0,200); // поворот крокового двигуна зменшення тиску на 200 кроків
sprintf(buf,"Set motor");
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"lower pressure");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case(88):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
myDirection=1;
SpeedStepMotor=16;
SetStepMotorPosition(1,100); // поворот крокового двигуна на 30 кроків вправо на зростання тиску
break;
}
case(87):
{

```

Продовження додатку Л

```

AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового дигуна
myDirection=0;
SpeedStepMotor=16;
SetStepMotorPosition(0,100); // поворот крокового двигуна на 30 кроків вправо зменшення тиску
break;
}
case(86):
{
ADC0CON=0x50; // налаштування режиму роботи основного АЦП: вхідний діапазон +-20 мВ, біролярний режим,
Вхід: AIN3-AIN4, зовн. референс включений
ADC1CON=0x78; // налаштування режиму роботи додаткового АЦП: вхідний діапазон 0 - 2,5 В, уніполярний
режим, Вхід: AIN3-AGND, зовн. референс включений
sprintf(buf,"ADC0CON&ADC1CON ");
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"0x50");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case(85):
{
while(!RI);
ADC0CON=SBUF; // отримати параметри основного АЦП
RI=0;
while(!RI);
ADC1CON=SBUF; // отримати параметри додаткового АЦП
RI=0;
while(!RI);
SF=SBUF; // отримати частоту отримання даних для основного і додаткового АЦП
RI=0;
break;
}
case(84):
{
SF=0xFF; // встановити частоту отримання даних для основного і додаткового АЦП: 5,35 Гц
sprintf(buf,"SF=0xFF ");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case(83):

```

Продовження додатку Л

```

{
SF=0x0D; // встановити частоту отримання даних для основного і додаткового АЦП: 105.3 Гц
sprintf(buf,"SF=0x0D ");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case(82):
{
ADCOCON=0x4F; // налаштування режиму роботи основного АЦП вхідний діапазон: 0 - 2,5 В, уніполярний режим,
//Вхід: AIN1-AIN2, зовн. референс включений
ADC1CON=0x78; // налаштування режиму роботи додаткового АЦП: вхідний діапазон 0 - 2,5 В, уніполярний
режим, Вхід: AIN3-AGND, зовн. референс включений
sprintf(buf,"ADC0CON ");
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"0x4F");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
break;
}
case (81): // якщо отримано число 81 то встановити заданий тиск
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve7=0;
while(!RI);
i=SBUF; // отримати напрям руху
RI=0;
if (i==50)
{myDirection=1;}
else
{myDirection=0;}
while(!RI);
SpeedStepMotor=SBUF; // отримати швидкість руху
RI=0;
while(!RI);
myADC1H_neddedPressure=SBUF; // отримати верхній регістр заданого тиску

```

Продовження додатку Л

```

RI=0;
while(!RI);
myADC1L_neddedPressure=SBUF; // отримати нижній регістр заданого тиску
RI=0;
sprintf(buf,"%bx.%bx.%bx.%bx",myADC1H_neddedPressure,myADC1L_neddedPressure,ADC1H,ADC1L); // на виході
рядок, який відповідає шістнадцятковому результату АЦП1
LCD_sendstring(1,1,1,4000,buf);
PIDly(2000);
if(myDirection==1)
{
AllowStepMotor=1; //збільшувати тиск
myDirection=1;
sprintf(buf,"Set motor ");
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"higher pressure");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
SetStepMotorPosition(myDirection,500); // поворот крокового двигуна зростання тиску на 500 кроків
break;
}
else
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового дигуна
myDirection=0;
sprintf(buf,"Set motor"); //зменшувати тиск
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"lower pressure");
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
SetStepMotorPosition(myDirection,500); // поворот крокового двигуна на зменшення тиску на 500 кроків
break;
}
break;
}
case(80):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового дигуна
myDirection=1;
SpeedStepMotor=6;
SetStepMotorPosition(1,300); // поворит крокового двигуна на 30 кроків вправо на зростання тиску
break;
}

```

Продовження додатку Л

```

}
case(79):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
myDirection=0;
SpeedStepMotor=6;
SetStepMotorPosition(0,300); // поворот крокового двигуна на 30 кроків вправо зменшення тиску
break;
}
case(78):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
myDirection=1;
SpeedStepMotor=1;
SetStepMotorPosition(1,500); // поворот крокового двигуна на 500 кроків вправо на зростання тиску
break;
}
case(77):
{
AllowStepMotor=1; // дозволяє роботу крокового двигуна
myDirection=0;
SpeedStepMotor=1;
SetStepMotorPosition(0,500); // поворот крокового двигуна на 500 кроків вправо зменшення тиску
break;
}
default: {}
}
}
}
void SetSystemAction_int () // переривання при появі даних з послідовного порту
{
unsigned char i=0;
i=SBUF; // прочитати один символ з послідовного порту
switch (i)
{
case(60):
{
AllowDataSend=0; // заборонити передачу даних з АЦП і датчиків температури на ком-порт по перериванню з
// АЦП0;

```

Продовження додатку Л

```
RI=0;
break;
}
case(59):
{
ThermoResistor=1;
Cooler=0;
RI=0;
break;
}
case(58):
{
Cooler=1;
ThermoResistor=0;
RI=0;
break;
}
case(57):
{
Cooler=0;
ThermoResistor=0;
RI=0;
break;
}
case(56):
{
ElectroValve1=1;           // робочий режим через компресор для першого капіляра
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve6=0;
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(55):
{
ElectroValve1=0;
```

Продовження додатку Л

```

Electro Valve2=1; // робочий режим через компресор для другого капіляра
Electro Valve3=0;
Electro Valve4=0;
Electro Valve5=0;
Electro Valve6=0;
Electro Valve7=0;
RI=0;
break;
}
case(54):
{
Electro Valve1=0;
Electro Valve2=0;
Electro Valve3=1; // робочий режим через компресор для третього капіляра
Electro Valve4=0;
Electro Valve5=0;
Electro Valve6=0;
Electro Valve7=0;
RI=0;
break;
}
case(53):
{
Electro Valve1=0;
Electro Valve2=0;
Electro Valve3=0;
Electro Valve4=1; // режим вимірювання тиску через компресор до протічного капіляра
Electro Valve5=0;
Electro Valve6=0;
Electro Valve7=0;
RI=0;
break;
}
case(52):
{
Electro Valve1=0;
Electro Valve2=0;
Electro Valve3=0;
Electro Valve4=0;

```

Продовження додатку Л

```
ElectroValve5=1; // закриття входу для вимірювання системного нуля, але додатково порібно максимально
// відкривати регулятор тиску
ElectroValve6=0;
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(51):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0; // режим повної герметичності системи спочатку повинен бути заритим регулятор 6 а //потім 5
ElectroValve6=1;
ElectroValve5=1; // закриття входу
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(50):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0; // закриття регулятора тиску
ElectroValve6=1;
ElectroValve5=0;
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(49):
{
ElectroValve1=1; // відкриття першого капіляра
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0; // закриття регулятора тиску
ElectroValve6=1;
```


Продовження додатку Л

```
ElectroValve5=0;
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(48):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=1;// відкриття другого капіляра
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve6=1; // закриття регулятора тиску
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(47):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=1;// відкриття третього капіляра
ElectroValve4=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve6=1;// закриття регулятора тиску
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(46):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=0;
ElectroValve5=1;
ElectroValve7=1; // продування
RI=0;
```

Продовження додатку Л

```
break;
}
case(45):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=0;
ElectroValve5=0;
ElectroValve7=0;
RI=0;
break;
}
case(44):
{
ElectroValve2=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=1;
ElectroValve5=1;
ElectroValve7=0;
ElectroValve1=1;
RI=0;
break;
}
case(43):
{
ElectroValve1=0;
ElectroValve3=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=1;
ElectroValve5=1;
ElectroValve7=0;
ElectroValve2=1;
RI=0;
break; }
case(42):
{
```

Продовження додатку Л

```

ElectroValve1=0;
ElectroValve2=0;
ElectroValve4=0;
ElectroValve6=1;
ElectroValve5=1;
ElectroValve7=0;
ElectroValve3=1;
RI=0;
break;
}
case(41):
{
AllowStepMotor=0;
RI=0;
break;
}
default:
{}
}
}

void ADC_int () interrupt 6 // переривання при готовності даних з основного АЦП
{
if (RDY0==1 && RDY1==1)
{
// відправити дані з АЦП і датчиків температури на COM порт
if (AllowDataSend)
{
// відправка даних з основного АЦП
while(!TI);
PI=0;
SBUF=ADC0H;
while(!TI);
PI=0;
SBUF=ADC0M;
while(!TI);
PI=0;
SBUF=ADC0L;
// відправка даних з додаткового АЦП
while(!TI);

```

Продовження додатку Л

```

TI=0;
SBUF=ADC1H;
while(!TI);
TI=0;
SBUF=ADC1L;
// відправка даних з датчиків т-ри
while(!TI);
TI=0;
SBUF=get[h];
h--;
if (h==0){h=4;}
}
RDY0=0; // дозволити перезаписати буфер основного АЦПО
RDY1=0; // дозволити перезаписати буфер додаткового АЦП1
SentData=1; // дані від МК відправлені
}
if (RI)
{
SetSystemAction_int ();
}
}
void main ()
{
Init(); // запустити ініціалізацію
StartMeasTemp(2); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 2 - відповідає першому датчику
StartMeasTemp(3); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 3 - відповідає другому датчику якщо потрібно
добавити ще датчики то - буде 4,5 і т.д., провести ще одну процедуру FindDevice();
PIIDly(750); // затримка для отримання першого результату з датчиків з температури
while (1)
{
Read_Temperature(2); // прочитати т-ру з 2 датчика
Read_Temperature(3); // прочитати т-ру з 3 датчика
StartMeasTemp(2); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 2 - відповідає першому датчику
StartMeasTemp(3); //почати вимірювання для датчика т-ри номер 3 - відповідає другому датчику якщо потрібно
добавити ще датчики то - буде 4,5 і т.д., провести ще одну процедуру FindDevice();
if (ModeForDisplayPressureAndTemp==1 && ShowLastAction==0)
{
sprintf(buf,"Temp 1 = %2.4F",CalcTemp(2)); // розрахувати т-ру з датчика 2 та записати в буфер
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf); // вивести т-ру з першого датчика 2 на дисплей
}
}
}

```

Продовження додатку Л

```

sprintf(buf,"Temp 2 = %2.4f",CalcTemp(3)); // розрахувати т-ру з датчика 3 та записати в буфер
// вивести т-ру з першого датчика 3 на дисплей
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
sprintf(buf,"Time: %02bd.%02bd.%02bd",TicHr(),TicMin(),TicSec()); // записати покази годинника в буфер дисплею
LCD_sendstring(1,1,1,1000,buf); // вивести буфер на екран
// обробка даних з АЦП і виведення їх на екран мікроконтролера для АЦП1
// тут обробка даних з АЦП і виведення їх на екран мікроконтролера
sprintf(buf,"%bx%bx%bx",ADC0H,ADC0M,ADC0L); // на виході строка, яка відповідає шістнадцятковому
результату АЦПО
// поправка результату враховуючи поправку калібровки
sprintf(buf,"Pressure:%3.1f", (float)strtoul(buf, NULL, 16)* -0.000069079);
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"%bx%bx",ADC1H,ADC1L); // на виході строка, яка відповідає шістнадцятковому результату АЦП1
// поправка результату враховуючи поправку калібровки
sprintf(buf,"DiffPress:%3.1f", (float)strtoul(buf, NULL, 16)* 0.007803);
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
//PressureDisplayWas=1;
}
if (ModeForDisplayPressureAndTemp==0 && ShowLastAction==0)
{
// тут обробка даних з АЦП і виведення їх на екран мікроконтролера
// для АЦП1
// тут обробка даних з АЦП і виведення їх на екран мікроконтролера
sprintf(buf,"%bx%bx%bx",ADC0H,ADC0M,ADC0L); // на виході строка, яка відповідає шістнадцятковому
результату АЦПО
// поправка результату враховуючи поправку калібровки
sprintf(buf,"Pressure:%3.1f", (float)strtoul(buf, NULL, 16)* -0.000069079);
LCD_sendstring(1,1,1,1,buf);
sprintf(buf,"%bx%bx",ADC1H,ADC1L); // на виході строка, яка відповідає шістнадцятковому результату АЦП1
// поправка результату враховуючи поправку калібровки
sprintf(buf,"DiffPress:%3.1f", (float)strtoul(buf, NULL, 16)* 0.007803);
LCD_sendstring(2,1,0,1000,buf);
//PressureDisplayWas=1;
}
// якщо дві вищі функції не виконуються то відображається остання дія, що була змінній buf
// перевірити чи є щось на вході те саме що на перериванні від послідовного порту але довші операції коли час не //
критичний
SetSystemAction(); }
}

```

Додаток М

Підпрограма керування давачами температури T1 і T2

```

#ifndef __intrins_H__ //підключити файл-заголовок stdio.h
#define __intrins_H__
#include <intrins.h>
#endif
#define Port0 0x80
#define IE 0xA8
sbit EA = IE^7; // адреса флагу всіх переривань
sbit DQ= Port0^7;
extern unsigned char P1IDly(int);
extern bit SentData; // флаг передачі даних на порт 1 - дані передані, 0 - дані ще не передані
extern unsigned char get[4]; // буфер результатів для датчика t-ри
// GLOBAL VARIABLES
unsigned char ROM[8]; // ROM Bit
unsigned char lastDiscrep = 0; // last discrepancy
unsigned char doneFlag = 0; // Done flag
unsigned char FoundROM[3][8]=0; // table of found ROM codes // до 5 пристроїв на лінії
unsigned char numROMs;
unsigned char dowcrc;
unsigned char code dscrc_table[] = {
0, 94,188,226, 97, 63,221,131,194,156,126, 32,163,253, 31, 65,
157,195, 33,127,252,162, 64, 30, 95, 1,227,189, 62, 96,130,220,
35,125,159,193, 66, 28,254,160,225,191, 93, 3,128,222, 60, 98,
190,224, 2, 92,223,129, 99, 61,124, 34,192,158, 29, 67,161,255,
70, 24,250,164, 39,121,155,197,132,218, 56,102,229,187, 89, 7,
219,133,103, 57,186,228, 6, 88, 25, 71,165,251,120, 38,196,154,
101, 59,217,135, 4, 90,184,230,167,249, 27, 69,198,152,122, 36,
248,166, 68, 26,153,199, 37,123, 58,100,134,216, 91, 5,231,185,
140,210, 48,110,237,179, 81, 15, 78, 16,242,172, 47,113,147,205,
17, 79,173,243,112, 46,204,146,211,141,111, 49,178,236, 14, 80,
175,241, 19, 77,206,144,114, 44,109, 51,209,143, 12, 82,176,238,
50,108,142,208, 83, 13,239,177,240,174, 76, 18,145,207, 45,115,
202,148,118, 40,171,245, 23, 73, 8, 86,180,234,105, 55,213,139,
87, 9,235,181, 54,104,138,212,149,203, 41,119,244,170, 72, 22,
233,183, 85, 11,136,214, 52,106, 43,117,151,201, 74, 20,246,168,
116, 42,200,150, 21, 75,169,247,182,232, 10, 84,215,137,107, 53};
#define FALSE 0
#define TRUE 1
//////////

```

Продовження додатку М

```

void Delay_us(unsigned int us)
{ unsigned int i;
  for (i=0;i<us;i++); }
unsigned char ResetTempSensors(void)
{
  unsigned char presence;
  DQ=0;
  SentData=0;
  while(!SentData);
  Delay_us(40);
  DQ=1;
  Delay_us(5);
  presence = DQ;
  Delay_us(38);
  return(presence);
}
unsigned char ResetTempSensorsFirst(void)
{
  unsigned char presence;
  DQ=0;
  Delay_us(40);
  DQ=1;
  Delay_us(5);
  presence = DQ;
  Delay_us(38);
  return(presence);
}
unsigned char read_bit(void)
{
  unsigned char i;
  DQ=0;
  _nop_();
  _nop_();
  DQ=1;
  for(i=0;i<3;i++);
  return (DQ);
}
void write_bit(unsigned char bitval)
{

```

Продовження додатку М

```

DQ=0;
if (bitval==1) DQ=1;
Delay_us(8);
DQ=1;
}
unsigned char read_byte(void)
{
unsigned char i;
unsigned char value=0;
for (i=0;i<8;i++)
{
if (read_bit()) value|=0x01<<i;
Delay_us(10);
}
return (value);
}
unsigned char write_byte(unsigned char bitval)
{
unsigned char i;
unsigned char temp;
for (i=0;i<8;i++)
{
temp=bitval>>i;
temp&=0x01;
write_bit(temp);
}
Delay_us(8);
return 0;}
unsigned char ow_crc( unsigned char x)
{
dowcrc = dscrc_table[dowcrc^x];
return dowcrc;
}
unsigned char Next(void)
{
unsigned char m = 1;
unsigned char n = 0;
unsigned char k = 1;
unsigned char x = 0;

```


Продовження додатку М

```

unsigned char discrepMarker = 0;
unsigned char g;
unsigned char nxt;
int flag;
nxt = FALSE;
dowrc = 0;
flag = ResetTempSensorsFirst();
if(flag||doneFlag)
{
lastDiscrep = 0;
return FALSE;
}
write_byte(0xF0);
do
// for all eight bytes
{
x = 0;
if(read_bit()==1) x = 2;
Delay_us(10);
if(read_bit()==1) x |= 1;
if(x ==3)
break;
else
{
if(x>0)
g = x>>1;
else
{
if(m<lastDiscrep)
g = ((ROM[n]&k)>0);
else // if equal to last pick 1
g = (m==lastDiscrep); // if not then pick 0
if (g==0) discrepMarker = m;
}
if(g==1)
ROM[n] |= k;
else
ROM[n] &= ~k;
write_bit(g);
m++;
}
}

```

Продовження додатку М

```

k = k << 1;
if(k == 0)
{ ow_crc(ROM[n]);
n++; k++;
}
}
}while(n < 8);
if(m < 65 || dow_crc)
lastDiscrep = 0;
else
{
lastDiscrep = discrepMarker;
doneFlag = (lastDiscrep == 0);
nxt = TRUE;
}
return nxt;
}
unsigned char First(void)
{
lastDiscrep = 0;
doneFlag = FALSE;
return Next();
}
void FindDevices(void)
{
unsigned char m;
if(!ResetTempSensorsFirst())
{
if(First())
{
numROMs = 1;
do
{
numROMs++;
for(m = 0; m < 8; m++)
{
FoundROM[numROMs][m] = ROM[m];
}
}
}
while (Next() && (numROMs < 10));

```

Продовження додатку М

```

}
}
}
unsigned char Send_MatchRom(const unsigned int Num)
{
    unsigned char i;
    if(ResetTempSensors()) return FALSE;
    write_byte(0x55);
    for(i=0;i<4;i++)
    {
        write_byte(FoundROM[Num][i]);
    }
    SentData=0;
    while(!SentData);
    for(i=4;i<8;i++)
    {
        write_byte(FoundROM[Num][i]);
    }
    return TRUE;
}
void StartMeasTemp(const unsigned char Num)
{
    Send_MatchRom(Num); // звернутися до датчика температури
    write_byte(0x44); // почати конверсію для датчика температури
}
void Read_Temperature(const unsigned char Num)
{
    unsigned char temp[1]=0;
    Send_MatchRom(Num);
    write_byte(0xBE); // Read Scratch Pad
    temp[0]=read_byte(); temp[1]=read_byte();
    switch(Num)
    {
    case(2):
        {EA=0;//заборонити переривання
        get[1]=temp[0]; get[2]=temp[1]; EA=1;
        }
    case(3):
        {EA=0;//заборонити переривання
        get[3]=temp[0]; get[4]=temp[1];

```

Продовження додатку М

```
EA=1;
}
}
}
void InitTemperatureSensor(void)
{ FindDevices();// скільки датчиків стільки процедур
FindDevices();
}
float CalcTemp (const unsigned char Num)
{unsigned char i=0; unsigned char r[1]=0; unsigned int t=0;
// обробка результатів
switch(Num)
{
case(2):
{
r[0]=get[1]; r[1]=get[2];
break;
}
case(3):
{
r[0]=get[3]; r[1]=get[4];
break; } }
for(i=0;i<8;i++)
{t=((r[0]>>i)&0x01)<<i;
}
for(i=0;i<8;i++)
{t=((r[1]>>i)&0x01)<<(i+8);
}
if (t&0x8000)// якщо від'ємне число
{t=~t+1;
return (-((float)t/16));
}
else
{return ((float)t/16);
}
}
```

Додаток Н

Підпрограма керування рідкокристалічним дисплеєм пристрою

```

name asm_myLCD
?PR?_Pod_PER_DAT_LCD?asm_myLCD segment code
?DT?_Pod_PER_DAT_LCD?asm_myLCD segment data
public ?_Pod_PER_DAT_LCD?BYTE
public _Pod_PER_DAT_LCD
rseg ?DT?_Pod_PER_DAT_LCD?asm_myLCD
?_Pod_PER_DAT_LCD?BYTE:
ADR_IND_R: DS 1
DATA_IND_R: ds 1
;LCD
COM_IND_R DATA 30h
;PORTS
PORT_IND_4 EQU P2.4
PORT_IND_5 EQU P2.5
PORT_IND_6 EQU P2.6
PORT_IND_7 EQU P2.7
RS EQU P2.2
E EQU P2.3;
rseg ?PR?_Pod_PER_DAT_LCD?asm_myLCD
_Pod_PER_DAT_LCD:
mov ADR_IND_R,R7
mov DATA_IND_R,R5
CLR RS
MOV ACC,ADR_IND_R
LCALL Pod_TETR
SETB PORT_IND_7
NOP
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
MOV ACC, DATA_IND_R
CLR C
SUBB A,#10
JNC Aa_0
MOV ACC, DATA_IND_R
ADD A,#30H

```

Продовження додатку Н

```

AJMP Aa_10
Aa_0:
MOV ACC, DATA_IND_R
Aa_10:
SETB RS
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
RET
?PR?Pod_Init_LCD?asm_myLCD segment code
public Pod_Init_LCD
?PR?Pod_CLEAR_LCD?asm_myLCD segment code
public Pod_CLEAR_LCD
rseg ?PR?Pod_Init_LCD?asm_myLCD
Pod_Init_LCD:
MOV COM_IND_R, #00101000b ; 4 bit 2 lines 5*7
LCALL POD_PER_COM_LCD ; SEND COMMAND
MOV COM_IND_R, #00000001b ; CLEAR LCD CURSOR TO FIRST PLACE
LCALL POD_PER_COM_LCD
MOV COM_IND_R, #00001100b ; LCD ON CURSOR OFF
LCALL POD_PER_COM_LCD
RET
rseg ?PR?Pod_CLEAR_LCD?asm_myLCD
Pod_CLEAR_LCD:
MOV COM_IND_R, #00000001b ; CLEAR LCD
LCALL POD_PER_COM_LCD
RET
Pod_TETR:
MOV C,ACC.4
MOV PORT_IND_4,C
MOV C,ACC.5
MOV PORT_IND_5,C
MOV C,ACC.6
MOV PORT_IND_6,C
MOV C,ACC.7
MOV PORT_IND_7,C

```

Продовження додатку Н

```

RET
Pod_IMP_E:
SETB E
NOP
CLR E
RET
POD_PER_COM_LCD:
CLR RS
MOV ACC,COM_IND_R
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
MOV ACC,1
LCALL Pod_OPROS_LCD
RET
Pod_OPROS_LCD:
DELAY;; Delays by A*100ms (default Core Clk =12MHz)
MOV R0,A ; ACC HOLDS DELAY VARIABLE
DLY0: MOV R1,#03H ; SET UP DELAY LOOP0
DLY1: MOV R2,#019H ; SET UP DELAY LOOP1
DJNZ R2,$ ; DEC R2 & JUMP HERE UNTIL R2 IS 0
DJNZ R1,DLY1 ; DEC R1 & JUMP DLY1 UNTIL R1 IS 0
DJNZ R0,DLY0 ; DEC R0 & JUMP DLY0 UNTIL R0 IS 0
RET ; RETURN FROM SUBROUTINE
POD_PER_DAT_LCD_FORBYTE:
CLR RS
MOV ACC,ADR_IND_R
LCALL Pod_TETR
SETB PORT_IND_7
NOP
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
MOV ACC, DATA_IND_R

```

Продовження додатку Н

```

CLR C
SUBB A,#10
JNC Aa1_0
MOV ACC, DATA_IND_R
ADD A,#30H
AJMP Aa1_10
Aa1_0:
MOV ACC, DATA_IND_R
Aa1_10:
SETB RS
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
RET
?PR?_Pod_IND_BYTE?asm_mylcd segment code
?DT?_Pod_IND_BYTE?asm_mylcd segment data
public ?_Pod_IND_BYTE?BYTE
public _Pod_IND_BYTE
rseg ?DT?_Pod_IND_BYTE?asm_mylcd
?_Pod_IND_BYTE?BYTE:
param1: DS 1
BYTE_R: ds 1
rseg ?PR?_Pod_IND_BYTE?asm_mylcd
_Pod_IND_BYTE:
mov BYTE_R,R5
mov ACC,R7
mov R2,ACC
MOV R1,#0
Lj_0:  MOV ACC, BYTE_R
JB ACC.7,Lj_1
MOV DATA_IND_R,#0
AJMP Lj_2
Lj_1:  MOV DATA_IND_R,#1
Lj_2:  MOV ADR_IND_R,R2
RL A
MOV BYTE_R,ACC

```


Продовження додатку Н

```

,CALL Pod_PER_DAT_LCD_forByte
NC R1 INC R2
;JNE R1,#8,Lj_0
RET
;PR?_POD_PER_COM_LCD_COM?asm_myLCD segment code
;DT?_POD_PER_COM_LCD_COM?asm_myLCD segment data
public ?_POD_PER_COM_LCD_COM?BYTE
public _POD_PER_COM_LCD_COM
rseg ?DT?_POD_PER_COM_LCD_COM?asm_myLCD
?_POD_PER_COM_LCD_COM?BYTE:
param2: DS 1
rseg ?PR?_POD_PER_COM_LCD_COM?asm_myLCD
_POD_PER_COM_LCD_COM:
CLR RS
MOV ACC,R7
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
RET
;PR?_POD_PER_COM_LCD_DATA?asm_myLCD segment code
;DT?_POD_PER_COM_LCD_DATA?asm_myLCD segment data
public ?_POD_PER_COM_LCD_DATA?BYTE
public _POD_PER_COM_LCD_DATA
rseg ?DT?_POD_PER_COM_LCD_DATA?asm_myLCD
?_POD_PER_COM_LCD_DATA?BYTE:
param3: DS 1
rseg ?PR?_POD_PER_COM_LCD_DATA?asm_myLCD
_POD_PER_COM_LCD_DATA:
SETB RS
MOV ACC,R7
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
SWAP A
LCALL Pod_TETR
LCALL Pod_IMP_E
LCALL Pod_OPROS_LCD
RET
END

```

Додаток П

Програмний код комплексу ВПН-3

```
function varargout = VPN3(varargin)
gui_Singleton = 1;gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...'gui_OpeningFcn',
@VPN3_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @VPN3_OutputFcn, ... 'gui_LayoutFcn', [], ... 'gui_Callback', []);if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1}); end
if nargin
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:}); end
function VPN3_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)
%% Ініціалізація
global s1; % глобальний об'єкт порту із заданими параметрами
% створити об'єкт послідовного порту
NamePort = 'COM4'; % назва послідовного порту
s1 = serial(NamePort, 'BaudRate', 115200, 'DataBits', 8, 'Parity', 'none', 'StopBits', 1,'FlowControl',
'none','InputBufferSize',480*4,'OutputBufferSize',512, 'Timeout',13, 'Terminator', 'LF'); % задати параметри порту
global WriteToProtocol; % флаг запису даних у файл
WriteToProtocol=0; % значить при запуску програми у файл дані не писати
global StatusReadMainADC;
StatusReadMainADC=0; % значить при запуску програми не отримувати дані з послідовного порту
global FindMaxStatus;
FindMaxStatus=0;% значить при запуску програми максимальні тиски не шукати
global PlotPressure;
PlotPressure=0; % не виводити графік тиску при запуску
global PlotForDiffPressure; PlotForDiffPressure=0; % не виводити графік витрати газу при запуску
global PlotTemp;% виводити графік температури при запуску від датчиків температури
PlotTemp=0;
global NumberCapillar; % номер вибраного капіляра
NumberCapillar=[]; % значить при запуску капіляр не вибраний
global TolAbsPmax TolRelTlife
TolAbsPmax=0.1; % абсолютна допустима похибка в мм води для максимального тиску
TolRelTlife=0.2; % відносна похибка в для часу існування поверхні
global CoeffCalibrationPressure PressureDriftCoeff % калібровочний коефіцієнт для переведення даних з АЦП
global CoeffCalibrationDiffPressure DiffPressureDriftCoeff
CoeffCalibrationPressure=-6.9079e-5;
PressureDriftCoeff=579.47;
CoeffCalibrationDiffPressure=0.007803;
DiffPressureDriftCoeff=0;
```

Продовження додатку П

```

global Step; % крок з яким вимірюється крива макс. тиску
Step=1;
global WorkMaxPressure;
WorkMaxPressure = 60; % максимальний робочий тиск
global WorkMinPressure;
WorkMinPressure = 0.5; % мінімальний робочий тиск
global MaxNumberErrorSetPressure
MaxNumberErrorSetPressure=100;
%% для пошуку максимумів
global RepeatedArrayMinMax;
RepeatedArrayMinMax=[]; % затерти попередні результати
global SystemAreReady
SystemAreReady=0; % якщо нуль, то система ще не налаштована для вимірювання
global ResistancesOfCapillarisAreDetermined
ResistancesOfCapillarisAreDetermined=0; % якщо нуль, то пневматичні опори системи ще не визначені
global StopMeasuring
StopMeasuring=0; % 1 - завершити поточне вимірювання
global Interval
Interval=9.52e-3;% інтервал часу – 9.52e-3 секунд - період отримання одного числа з основного АЦП
global FinishTime
FinishTime=300; % час від останнього максимуму при якому завершується процес вимірювання
global EquilibriumTimeSec;
EquilibriumTimeSec=300; % час досягнення рівноважного тиску 300 с
global EnoughPoints
EnoughPoints=3; % кількість точок, які входять в допустимий інтервал яких достатньо для закінчення вимірювання
для даного тиску
global EnoughPoints2
EnoughPoints2=5; % кількість точок, при якій припиняється вимірювання для заданого тиску, навіть якщо немає
трьох повторних точок у допустимому інтервалі
global resistanceCapillary1 resistanceCapillary2 resistanceCapillary3
resistanceCapillary1=0;
resistanceCapillary2=0;
resistanceCapillary3=0;
global PressureForClosedCapilaries DiffPressureForClosedCapilaries
PressureForClosedCapilaries=0; % тиск відносно атмосфери при закритих капілярах та відкритому регуляторі тиску
DiffPressureForClosedCapilaries=0; % перепад тиску через систему при закритих капілярів та відкритому регуляторі
тиску
CreateNewFilesForData();
%%
%% кінець блоку ініціалізації

```

Продовження додатку II

```

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
ylim(handles.axes2,[5 40]);
xlabel(handles.axes2,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes2,'Т-ра рідини газу в градусах Цельсія');
set(handles.axes2,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
ylim(handles.axes4,[5 40]);
xlabel(handles.axes4,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes4,'Залежність максимального тиску від часу існування поверхні');
set(handles.axes4,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
%xlabel(handles.axes1,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes1,'Тиск в мм води');
set(handles.axes1,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
xlabel(handles.axes6,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes6,'Перепад тиску газу, мм ст. води');
set(handles.axes6,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
function varargout = VPN3_OutputFcn(~, ~, handles)
varargout{1} = handles.output;
function Exit_Callback(~, ~, handles) % пункт меню вихід
ClosePortAndFiles();
delete(handles.figure1);
function ClosePortAndFiles()
global s1;
global myFileForPressure myFileForPressure1 myFileForPressure2 myFileForPressure3 myFileForDiffPressure
myFileForDiffPressure1 myFileForDiffPressure2 myFileForDiffPressure3 myFileForTemp1 myFileForTemp2
myFilePmax1 myFilePmax2 myFilePmax3
try
if strcmp(s1.Status,'open'),
fclose(s1); % спробувати закрити порт
end
catch
end
try
fclose(myFileForPressure);% закрити файл для значень тиску
fclose(myFileForPressure1);% закрити файл для значень тиску для капіляру 1
fclose(myFileForPressure2);% закрити файл для значень тиску для капіляру 2
fclose(myFileForPressure3);% закрити файл для значень тиску для капіляру 3
fclose(myFileForDiffPressure);% закрити файл для значень витрати
fclose(myFileForDiffPressure1);% закрити файл для значень витрати для капіляру 1
fclose(myFileForDiffPressure2);% закрити файл для значень витрати для капіляру 2

```

Продовження додатку П

```

fclose(myFileForDiffPressure3);% закрити файл для значень витрати для капіляру 3
fclose(myFileForTemp1);% закрити файл для значень для давача температури 1
fclose(myFileForTemp2);% закрити файл для значень для давача температури 2
fclose(myFilePmax1); % закрити файл для максимальних тисків
fclose(myFilePmax2);
fclose(myFilePmax3);

catch
end

function pushbutton1_Callback(hObject,~,handles)% кнопка – отримати дані
global StatusReadMainADC
set(hObject,'Enable','off'); % вимкнути кнопку
if get(hObject,'UserData') % по замовчуванню кнопка – отримати дані
set(hObject,'UserData',0);% 0 - відповідає режиму зчитування даних
set(hObject,'String','Триває зчитування даних.. Зупинити?');% показати напис на кнопці цей напис
pause(2);
StatusReadMainADC=1; %встановити флаг дозволу читання з основного АЦП
set(hObject,'Enable','on');
set(handles.ResultsTable,'Data',[0 0 0 0]);
set(handles.ResultPmaxString,'String','Pmin/Pmax/t lifetime/t dead/FrequencyMax');
ReadPort(handles);% читати дані з порту
else
set(hObject,'UserData',1); % 1 - відповідає режиму зупинки читання
set(hObject,'String','Отримати дані');% показати напис на кнопці Отримати дані
StatusReadMainADC=0;% зупинити читання
set(hObject,'Enable','on');
end

function ReadPort(handles)
global s1; % об'єкт послідовного порту
global TimeForLastPressure; % початок вісі часу для тиску
global TimeForLastTemp; % початок вісі часу датчиків температури
global Interval
global myFileForPressure myFileForPressure1 myFileForPressure2 myFileForPressure3 myFileForDiffPressure
myFileForDiffPressure1 myFileForDiffPressure2 myFileForDiffPressure3; % заголовок файлу куди записуються час та
тиск
global myFilePmax1 myFilePmax2 myFilePmax3; % заголовки файлів де будуть записуватися максимальні тиски
global myFileForTemp1; % змінна файлу куди записуються час та т-ра 1 датчика
global myFileForTemp2; % змінна файлу куди записуються час та т-ра 2 датчика
global Temp A Pressure DiffPressure TempSensor1 TempSensor2 % тимчасові змінні для перетворення вхідних даних
% тиску та температури
TimeForLastPressure=0;% встановити вісь часу для тиску у нульове положення

```

Продовження додатку П

```

TimeForLastTemp=0;% встановити вісь часу для датчика т-ри 1 в нульове положення
% відкрити порт і розпочати вимірювання
if strcmp(s1.Status,'open'),
fclose(s1); % якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
end
pause(2);
% встановити параметри порту
s1.BytesAvailableFcnCount = s1.InputBufferSize/2; % встановити спрацювання функції callback при наявності в
буфері при 1/2 буфера
s1.BytesAvailableFcnMode = 'byte'; % тип даних - байт можна ще Terminator
myFileForTemp1=fopen('myFileForTemp1.txt','a');
myFileForTemp2=fopen('myFileForTemp2.txt','a');
myFileForPressure=fopen('myFileForPressure.txt','a'); % режим перезапис
myFileForPressure1= fopen('myFileForPressure1.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFileForPressure2= fopen('myFileForPressure2.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFileForPressure3= fopen('myFileForPressure3.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure=fopen('myFileForDiffPressure.txt','a'); % назва файлу, режим перезапис
myFileForDiffPressure1= fopen('myFileForDiffPressure1.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure2= fopen('myFileForDiffPressure2.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure3= fopen('myFileForDiffPressure3.txt','a');% закрити файл для значень тиску
myFilePmax1=fopen('myFilePmax1.txt','a'); % назва файлів для макс. тисків, режим перезапис
myFilePmax2=fopen('myFilePmax2.txt','a');
myFilePmax3=fopen('myFilePmax3.txt','a');
% параметри для перетворення вхідних даних в значення тиску і т-ри
Temp=zeros(1,s1.InputBufferSize/2);
A=zeros(length(Temp),2);
Pressure=zeros(1,length(Temp)/6);
DiffPressure=zeros(1,length(Temp)/6);
TempSensor1=zeros(1,length(Temp)/24);
TempSensor2=zeros(1,length(Temp)/24);
if strcmp(s1.Status,'closed'),
fopen(s1); % якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
end
fwrite(s1,60); % заборонити передачу даних з МК до ПК
pause(2);
fclose(s1);
pause(2);
s1.BytesAvailableFcn = {@myserialportcallback, Interval, handles};% встановити функцію callback в разі наявності не
менше 64 доступних байтів
if strcmp(s1.Status,'closed'),

```

Продовження додатку П

```

fopen(s1); % якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
end
% дозволити передачу даних з МК до ПК і зробити рестарт вимірювання на МК, що встановить лічильник даних т-
ри в початкове положення 'h=4' на МК
fwrite(s1,99);
function myserialportcallback(~,~,Interval,handles)
global StatusReadMainADC;
global s1;
global Temp A Pressure DiffPressure TempSensor1 TempSensor2 CoeffCalibrationPressure PressureDriftCoeff
CoeffCalibrationDiffPressure DiffPressureDriftCoeff
if StatusReadMainADC==0 % якщо 0 - то зупинити читання
s1.BytesAvailableFcn="";
return;
end
% читання порту
%% тут проходить розширювання даних з МК:
% з МК надходить 3 байти результату з основного АЦП, потім 2 байти результату з додаткового АЦП, а потім
% байт результату від датчиків температури,
% по черзі (кожен результат 2 байти), дані від датчиків температури
% приходять за 4 посилки:
% в результаті отримуємо 4 масиви (порції) даних від двох АЦП та датчиків температури: тиск - від основного
АЦП (Pressure), різницю тисків для протічного капіляра від дод. АЦП (DiffPressure), від датчика т-ри1
(TempSensor1) (газу), від д-ка т-ри 2 (TempSensor2) (досліджуваної рідини)
if s1.BytesAvailable>(s1.InputBufferSize/2),
try
Temp=fread(s1,s1.InputBufferSize/2);
catch %#ok<*CTCH>
fprintf(1,'Помилка читання \n');
return;
end
A=dec2hex(Temp);
j=1;
r=1;
ReadTempSensor2=1;
ReadTempSensor1=1;
ModeTemp=0;
for i=1:6:(length(A)-5)
Pressure(j)=hex2dec(strcat(A(i,:),A(i+1,:),A(i+2,:)));
DiffPressure(j)=hex2dec(strcat(A(i+3,:),A(i+4,:)));
j=j+1;

```

Продовження додатку П

```

ModeTemp=ModeTemp+1;
if (ModeTemp<=2)
if (ReadTempSensor2)
buffer=A(i+5,:);
ReadTempSensor2=0;
else
TempSensor2(r)=hex2dec(strcat(buffer,A(i+5,:)))/16;
ReadTempSensor2=1;
end
else
if (ReadTempSensor1)
buffer=A(i+5,:);
ReadTempSensor1=0;
else
TempSensor1(r)=hex2dec(strcat(buffer,A(i+5,:)))/16;
ReadTempSensor1=1;
r=r+1;
ModeTemp=0;
end end end
Pressure=Pressure*CoeffCalibrationPressure+PressureDriftCoeff; % перемноження на коефіцієнт для переведення
даних для тиску з основного АЦП
DiffPressure=DiffPressure*CoeffCalibrationDiffPressure+DiffPressureDriftCoeff; % для переведення даних для
перепаду тиску з додаткового АЦП
%% округлення результатів до заданої точності
ProcessingMyDataForPressure(myround(Pressure,1),myround(DiffPressure,1),Interval,handles);
ProcessingMyDataForTemp(TempSensor1,TempSensor2,Interval,handles);
end
function ProcessingMyDataForPressure(Pressure,DiffPressure,Interval,handles)
global myFileForPressure myFileForPressure1 myFileForPressure2 myFileForPressure3
global myFileForDiffPressure myFileForDiffPressure1 myFileForDiffPressure2 myFileForDiffPressure3 DeegreeLoess
global NumberCapillar;
global WriteToProtocol;
global TimeForLastPressure;% останнє значення попереднього часу
global FindMaxStatus MaxNumberRepeatedArrayMinMax TolAbsPmax TolRelTliffe;
global PlotPressure PlotForDiffPressure;
global ArrayMinMax
global TempSensor2
i=1:length(Pressure);
t=TimeForLastPressure+i.*Interval;
TimeForLastPressure=t(end);% останнє значення попереднього часу

```


Продовження додатку П

```

% тут проходить пошук максимумів
if (FindMaxStatus) % шукати максимуми
FindMaxProgramOverDiffPressure(t,Pressure,DiffPressure,handles,TolAbsPmax,TolRelTlife);
myArrayMinMax=ArrayMinMax;
end
%% вивід на екран
%set(handles.CurrentTextLabel,'String',strcat('Поточний тиск, мм ст. води:
',num2str(myround(Pressure(end),1)),';Перепад тиску,мм ст. води: ',num2str(myround(DiffPressure(end),1)), ' Темп.
рідни, : ',num2str(myround(TempSensor2(end),1))))); %вивід на екран поточний середній тиск
% Temporary=(get(handles.ResultsTable,'Data'));% записати в Temporary табличні дані
global RepeatedArrayMinMax;
if ~(isempty(RepeatedArrayMinMax))
[~,MaxNumberRepeatedArrayMinMax]=max(RepeatedArrayMinMax(:,5)); % знайти максимально повторне значення
RepeatedArrayMinMax
set(handles.ResultPmaxString,'String',strcat(num2str(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,1)),',',nu
m2str(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,2)),',',num2str(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRe
peatedArrayMinMax,3)),',',num2str(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,4)),',',num2str(Repeated
ArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5))));
end
if (PlotPressure)
if ~isempty(RepeatedArrayMinMax)&& FindMaxStatus
PlotMin(1:length(t))=RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,1);
PlotMax(1:length(t))=RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,2);
SmoothingBuf=smooth(t,Pressure,DeegreeLoess,'sgolay');
myArrayMinMaxMin=myArrayMinMax(myArrayMinMax(:,1)>t(1),:); % цей рядок забирає значення мінімумів які є
за межами вісі t
myArrayMinMaxMax=myArrayMinMax(myArrayMinMax(:,4)>t(1),:); % цей рядок забирає значення максимумів які є
за межами вісі t
h = plot(handles.axes1,t,Pressure,'-g',t,SmoothingBuf,'--m',t,PlotMin,'-b',t,PlotMax,'-
r',myArrayMinMaxMin(:,1),myArrayMinMaxMin(:,2),'mx',myArrayMinMaxMax(:,4),myArrayMinMaxMax(:,5),'bx','Mar
kerSize',20);
ylim(handles.axes1,[0.8*PlotMin(1) 1.2*PlotMax(1)]);
else
h = plot(handles.axes1,t,Pressure,'-r');
ylim(handles.axes1,[0 80])
end
xlim(handles.axes1,[t(1) t(end)]);
xlabel(handles.axes1,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes1,'Тиск в мм води');
set(handles.axes1,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');

```

Продовження додатку П

```

refreshdata(h,'caller') % Evaluate y in the function workspace
drawnow;
end
if (PlotForDiffPressure)
if PlotPressure==0
myArrayMinMaxMin=myArrayMinMax(myArrayMinMax(:,1)>t(1,:)); % цей рядок забирає значення мінімумів які є
за межами вісі t
myArrayMinMaxMax=myArrayMinMax(myArrayMinMax(:,4)>t(1,:)); % цей рядок забирає значення максимумів які є
за межами вісі t
end
if ~isempty(RepeatedArrayMinMax)&& FindMaxStatus
PlotMin(1:length(t))=RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,6);
PlotMax(1:length(t))=RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,7);
SmoothingBufDif=smooth(t,DiffPressure,DeegreeLoess,'sgolay');
h1= plot(handles.axes6,t,DiffPressure,'-b',t,SmoothingBufDif,'--m',t,PlotMin,'-b',t,PlotMax,'-
r',myArrayMinMaxMin(:,1),myArrayMinMaxMin(:,3),'mx',myArrayMinMaxMax(:,4),myArrayMinMaxMax(:,6),'bx','Mar
kerSize',20);
if 0.7*PlotMin(1) < 1.3*PlotMax(1)
ylim(handles.axes6,[0.7*PlotMin(1) 1.3*PlotMax(1)]);
end
else
h1 = plot(handles.axes6,t,DiffPressure,'-b');
ylim(handles.axes6,[0 250])
end
xlim(handles.axes6,[t(1) t(end)]);
xlabel(handles.axes6,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes6,'Витрата газу, мм ст. води/секунду');
set(handles.axes6,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
refreshdata(h1,'caller')
drawnow;
end
if (WriteToProtocol) % по замовчуванню WriteToProtocol=0
if ~isempty(NumberCapillar)
switch NumberCapillar
case 1
fprintf(myFileForPressure1, '%f %f \n', [t;Pressure]);
fprintf(myFileForDiffPressure1, '%f %f \n', [t;DiffPressure]);
case 2
fprintf(myFileForPressure2, '%f %f \n', [t;Pressure]);
fprintf(myFileForDiffPressure2, '%f %f \n', [t;DiffPressure]);

```

Продовження додатку П

```

case 3
fprintf(myFileForPressure3, '%f %f \n', [t;Pressure]);
fprintf(myFileForDiffPressure3, '%f %f \n', [t;DiffPressure]);
end
else
fprintf(myFileForPressure, '%f %f \n', [t;Pressure]);
fprintf(myFileForDiffPressure, '%f %f \n', [t;DiffPressure]);
end end
function ProcessingMyDataForTemp(y,z,Interval,handles)
global TimeForLastTemp;% останнє значення попереднього часу
global WriteToProtocol;
global myFileForTemp1 myFileForTemp2;
global PlotTemp;
t=zeros(1,length(y)); % попереднє створення масиву результатів
for i=1:length(y)
t(i)=TimeForLastTemp+i*Interval*4;
end
if (WriteToProtocol) % по замовчуванню WriteToProtocol=0
fprintf(myFileForTemp1, '%f %f \n', [t;y]);
fprintf(myFileForTemp2, '%f %f \n', [t;z]);
end
TimeForLastTemp=t(end);% останнє значення попереднього часу
%%%%%%%%%
if (PlotTemp)
h = plot(handles.axes2,t,y,'-ro',t,z,'-b');
xlim(handles.axes2,[t(1) t(end)]);
ylim(handles.axes2,[5 40]);
xlabel(handles.axes2,'Інтервал часу в секундах');
ylabel(handles.axes2,'Т-ра газу в градусах Цельсія');
set(handles.axes2,'XGrid','on','YGrid','on','XMinorGrid','on','YMinorGrid','on');
legend(handles.axes2,'Рідина','Газ','Location','Best');
refreshdata(h,'caller') % Evaluate y in the function workspace
drawnow;
end
function pushbutton5_Callback(~, ~, ~)
global NumberCapillar DminPmax
NumberCapillar=1; % встановити перший капіляр короткий і вузький
% встановлюється необхідний мінімальний перепад тиску для кожного із капілярів
DminPmax=0.1;
SendCommandToDevice(56);% встановити перший капіляр

```

Продовження додатку П

```

function pushbutton6_Callback(~,~,~)
global NumberCapillar DminPmax;
% встановлюється необхідний мінімальний перепад тиску для кожного із капілярів
NumberCapillar=2;
DminPmax=0.1;
% вимірювання капіляр вузький і довгий
SendCommandToDevice(55); % встановити другий капіляр
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global NumberCapillar DminPmax % встановлюється необхідний мінімальний перепад тиску для кожного із
капілярів
NumberCapillar=3;
DminPmax=0.1;
% вимірювання капіляр широкий і довгий
SendCommandToDevice(54); % встановити третій капіляр
function pushbutton8_Callback(hObject,eventdata,handles)
global NumberCapillar;
NumberCapillar=[];
SendCommandToDevice(46);% продування
function SetSystem0_Callback(hObject,eventdata,handles)
global NumberCapillar;
NumberCapillar=[];
SendCommandToDevice(52);
PauseForStabilizationPressure();
SendCommandToDevice(96);
function SendCommandToDevice(NumCommand)
global s1;
try
if strcmp(s1.Status,'closed'),
fopen(s1); % якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами і затерти дані з вхідного буферу
end
fwrite(s1,NumCommand);
catch errorldg(['Помилка передачі команди приладу'],...
['Помилка']);
return;
end
function ButtonWriteToFile_Callback(hObject, eventdata, handles)% кнопка писати у файл
global WriteToProtocol;
if (~WriteToProtocol)% по замовчуванню кнопка—не писати у файл
WriteToProtocol=1;
set(hObject,'UserData',0);% 0 - відповідає режиму писання у файл, 1 незапису; по замовчуванню 1

```

Продовження додатку П

```

set(hObject,'String','Пропустити дані?');% показати напис на кнопці зупинити
else
WriteToProtocol=0;
set(hObject,'UserData',1); % 1 - відповідає режиму незапису у файл
set(hObject,'String','Іде вивід даних....Писати їх у файл?');% показати напис на кнопці
end
function FindMaxButton_Callback(hObject,~, handles)
global FindMaxStatus; % 1 - шукати максимуми по замовчуванню 0, тобто не шукати
global TYmin NofoundMax NofoundMin ArrayMinMax RepeatedArrayMinMax IndexesMax NumberCapillar
myFilePmax1 myFilePmax2 myFilePmax3 NumberRequiredMinMax MaxNumberRepeatedArrayMinMax
NumberRequiredMinMaxForRecord StartTimeFromSearchToMin TimeFromLastMinimum DeegreeLoess
global PressureForClosedCapillaries DiffPressureForClosedCapillaries
NumberRequiredMinMax=3; % к-сть мінімально необхідних пар min-max
NumberRequiredMinMaxForRecord=3;
if isempty(NumberCapillar)
set(hObject,'String','Виберіть капіляр');
return;
end
if (~FindMaxStatus)% по замовчуванню кнопка=не шукати максимуми
% тимчасові змінні для визначення моменту МТБ
TYmin=[0 1000 0 0 0 0 0]; % тимчасова змінна мінімуму:0 - час 1000 - тиск
NofoundMax=0; % флаг знайдення максимуму, якщо 1 то знайдений
% тут 1 - спочатку шукаємо мінімум
NofoundMin=1; % флаг знайдення мінімуму, якщо 1 то не знайдений
ArrayMinMax=[]; % тимчасовий масив точок мінімумів і максимумів
RepeatedArrayMinMax=[]; % тимчасовий масив для усереднення максимумів
MaxNumberRepeatedArrayMinMax=0;
IndexesMax=[]; % тимчасовий масив індексів елементів максимумів
TimeFromLastMinimum=0;
DeegreeLoess= 10;
set(handles.TimeMaxString,'String',num2str(0));
set(hObject,'UserData',0);
set(hObject,'String',strcat('Іде пошук максимумів:капіляр',num2str(NumberCapillar) ,'зупинити?....'));% показати
напис на кнопці зупинити
set(handles.ResultsTable,'Data',[0 0 0 0 0]);
set(handles.ResultPmaxString,'String','Pmin/Pmax/t lifetime/t dead/FrequencyMax');
FindMaxStatus=1;
TimeFromLastMinimum=0;
StartTimeFromSearchToMin=tic; % запуск часу відліку пошуку мінімуму тиску
else

```

Продовження додатку П

```

FindMaxStatus=0;
if MaxNumberRepeatedArrayMinMax~=0
for i=1:length(RepeatedArrayMinMax(:,1))
if ((RepeatedArrayMinMax(i,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord) || (RepeatedArrayMinMax(i,5) >= 1 &&
RepeatedArrayMinMax(i,3) >= 20))
% RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,1);% середнє значення мінімуму тиску
% RepeatedArrayMinMax(lich,2); % середнє значення максимуму тиску
% RepeatedArrayMinMax(lich,3); % середнє значення t_lifetime
% RepeatedArrayMinMax(lich,4); % середнє значення t_dead
% RepeatedArrayMinMax(lich,5); % % кількість повторень в межах встановленого допуску
% RepeatedArrayMinMax(lich,6); % середнє значення перепаду тиску в момент мінімуму тиску
% RepeatedArrayMinMax(lich,7); % середнє значення перепаду тиску в момент
% максимуму тиску
% PressureForClosedCapillaries DiffPressureForClosedCapillaries - ці тиски
% повинні бути отримані у ф-ї встановлення заданого тиску
switch NumberCapillar
case 1
fprintf(myFilePmax1, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f\n',
[RepeatedArrayMinMax(i,1);RepeatedArrayMinMax(i,2);RepeatedArrayMinMax(i,3);RepeatedArrayMinMax(i,4);Repeat
edArrayMinMax(i,5);RepeatedArrayMinMax(i,6);RepeatedArrayMinMax(i,7);PressureForClosedCapillaries;DiffPressureF
orClosedCapillaries]);
CalcDST(handles); % перерахувати і відобразити ДПН
case 2
fprintf(myFilePmax2, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f\n',
[RepeatedArrayMinMax(i,1);RepeatedArrayMinMax(i,2);RepeatedArrayMinMax(i,3);RepeatedArrayMinMax(i,4);Repeat
edArrayMinMax(i,5);RepeatedArrayMinMax(i,6);RepeatedArrayMinMax(i,7);PressureForClosedCapillaries;DiffPressureF
orClosedCapillaries]);
CalcDST(handles); % перерахувати і відобразити ДПН
case 3
fprintf(myFilePmax3, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f\n',
[RepeatedArrayMinMax(i,1);RepeatedArrayMinMax(i,2);RepeatedArrayMinMax(i,3);RepeatedArrayMinMax(i,4);Repeat
edArrayMinMax(i,5);RepeatedArrayMinMax(i,6);RepeatedArrayMinMax(i,7);PressureForClosedCapillaries;DiffPressureF
orClosedCapillaries]);
CalcDST(handles); % перерахувати і відобразити ДПН
end end end
set(hObject,'UserData',1);
set(hObject,'String','Шукати максимуми?');% показати напис на кнопці шукати максимуми
end
function SetGermeticVolume_Callback(hObject, eventdata, handles)
global NumberCapillar;

```

Продовження додатку П

```

NumberCapillar=[];
SendCommandToDevice(51);
function CalcDST(handles)
global PlotTemp PlotPressure FinishTime
global resistanceCapillary1 resistanceCapillary2 resistanceCapillary3 EquilibriumTimeSec
global IsEquilibriumForCapillary1 IsEquilibriumForCapillary2 IsEquilibriumForCapillary3
IsEquilibriumForCapillary1=0;
IsEquilibriumForCapillary2=0;
IsEquilibriumForCapillary3=0;
PlotTemp=0; % заборонити вивід значень температури від датчика 1
g=9.8;% прискорення вільного падіння
dh=4.155e-3;% різниця по висоті між першим і другим капіляром
r1=3.193676578699388e-004; % радіус 1 і 2 капілярів в м
r2=4.959711675854401e-004;
Pmax1=load('myFilePmax1.txt'); % завантажити масив даних з файлу для обробки
if ~isempty(Pmax1)
Pmax1=sortrows(Pmax1,-2);
% Pmax1(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску
% тут будемо вираховувати величину пневматичного (динамічного) тиску
Pmax1(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax1(:,7)*9.8,Pmax1(:,8)*9.8,Pmax1(:,9)*9.8,Pmax1(:,2)*9.8,resistance
Capillary1);
%% знаходження рівноважного Pmax шляхом екстраполяції вимірних даних як
%% функції f(1/sqrt(x))
if length(Pmax1(:,2))>=5 && max(Pmax1(:,1))>500
EquilibriumPmax1_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax1(1:end,3)),Pmax1(1:end,2),1./sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
h1=plot(handles.axes2,[Pmax1(1:end,3); EquilibriumTimeSec],[Pmax1(1:end,2)/9.8; EquilibriumPmax1_Extrap/9.8], '--
bs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10);
else
h1=plot(handles.axes2,Pmax1(1:end,3),Pmax1(1:end,2)/9.8,'--
bs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10);
end
legend(handles.axes2,'Pmax1 VStlifetime','Location','Best');
grid(handles.axes2,'on');
grid(handles.axes2,'minor');
xlim(handles.axes2,'auto');
ylim(handles.axes2,'auto');
end
% завантажити масив даних з файлу для обробки
Pmax2=load('myFilePmax2.txt');
if ~isempty(Pmax2)

```

Продовження додатку П

```

Pmax2=sortrows(Pmax2,-2);
% Pmax2(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску
%%%%%%%%%%%%
% тут будемо вираховувати величину пневматичного (динамічного) тиску
Pmax2(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax2(:,7)*9.8,Pmax2(:,8)*9.8,Pmax2(:,9)*9.8,Pmax2(:,2)*9.8,resistance
Capillary2);
%% знаходження рівноважного Pmax шляхом екстраполяції вимірянних даних як
if ~isempty(Pmax1)
hold(handles.axes2,'on');
end
if length(Pmax2(:,2))>=5 && max(Pmax2(:,1))>500
EquilibriumPmax2_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax2(1:end,3)),Pmax2(1:end,2),1/sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
h2=plot(handles.axes2,[Pmax2(1:end,3); EquilibriumTimeSec],[Pmax2(1:end,2)/9.8; EquilibriumPmax2_Extrap/9.8],'-
gs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','m','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',10);
else
h2=plot(handles.axes2,Pmax2(1:end,3),Pmax2(1:end,2)/9.8,'--
gs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','m','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',10);
end
if ~isempty(Pmax1)
legend(handles.axes2,'Pmax1VStlifetime','Pmax2VStlifetime','Location','Best');
xlim(handles.axes2,'auto');
ylim(handles.axes2,'auto');
else
legend(handles.axes2,'Pmax2VStlifetime','Location','Best');
grid(handles.axes2,'on');
grid(handles.axes2,'minor');
xlim(handles.axes2,'auto');
ylim(handles.axes2,'auto');
end
refreshdata(h2,'caller')
drawnow;
hold(handles.axes2,'off');
end
% завантажити масив даних з файлу для капіляру 3
Pmax3=load('myFilePmax3.txt');
if ~isempty(Pmax3)
Pmax3=sortrows(Pmax3,-2);
% Pmax3(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску
Pmax3(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax3(:,7)*9.8,Pmax3(:,8)*9.8,Pmax3(:,9)*9.8,Pmax3(:,2)*9.8,resistance
Capillary3);

```


Продовження додатку П

```

%%% знаходження рівноважного Pmax
if length(Pmax3(:,2))>=5 && max(Pmax3(:,1))>500
EquilibriumPmax3_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax3(1:end,3)),Pmax3(1:end,2),1/sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
h3=plot(handles.axes4,[Pmax3(1:end,3); EquilibriumTimeSec],[Pmax3(1:end,2)/9.8; EquilibriumPmax3_Extrap/9.8],'--
rs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10);
else
h3=plot(handles.axes4,Pmax3(1:end,3),Pmax3(1:end,2)/9.8,'--
rs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
end
legend(handles.axes4,'Pmax3VStlifetime','Location','Best');
grid(handles.axes4,'on');
grid(handles.axes4,'minor');
xlim(handles.axes4,'auto');
ylim(handles.axes4,'auto');
end
function
CorrectedPressure=TakeAccountOfDymamicPressure(DiffPressureInmomentMPB,myPressureForClosedCapillaries,
myDiffPressureForClosedCapillaries,MeasuredPressure,MyresistanceCapillary)
% тут будемо вираховувати величину пневматичного (динамічного) тиску
% Pmax3(:,7) % середнє значення перепаду тиску через систему в момент максимуму тиску
MyresistanceFlowCapillary=(8*15.11e-6*12.17e-3)/(pi*(0.18e-3)^4);
Q1=DiffPressureInmomentMPB./MyresistanceFlowCapillary; % витрата Q1 через систему в момент МТБ
resistanceCapillaryRegulatorOfPressure=myPressureForClosedCapillaries./(myDiffPressureForClosedCapillaries./Myresista
nceFlowCapillary);
Q3=MeasuredPressure./resistanceCapillaryRegulatorOfPressure;
Q2=Q1-Q3;
P_dunamic=Q2.*MyresistanceCapillary;
CorrectedPressure=MeasuredPressure-P_dunamic;
function CheckAirSystem_Callback(hObject, eventdata, handles)% перевірити пневматичну систему приладу
%%% визначення опорів кожної ланки системи R4 R5 R6
global resistanceCapillary1 resistanceCapillary2 resistanceCapillary3
global SystemAreReady ResistancesOfCapillarisAreDetermined FindMaxStatus Pressure DiffPressure PlotPressure
if PlotPressure~=1
PlotPressure=1;
end
PlotPressureAndTempMenuItem_Callback(handles.PlotPressureAndTempMenuItem, eventdata, handles)% заборонити
вивід графіків для підвищення швидкодії
% якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимум
if FindMaxStatus==1
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);

```

Продовження додатку П

```

end
MyresistanceFlowCapillary=(8*15.11e-6*12.17e-3)/(pi*(0.18e-3)^4);
if PlotPressure~=1
PlotPressure=1;
end
PlotPressureAndTempMenuItem_Callback(handles.PlotPressureAndTempMenuItem, eventdata, handles)% заборонити
вивід графіків для підвищення швидкодії
% вимкнути усі розподільники тобто встановити максимальний робочий тиск у камері
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимум
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
if SystemAreReady~=1
questdlg(['Система ще не налаштована, налаштуйте її...'],...
['Налаштування системи'],...
'Так','Так');
return;
end
if exist('AirResistanceCapillaries.txt','file')
selection = questdlg(['Здійснити завантаження минулих визначених пневматичних опорів системи?'],...
['Калібрування по повітрю'],...'Так','Ні','Так');
if strcmp(selection,'Так')
AirResistanceCapillaries=load('AirResistanceCapillaries.txt'); % завантажити масив даних з файлу для обробки
if ~isempty(AirResistanceCapillaries)
resistanceCapillary1=AirResistanceCapillaries(1,1);
resistanceCapillary2=AirResistanceCapillaries(1,2);
resistanceCapillary3=AirResistanceCapillaries(1,3);
questdlg(['Величини пневматичних опорів капілярів завантажено успішно '],... ['Завантаження пневматичних опорів
ланок системи' 'Так','Так');
ResistancesOfCapillarisAreDetermined=1;
return;
end end end
questdlg(['Для вимірювання пневматичних опорів становить вихід капілярів у навколишнє середовище'],...
['Визначення пневматичних опорів ланок системи'], 'Так','Так');
selection = questdlg(['Здійснити продування системи?'],...
['Продування системи'],'Так','Ні','Ні');
if strcmp(selection,'Так')
pushbutton8_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles);
pause(30);
end
SetDisableAllValve();

```

Продовження додатку П

```

pause(2);
% визначення опору для першого капіляра
SendCommandToDevice(49);
pause(10);
MeanTempPressure=mean(Pressure);
MeanTempDiffPressure=mean(DiffPressure);
k=1;
while (k<10)
k=k+1;
pause(2);
MeanTempPressure=mean([MeanTempPressure mean(Pressure)]);
MeanTempDiffPressure=mean([MeanTempDiffPressure mean(DiffPressure)]);
end
if mean(MeanTempPressure)>5
errordlg(['Вихід першого капіляра не встановлений у навколишнє середовище, або система не налаштована'],...
['Помилка']);
return;
end
resistanceCapillary1=MeanTempPressure* 1e-3/(MeanTempDiffPressure* 1e-3/MyresistanceFlowCapillary);
helpdlg(['Падіння тиску на першому капілярі становить, мм вод.ст.: ' num2str(myround(MeanTempPressure,1)) '];
'Номінальне значення становить 2,65 мм вод ст.' ]);
% визначення опору для другого капіляра
SetDisableAllValve();
pause(2);
SendCommandToDevice(48);
pause(20);
MeanTempPressure=mean(Pressure);
MeanTempDiffPressure=mean(DiffPressure);
k=1;
while (k<10)
k=k+1;
pause(2);
MeanTempPressure=mean([MeanTempPressure mean(Pressure)]);
MeanTempDiffPressure=mean([MeanTempDiffPressure mean(DiffPressure)]);
end
if mean(MeanTempPressure)>5
errordlg(['Вихід другого капіляра не встановлений у навколишнє середовище, або система не налаштована'],...
['Помилка']);
return;
end

```

Продовження додатку II

```

resistanceCapillary2=MeanTempPressure*1e-3/(MeanTempDiffPressure*1e-3/MyresistanceFlowCapillary);
helpdlg(['Падіння тиску на другому капілярі становить, мм вод.ст.: ' num2str(myround(MeanTempPressure,1)) ');
'Номінальне значення становить 2,43 мм вод ст.']);
% визначення опору для третього капіляра
SetDisableAllValve();
pause(2);
SendCommandToDevice(47);
pause(20);
MeanTempPressure=mean(Pressure);
MeanTempDiffPressure=mean(DiffPressure);
k=1;
while (k<10)
k=k+1;
pause(2);
MeanTempPressure=mean([MeanTempPressure mean(Pressure)]);
MeanTempDiffPressure=mean([MeanTempDiffPressure mean(DiffPressure)]);
end
if mean(MeanTempPressure)>5
errordlg(['Вихід другого капіляра не встановлений у навколишнє середовище, або система не налаштована'],...
['Помилка']);
return;
end
resistanceCapillary3=MeanTempPressure*1e-3/(MeanTempDiffPressure*1e-3/MyresistanceFlowCapillary);
helpdlg(['Падіння тиску на першому капілярі становить, мм вод.ст.: ' num2str(myround(MeanTempPressure,1)) ');
'Номінальне значення становить 1,04 мм вод ст.']);
if resistanceCapillary1~=0 && resistanceCapillary2~=0 && resistanceCapillary3~=0
fidID = fopen('AirResistanceCapillaries.txt','w');
fprintf(fidID, '%f %f %f \n ', resistanceCapillary1,resistanceCapillary2,resistanceCapillary3);
fclose(fidID);
ResistancesOfCapillarisAreDetermined=1;
questdlg(['Калібрування системи по повітрю завершено успішно'], ['Калібрування системи по повітрю '],
'Так','Так');
else
errordlg(['Калібрування системи по повітрю проведено невдало'], ['Помилка']);
end
SetDisableAllValve (); % після калібрування вимкнути всі розподільники
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
Exit_Callback(hObject, eventdata, handles);
function Result=myround(Data,NumberValueAfterPoint)

```

Продовження додатку II

```

NumberValueAfterPoint=NumberValueAfterPoint+1;
Result=floor(Data)+(round(abs(Data-floor(Data)).*10^NumberValueAfterPoint))./10^NumberValueAfterPoint;
function pushbutton18_Callback(hObject, eventdata, handles)% експериментальна кнопка
StartNewMeasure(handles,eventdata);
function SendCurrentTimeAndDataToDevice_Callback(hObject, eventdata, handles)
global s1;
if strcmp(s1.Status,'closed'),% якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
fopen(s1);
end
temp=clock;
% пишемо в порт
fwrite(s1,100);% передати в МК значення поточного часу
pause (4); % пауза для готовності МК до прийняття даних
fwrite(s1,temp(4));
fwrite(s1,temp(5));
fwrite(s1,round(temp(6)));
function ModeDisplayOnlyPressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
global s1;
if strcmp(s1.Status,'closed'),% якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
fopen(s1); end
% пишемо в порт
fwrite(s1,93);
pause (4); % пауза для готовності МК до прийняття даних
fwrite(s1,42);
function ModeDisplayPressureTempTime_Callback(hObject, eventdata, handles)
global s1;
if strcmp(s1.Status,'closed'),% якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
fopen(s1);
end
% пишемо в порт
fwrite(s1,93);
pause (4); % пауза для готовності МК до прийняття даних
fwrite(s1,41);
function ModeDisplayLastAction_Callback(hObject, eventdata, handles)
global s1;
if strcmp(s1.Status,'closed'),% якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами
fopen(s1);
end
% пишемо в порт
fwrite(s1,93);

```

Продовження додатку П

```

pause(4); % пауза для готовності МК до прийняття даних
fwrite(s1,40);
function SetInitEmbeddedSystem_Callback(hObject, eventdata, handles)
SendCommandToDevice(91);
function SetPositionMotor(NumbersSteps,CoeffMultiplyNumbersSteps, DirectionMotor, CoeffMultiplySpeedMotor )
global s1;
try
if strcmp(s1.Status,'closed'),
fopen(s1); % якщо порт закритий, то відкрити порт із заданими параметрами і затерти дані з вхідного буферу
end
pause(4);
fwrite(s1,98);
pause(4);
fwrite(s1,NumbersSteps);% кількість кроків
pause(4);
fwrite(s1,CoeffMultiplyNumbersSteps);% множник кількості кроків крокового двигуна
pause(4);
fwrite(s1,DirectionMotor);% напрям руху крокового двигуна: 0 - в бік збільшення тиску; 1– в бік зменшення тиску
pause(4);
fwrite(s1,CoeffMultiplySpeedMotor);% множник швидкості крокового двигуна на 64 мс
catch errorldg(['Помилка передачі команди приладу'],...
['Помилка']);
return;
end
function SetDisableAllValve ()
global NumberCapillar;
NumberCapillar=[];
SendCommandToDevice(45);% вимкнути усі розподільники
function [j]=SetPressureinSystem(handles,eventdata,RequiredPressure,myStep)
global Pressure DiffPressure WorkMaxPressure WorkMinPressure FindMaxStatus PlotPressure
global PressureForClosedCapillaries DiffPressureForClosedCapillaries StopMeasuring
myPauseForStepMotor=30;
ResidualSetPressure=0.3;
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимум
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(1);
SetDisableAllValve();
pause(4);

```

Продовження додатку П

```

CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <WorkMinPressure
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
SetDisableAllValve();
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
end
if myStep~=0 % якщо крок не рівний 0, то потрібний тиск вираховується як різниця між поточним тиском і кроком
RequiredPressure=CurrentP+myStep;
end
helpdlg(['Поточний тиск в ' num2str(myround(CurrentP,1)) ' мм водяного стовпця ' ' Заданий тиск ='
num2str(myround(RequiredPressure,1)) ' Крок=' num2str(myStep)], 'Встановлення заданого тиску');
if ((RequiredPressure>90) || (RequiredPressure<WorkMinPressure))
SendCommandToDevice(41);
if CurrentP >90 || CurrentP <WorkMinPressure
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
SetDisableAllValve();
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
end
end
if CurrentP < RequiredPressure
MychangePressureDirection=50;
%% встановити допуск по встановленню тиску
if RequiredPressure-CurrentP >=3
ResidualSetPressure=1;
SendCommandToDevice(78);
elseif RequiredPressure-CurrentP >=1.5 && RequiredPressure-CurrentP < 3
ResidualSetPressure=0.5;
SendCommandToDevice(80);
elseif RequiredPressure-CurrentP >=0.75 && RequiredPressure-CurrentP < 1.5
ResidualSetPressure=0.3;
SendCommandToDevice(80);
elseif RequiredPressure-CurrentP >=0.3 && RequiredPressure-CurrentP < 0.75
ResidualSetPressure=0.2;
SendCommandToDevice(88);

```

Продовження додатку П

```

elseif RequiredPressure-CurrentP > 0.1 && RequiredPressure-CurrentP < 0.3
ResidualSetPressure=0.1;
SendCommandToDevice(88);
elseif abs(RequiredPressure-CurrentP) <=0.1
pause(5);
PressureForClosedCapillaries=mean(Pressure);
DiffPressureForClosedCapillaries=mean(DiffPressure);
helpdlg(['Тиск в ' num2str(myround(PressureForClosedCapillaries,1)) ' мм водяного стовпця встановлений' ' Заданий
тиск =' num2str(myround(RequiredPressure,1)) ' Крок=' num2str(myStep)], 'Встановлення заданого тиску');
return;
end
else
MychangePressureDirection=25;
if CurrentP-RequiredPressure >3
ResidualSetPressure=1;
SendCommandToDevice(77);
elseif CurrentP-RequiredPressure >=1.5 && CurrentP-RequiredPressure < 3 % якщо такий крок, то допустима похибка
по тиску буде наступна
ResidualSetPressure=0.5;
SendCommandToDevice(79);
elseif CurrentP-RequiredPressure >=0.75 && CurrentP-RequiredPressure < 1.5
ResidualSetPressure=0.3;
SendCommandToDevice(79);
elseif CurrentP-RequiredPressure >= 0.3 && CurrentP-RequiredPressure < 0.75
ResidualSetPressure=0.2;
SendCommandToDevice(87);
elseif CurrentP-RequiredPressure > 0.1 && CurrentP-RequiredPressure < 0.3
ResidualSetPressure=0.1;
SendCommandToDevice(87);
elseif abs(RequiredPressure-CurrentP) <=0.1
pause(5);
PressureForClosedCapillaries=mean(Pressure);
DiffPressureForClosedCapillaries=mean(DiffPressure);
helpdlg(['Тиск в ' num2str(myround(PressureForClosedCapillaries,1)) ' мм водяного стовпця встановлений' ' Заданий
тиск =' num2str(myround(RequiredPressure,1)) ' Крок=' num2str(myStep)], 'Встановлення заданого тиску');
return;
end
end
if RequiredPressure==WorkMaxPressure
ResidualSetPressure=3;

```


Продовження додатку П

```

end
i=0;
while ((i<myPauseForStepMotor)&& StopMeasuring==0)
for muc=1:40
pause(1);
CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
end
if ((CurrentP>=(RequiredPressure-ResidualSetPressure))&&(CurrentP<=(RequiredPressure+ResidualSetPressure)))
SendCommandToDevice(41);
% helpdlg('Дострокова зупинка крокового двигуна', 'Зупинка двигуна');
pause(4);
CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(hObject,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(hObject,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
end
if ((CurrentP <(RequiredPressure-ResidualSetPressure))||(CurrentP >(RequiredPressure+ResidualSetPressure)))
SendCommandToDevice(41);
% helpdlg('Повторний запуск крокового двигуна', 'Запуск двигуна');
SetPressureinSystem(handles,eventdata,RequiredPressure,0);
return;
end
SendCommandToDevice(41);
pause(2);
SendCommandToDevice(41);
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних

```

Продовження додатку II

```

pause(5);
end
PressureForClosedCapillaries=mean(Pressure);
DiffPressureForClosedCapillaries=mean(DiffPressure);
helpdlg(['Тиск в ' num2str(myround(PressureForClosedCapillaries,1)) ' мм водяного стовпця встановлений' ' Заданий
тиск =' num2str(myround(RequiredPressure,1)) ' Крок=' num2str(myStep)], 'Встановлення заданого тиску');
return;
end
if ((MychangePressureDirection==50) && (CurrentP > (RequiredPressure+ResidualSetPressure))) ||
((MychangePressureDirection==25) && (CurrentP < (RequiredPressure-ResidualSetPressure)))
SendCommandToDevice(41);
break;
end end
i=i+1;
CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
end
if ((CurrentP <(RequiredPressure-ResidualSetPressure))||(CurrentP >(RequiredPressure+ResidualSetPressure)))
SendCommandToDevice(41);
% helpdlg('Повторний запуск крокового двигуна', 'Запуск двигуна');
SetPressureinSystem(handles,eventdata,RequiredPressure,0);
return;
end end
if i>=myPauseForStepMotor
helpdlg('Дострокова зупинка крокового двигуна через час', 'Зупинка двигуна');
end
SendCommandToDevice(41);
pause(2);
SendCommandToDevice(41);
pause(5);
CurrentP=Pressure(end);
if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних

```

Продовження додатку П

```

pause(5);
end
PressureForClosedCapillaries=mean(Pressure);
DiffPressureForClosedCapillaries=mean(DiffPressure);
helpdlg(['Тиск в ' num2str(myround(PressureForClosedCapillaries,1)) ' мм водяного стовпця встановлений' ' Заданий
тиск =' num2str(myround(RequiredPressure,1)) ' Крок=' num2str(myStep)],'Встановлення заданого тиску');
return;
function PauseForStabilizationPressure()
pause(7);
function StartSetSystem(handles,eventdata)
global SystemAreReady PlotPressure
if PlotPressure~=1
PlotPressure=1;
end
PlotPressureAndTempMenuItem_Callback(handles.PlotPressureAndTempMenuItem, eventdata, handles)% заборонити
вивід графіків для підвищення швидкодії
selection='Hi';
while strcmp(selection,'Hi')
selection = questdlg('Будь-ласка, з'єднайте ПК і прилад через кабель зв'язку',...
'Передача даних',...
'Зроблено','Hi','Hi');
end
selection='Hi';
while strcmp(selection,'Hi')
selection =questdlg(['Увімкніть та під'єднайте до приладу, будь-ласка, блок живлення на 9V'],...
['Живлення системи вимірювання'],...
'Зроблено','Hi','Hi');
end
selection='Hi';
while strcmp(selection,'Hi')
selection =questdlg(['Увімкніть та під'єднайте до приладу, будь-ласка, блок живлення на 24V'],...
['Живлення системи керування'],...
'Зроблено','Hi','Hi');
end
questdlg(['Увімкніть та під'єднайте до приладу, будь-ласка, компресор'],...
['Джерело газу'],...
'Зроблено','Hi','Hi');
% 5) Перевірка звязку
selection = questdlg(['Встановити поточний час на приладі?'],...
['Перевірка зв'язку'],...

```

Продовження додатку П

```

'Так','Hi','Так');
if strcmp(selection,'Так')
SendCurrentTimeAndDataToDevice_Callback(handles.SendCurrentTimeAndDataToDevice, eventdata, handles);
while strcmp(selection,'Так')
selection = questdlg(['Відображається поточний час на приладі, якщо ні перевірте кабель зв'язку'],...
['Перевірка зв'язку'],...
'Так','Hi','Hi');
if strcmp(selection,'Hi')
selection='Так';
SendCurrentTimeAndDataToDevice_Callback(handles.SendCurrentTimeAndDataToDevice, eventdata, handles);
else
selection='Hi';
end end end
selection = questdlg(['Встановити нульове значення тиску?'],['Встановлення нуля у камері'],
'Так','Hi','Hi');
if strcmp(selection,'Так')
SetSystem0_Callback(handles.SetSystem0,eventdata,handles);
end
selection='Hi';
if strcmp(selection,'Hi')
selection = questdlg(['Розпочати одержання вимірянних даних із системи?'],...
['Одержання вимірянних даних із системи'],...
'Так','Hi','Так');
if strcmp(selection,'Так')
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles);
end end
selection = questdlg(['Здійснити продування системи?'],...
['Продування системи'],...
'Так','Hi','Hi');
if strcmp(selection,'Так')
pushbutton8_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles);
end
selection='Hi';
if strcmp(selection,'Hi')
selection = questdlg(['Відображаються коректні вимірювальні дані?'],...
['Одержання вимірянних даних із системи'],...
'Так','Hi','Так');
if strcmp(selection,'Так')
questdlg(['Система налаштована'],...
['Налаштування'],...

```

Продовження додатку П

```

'Так,');
SystemAreReady=1;
else
questdlg(['Система не налаштована, повторіть процедуру налаштування'],...
['Налаштування'],...
'Так,');
end
end
function StartNewMeasure(handles,eventdata)
global TimeFromLastMinimum MaxNumberErrorSetPressure SystemAreReady ResistancesOfCapillarisAreDetermined
StopMeasuring Step TolRelTlife
global FindMaxStatus MaxNumberRepeatedArrayMinMax NumberRequiredMinMaxForRecord RepeatedArrayMinMax
FinishTime
global PressureForClosedCapillaries DiffPressureForClosedCapillaries Pressure DiffPressure EquilibriumTimeSec
EnoughPoints EnoughPoints2
global IsEquilibriumForCapillary1 IsEquilibriumForCapillary2 IsEquilibriumForCapillary3
IsEquilibriumForCapillary1=0;
IsEquilibriumForCapillary2=0;
IsEquilibriumForCapillary3=0;
StopMeasuring=0;
CreateNewFilesForData(); % створити нові файли для нового вимірювання
if SystemAreReady~=1
questdlg(['Система ще не налаштована, налаштуйте її...'],... % якщо система не налаштована
['Налаштування системи'], 'Так','Так');
return;
end
if ResistancesOfCapillarisAreDetermined~=1
% якщо пневматичні опора ще не визначені, то визначить їх
questdlg(['Пневматичний опір системи не визначений...'],... % якщо система не налаштована
['Налаштування системи'], 'Так','Так'); return;
end
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
% встановити максимальний тиск 60 мм
SetPressureinSystem(handles,eventdata,60,0);
if PressureForClosedCapillaries==0
pause(7);
CurrentP=Pressure(end);

```

Продовження додатку П

```

if CurrentP >90 || CurrentP <3
pushbutton1_Callback(hObject,eventdata,handles); %% зупинити отримання даних
pause(2);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,eventdata,handles); %% розпочати отримання даних
pause(5);
end
PressureForClosedCapillaries=mean(Pressure);
DiffPressureForClosedCapillaries=mean(DiffPressure);
end
% початок вимірювання
StopMeasureForCapillary1=0; % 1 - заборона для вимірювання для першого капіляра; 0 - дозволено
SecondAttemptForCapillary1=1; % 1 - пройшла друга спроба для вимірювання для першого капіляра; 0 - ще не було
другої спроби
StopMeasureForCapillary2=0;
SecondAttemptForCapillary2=1;
StopMeasureForCapillary3=0;
SecondAttemptForCapillary3=1;
while(StopMeasuring==0)
if (StopMeasureForCapillary2==0)
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(2);
pushbutton6_Callback(handles.pushbutton6,eventdata,handles);%% встановити другий капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли з'явитися бульбашки
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
while MaxNumberRepeatedArrayMinMax == 0 % чекати поки буде повторне значення
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково', ['Вимірювання'],'Так','Так']);
SetDisableAllValve();
return;
end
pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary2==0
helpdlg('Розпочинаю повторне вимірювання максимального тиску для другого капіляра?','Вимірювання');
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end

```

Продовження додатку П

```

SetDisableAllValve();
pause(2);
pushbutton6_Callback(handles.pushbutton6,eventdata,handles);%% встановити другий капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли появиться
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
SecondAttemptForCapillary2=1;
elseif TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary2==1
StopMeasureForCapillary2=1;
helpdlg('Вимірювання для другого капіляра завершено','Вимірювання');
break;
end
end
if StopMeasureForCapillary2~=1 && MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0
while ~(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord) %
чекати поки стане достатньо повторних значень
LichulnuckEquilibriumTime=0;
LichulnuckEnoughPoints=0;
for capa=1:length((RepeatedArrayMinMax(:,5)))
if RepeatedArrayMinMax(capa,3) >= EquilibriumTimeSec
LichulnuckEquilibriumTime= LichulnuckEquilibriumTime+1;
end
if (RepeatedArrayMinMax(capa,3) >= 10)
LichulnuckEnoughPoints=LichulnuckEnoughPoints+1;
end end
if (LichulnuckEquilibriumTime>=EnoughPoints) ||IsEquilibriumForCapillary2==1
StopMeasureForCapillary2=1;
SecondAttemptForCapillary2=1;
helpdlg('Достатню кількість рівноважних точок для другого капіляра досягнуто');
helpdlg('Вимірювання для другого капіляра завершено','Вимірювання');
break;
end
if LichulnuckEnoughPoints>=EnoughPoints2
helpdlg('Достатню кількість точок для другого капіляра досягнуто');
break; end
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково'],...
['Вимірювання'],...
'Так','Так');
return;
end

```

Продовження додатку П

```

pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime
StopMeasureForCapillary2=1;
helpdlg('Вимірювання для другого капіляра завершено','Вимірювання');
break;
elseif (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord)
SecondAttemptForCapillary2=1;
StopMeasureForCapillary2=0;
end end
if StopMeasureForCapillary2==0 && (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >=
NumberRequiredMinMaxForRecord)
ChangeStep();
if RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=1.5
if StopMeasureForCapillary1==0||StopMeasureForCapillary2==0 || StopMeasureForCapillary3==0
MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
else
helpdlg('Експеримент завершений', 'Вимірювання');StopMeasuring=1;
load handel
sound(y,Fs)
SetDisableAllValve();
%%%%%%запис результатів
mytimenow=clock;
name=strcat(num2str(mytimenow(1)), '_ ', num2str(mytimenow(2)) , '_ ', num2str(mytimenow(3)) , '_ '
,num2str(mytimenow(4)), '_ ', num2str(mytimenow(5)), '_ ', num2str(mytimenow(6)), '_ ');
eval(['!mkdir ' name]) % створення папки
copyfile('myFilePmax1.txt',name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax2.txt',name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax3.txt',name); % копіювання файлів
copyfile('AirResistanceCapillaries.txt',name); % копіювання файлів
%%%%%% розрахунок ДПН за останніми значеннями
pause(60);
%запуск нового вимірювання
StartNewMeasure(handles,eventdata);
end
continue;
end end end
if MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0
if ( Step > 0.5)&& (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>5 || StopMeasureForCapillary2==1)
TolRelTlife=0.2;
Step=-Step+0.3;

```


Продовження додатку П

```

StopMeasureForCapillary2=0;
helpdlg('Перескок кроку для другого капіляра');
MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
continue;
end end end
if (StopMeasureForCapillary1==0)
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(2); % для стабілізації тиску
pushbutton5_Callback(handles.pushbutton5,eventdata,handles);%% встановити перший капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли появитися бульбашки
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
while MaxNumberRepeatedArrayMinMax == 0 % чекати поки буде повторне значення
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково'], ['Вимірювання'],'Так','Так');
return;
end
pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary1==0
% якщо час від останнього мінімуму більший за встановлений
% фінішний час і це ще перша спроба закрити цей капіляр і повторити ще раз
helpdlg('Розпочинаю повторне вимірювання максимального тиску для першого капіляра?','...
'Вимірювання');
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(2);
pushbutton5_Callback(handles.pushbutton5,eventdata,handles);%% встановити перший капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли появитися
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
SecondAttemptForCapillary1=1;
elseif TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary1==1
StopMeasureForCapillary1=1; % якщо повторна спроба знайти наступний мінімум не вдала то зупинити вимірювання
для капіляра 1
helpdlg('Вимірювання для першого капіляра завершено','Вимірювання');
break;
end end

```

Продовження додатку П

```

if StopMeasureForCapillary1~=1 && MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0 % якщо вимірювання для капіляру 1
дозволено і кількість знайдених максимумів більша 0 то
while ~(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord) %
чекати поки стане достатньо повторних значень
LichulnuckEquilibriumTime=0;
LichulnuckEnoughPoints=0;
for capa=1:length((RepeatedArrayMinMax(:,5)))
if RepeatedArrayMinMax(capa,3) >= EquilibriumTimeSec
LichulnuckEquilibriumTime= LichulnuckEquilibriumTime+1;
end
if (RepeatedArrayMinMax(capa,3) >= 10)
LichulnuckEnoughPoints=LichulnuckEnoughPoints+1;
end end
if (LichulnuckEquilibriumTime>=EnoughPoints)||IsEquilibriumForCapillary1==1
StopMeasureForCapillary1=1;
SecondAttemptForCapillary1=1;
helpdlg('Вимірювання для першого капіляра завершено','Вимірювання');
helpdlg('Достатню кількість рівноважних точок для першого капіляра досягнуто');
break;
end
if LichulnuckEnoughPoints>=EnoughPoints2
break;
helpdlg('Достатню кількість точок для першого капіляра досягнуто');
end
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково'], ['Вимірювання'],'Так','Так');
return;
end
pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime
StopMeasureForCapillary1=1;
helpdlg('Вимірювання для першого капіляра завершено','Вимірювання');
break;
elseif (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord)
StopMeasureForCapillary1=0;
end end
if StopMeasureForCapillary2==1 && StopMeasureForCapillary1==0 &&
(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord) % якщо
вимірювання для капіляра 2 заборонено і к-сть максимумів більше дозволеного, то можна встановити більший
крок

```

Продовження додатку II

```

ChangeStep();
end
% для першого капіляра пропуск подальшого вимірювання
if RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=1.5
if StopMeasureForCapillary1==0||StopMeasureForCapillary2==0 || StopMeasureForCapillary3==0
MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
else
helpdlg('Експеримент завершений',...
'Вимірювання');
StopMeasuring=1;
% звуковий сигнал про завершення вимірювання
load handel
sound(y,Fs)
SetDisableAllValve();
%%%%запис результатів
mytimenow=clock;
name=strcat(num2str(mytimenow(1)), '_ ', num2str(mytimenow(2)) , '_ ', num2str(mytimenow(3)) , '_ '
,num2str(mytimenow(4)), '_ ', num2str(mytimenow(5)), '_ ', num2str(mytimenow(6)), '_ ');
% створення папки
eval(['!mkdir ' name])
copyfile('myFilePmax1.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax2.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax3.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('AirResistanceCapillaries.txt' ,name); % копіювання файлів
% створення нових файлів
pause(60);
%запуск нового вимірювання
StartNewMeasure(handles,eventdata);
end
continue;
end
end
if MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0
if ( Step > 0.5)&& (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>5 ||
StopMeasureForCapillary1==1)&& StopMeasureForCapillary2==1
TolRelTlife=0.2;
Step=-Step+0.3;
StopMeasureForCapillary1=0;
SecondAttemptForCapillary1=0;
helpdlg('Перескок кроку для першого капіляра');

```

Продовження додатку П

```

MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
continue;
end end end
if (StopMeasureForCapillary3==0)
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(2);
pushbutton7_Callback(handles.pushbutton6,eventdata,handles);%% встановити третій капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли появиться
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
while MaxNumberRepeatedArrayMinMax == 0 % чекати поки буде повторне значення
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково'], ['Вимірювання'],'Так','Так');
return;
end
pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary3==0
helpdlg('Розпочинаю повторне вимірювання максимального тиску для третього капіляра?','Вимірювання');
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SetDisableAllValve();
pause(2);
pushbutton7_Callback(handles.pushbutton7,eventdata,handles);%% встановити перший капіляр на вимірювання
pause(2); % пауза для того щоб встигли появиться
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles); % розпочати пошук максимуму
SecondAttemptForCapillary3=1;
elseif TimeFromLastMinimum > FinishTime && SecondAttemptForCapillary3==1
StopMeasureForCapillary3=1;
helpdlg('Вимірювання для третього капіляра завершено','Вимірювання');
break;
end end
if StopMeasureForCapillary3~=1 && MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0
while ~((RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord)) %
чекати поки стане достатньо повторних значень
LichulnuckEquilibriumTime=0;
LichulnuckEnaughPoints=0;
for capa=1:length((RepeatedArrayMinMax(:,5)))

```

Продовження додатку II

```

if RepeatedArrayMinMax(сара,3) >= EquilibriumTimeSec
LichulnuckEquilibriumTime= LichulnuckEquilibriumTime+1;
end
if (RepeatedArrayMinMax(сара,3) >= 10)
LichulnuckEnaughPoints=LichulnuckEnaughPoints+1;
end end
if (LichulnuckEquilibriumTime>=EnoughPoints)||IsEquilibriumForCapillary3==1
StopMeasureForCapillary3=1;
SecondAttemptForCapillary3=1;
helpdlg('Достатню кількість рівноважних точок для третього капіляра досягнуто');
helpdlg('Вимірювання для третього капіляра завершено','Вимірювання');
break;
end
if LichulnuckEnaughPoints>=EnoughPoints2
helpdlg('Достатню кількість рівноважних точок для третього капіляра досягнуто');
break;
end
if StopMeasuring==1
questdlg(['Експеримент зупинений достроково'], ['Вимірювання'],'Так','Так');
return;
end
pause(2);
if TimeFromLastMinimum > FinishTime
StopMeasureForCapillary3=1;
helpdlg('Вимірювання для третього капіляра завершено','Вимірювання');
break;
elseif (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord)
StopMeasureForCapillary3=0;
end end
if StopMeasureForCapillary1==1 && StopMeasureForCapillary2==1 && StopMeasureForCapillary3==0 &&
(RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,5) >= NumberRequiredMinMaxForRecord)
ChangeStep();
end end
if MaxNumberRepeatedArrayMinMax ~= 0
if (Step > 0.5) && (RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>5 ||
StopMeasureForCapillary3==1)&& StopMeasureForCapillary2==1 && StopMeasureForCapillary1==1
TolRelTlife=0.2;
Step=-Step+0.3;
StopMeasureForCapillary3=0;
helpdlg('Перескок кроку для третього капіляра');

```

Продовження додатку II

```

MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
continue;
end end end
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум, тоді зупинити пошук максимуму
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
if StopMeasureForCapillary1==0||StopMeasureForCapillary2==0 || StopMeasureForCapillary3==0
MenuItemSetLowerPressure_Callback(handles.MenuItemSetLowerPressure, eventdata, handles);
else
helpdlg('Експеримент завершений',...
'Вимірювання');
StopMeasuring=1;
load handel
sound(y,Fs)
SetDisableAllValve();
%%%%%%запис результатів
mytimenow=clock;
name=strcat(num2str(mytimenow(1)), '_ ', num2str(mytimenow(2)) , '_ ', num2str(mytimenow(3)) , '_ ',
num2str(mytimenow(4)), '_ ', num2str(mytimenow(5)), '_ ', num2str(mytimenow(6)), '_ ');
eval(['!mkdir ' name]) % створення папки
copyfile('myFilePmax1.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax2.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('myFilePmax3.txt' ,name); % копіювання файлів
copyfile('AirResistanceCapillaries.txt' ,name); % копіювання файлів
%% розрахунок ДПН
% DetermineDSTForLastPressureValue_Callback(handles.DetermineDSTForLastPressureValue, eventdata, handles); % за
останніми значеннями тиску
%%
% copyfile('myDST_Capillary1.txt' ,name); % копіювання файлів
% copyfile('myDST_Capillary2.txt' ,name); % копіювання файлів
% copyfile('myDST_Capillary3.txt' ,name); % копіювання файлів
% %%% створення нових файлів
pause(60);
%запуск нового вимірювання
StartNewMeasure(handles,eventdata);
end end
function StopStepMotor_Callback(hObject, eventdata, handles)
SendCommandToDevice(41); % вимкнути кроковий двигун
function CreateNewFilesForData()

```

Продовження додатку П

```

global myFileForPressure myFileForPressure1 myFileForPressure2 myFileForPressure3 myFileForDiffPressure
myFileForDiffPressure1 myFileForDiffPressure2 myFileForDiffPressure3; % заголовок файлу куди записуються час та
тиск
global myFilePmax1 myFilePmax2 myFilePmax3; % заголовки файлів де будуть записуватися максимальні тиски
global myFileForTemp1; % змінна файлу куди записуються час та т-ра 1 датчика
global myFileForTemp2; % змінна файлу куди записуються час та т-ра 2 датчика
myFileForTemp1=fopen('myFileForTemp1.txt','w');
myFileForTemp2=fopen('myFileForTemp2.txt','w');
myFileForPressure=fopen('myFileForPressure.txt','w'); % назва файлу, режим перезапис
myFileForPressure1= fopen('myFileForPressure1.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFileForPressure2= fopen('myFileForPressure2.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFileForPressure3= fopen('myFileForPressure3.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure=fopen('myFileForDiffPressure.txt','w'); % назва файлу, режим перезапис
myFileForDiffPressure1= fopen('myFileForDiffPressure1.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure2= fopen('myFileForDiffPressure2.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFileForDiffPressure3= fopen('myFileForDiffPressure3.txt','w');% закрити файл для значень тиску
myFilePmax1=fopen('myFilePmax1.txt','w'); % назва файлів для макс. тисків, режим перезапис
myFilePmax2=fopen('myFilePmax2.txt','w');
myFilePmax3=fopen('myFilePmax3.txt','w');
function DetermineDST_Callback(hObject, eventdata, handles)
    StartNewMeasure(handles,eventdata);
function SetSystem_Callback(hObject, eventdata, handles)
    StartSetSystem(handles,eventdata);
function StopMeasure_Callback(hObject, eventdata, handles)
global StopMeasuring;
StopMeasuring=1;
function SetModeMeasureForDCXL_Callback(hObject, eventdata, handles)
global CoeffCalibrationPressure PressureDriftCoeff
CoeffCalibrationPressure=-6.9079e-5;
PressureDriftCoeff=579.47;
PressureDriftCoeff=0;
SendCommandToDevice(86);
function Setinterval105_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Interval
SendCommandToDevice(83);
Interval=9.52e-3;
function SetInterval5_35_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Interval
SendCommandToDevice(84);
Interval=186.77e-3; % часовий інтервал між даними з АЦП

```

Продовження додатку П

```

function SetModeGermeticForFirstCap_Callback(hObject, eventdata, handles)
SendCommandToDevice(44);
function MenuItemSetPressureMaximum_Callback(hObject, eventdata, handles)
global WorkMaxPressure
SetPressureinSystem(handles,eventdata,WorkMaxPressure,0);
function MenuItemSetLowerPressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Step
SetPressureinSystem(handles,eventdata,0,-Step);% 0 значить що потрібний тиск вираховується як різниця між
поточним і тиском і кроком
function SetModeSensor1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global CoeffCalibrationPressure PressureDriftCoeff
CoeffCalibrationPressure=3.120972144335948e-05; % це для перерахунку датчика MPXV
PressureDriftCoeff=0;
SendCommandToDevice(82);
function CreateNewFilesForData_Callback(hObject, eventdata, handles)
CreateNewFilesForData();
function MenuItemSetHigherPressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Step
SetPressureinSystem(handles,eventdata,0,Step);% 0 значить що потрібний тиск вираховується як різниця між
поточним і тиском і кроком
function PlotPressureAndTempMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
global PlotPressure PlotForDiffPressure PlotTemp
if PlotPressure==1
PlotPressure=0;
PlotForDiffPressure=0;
PlotTemp=0;
else
PlotPressure=1;
PlotForDiffPressure=1;
PlotTemp=1;
end
function SetFinishTime_Callback(hObject, eventdata, handles)
global FinishTime
MinFinishTime=10;
MaxFinishTime=3600;
prompt = {'Введіть значення кінцевого часу в діапазоні від ' num2str(MinFinishTime) ' до ' num2str(MaxFinishTime) '
секунд' };
dlg_title = 'Введення заданого кінцевого часу експерименту';
num_lines = 1;
def = {'60'};

```


Продовження додатку П

```

answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
val status] = str2num(answer{1}); % Use curly bracket for subscript
if status
if val>=MinFinishTime && val<= MaxFinishTime
FinishTime=val;
else
errordlg('Невірно задане значення часу')
end end
function SpeedMenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
function ItemDesiblecapilaries_Callback(hObject, eventdata, handles)
SetDisableAllValve();
function DetermineDSTForLastPressureValue_Callback(hObject, eventdata, handles)
global EquilibriumTimeSec
[DST1 DST2 DST3 EquilibriumIterResult_sigma delta_ro
H2_3]=myFindDST('myFilePmax1.txt','myFilePmax2.txt','myFilePmax3.txt',EquilibriumTimeSec,2);
if EquilibriumIterResult_sigma~=0
ResultShow(DST1,DST2,DST3,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,H2_3);
end
function DetermineDST_ax_b_Callback(hObject, eventdata, handles)
global EquilibriumTimeSec
[DST1 DST2 DST3 EquilibriumIterResult_sigma delta_ro
H2_3]=myFindDST('myFilePmax1.txt','myFilePmax2.txt','myFilePmax3.txt',EquilibriumTimeSec,1);
if EquilibriumIterResult_sigma~=0
ResultShow(DST1,DST2,DST3,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,H2_3);
end
function DetermineDST_y_1_sqrt_x_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to DetermineDST_y_1_sqrt_x (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global EquilibriumTimeSec
[DST1 DST2 DST3 EquilibriumIterResult_sigma delta_ro
H2_3]=myFindDST('myFilePmax1.txt','myFilePmax2.txt','myFilePmax3.txt',EquilibriumTimeSec,0);
if EquilibriumIterResult_sigma~=0
ResultShow(DST1,DST2,DST3,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,H2_3);
end
function DetermineDST_spline_Callback(hObject, eventdata, handles)
global EquilibriumTimeSec
[DST1 DST2 DST3 EquilibriumIterResult_sigma delta_ro
H2_3]=myFindDST('myFilePmax1.txt','myFilePmax2.txt','myFilePmax3.txt',EquilibriumTimeSec,3);
if EquilibriumIterResult_sigma~=0

```

Продовження додатку П

```

ResultShow(DST1,DST2,DST3,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,H2_3);
end
function StartNewMeasure_Item_Callback(hObject, eventdata, handles)
StartNewMeasure(handles,eventdata);
function SetPressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
global WorkMaxPressure WorkMinPressure
WorkMinPressure=10;
WorkMaxPressure=60;
prompt = {'Введіть значення тиску в діапазоні від ' num2str(WorkMinPressure) ' до ' num2str(WorkMaxPressure) ' мм
вод. ст.' };
dlg_title = 'Введення заданого тиску';
num_lines = 1;
def = {'40'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
if isempty(answer)
return;
end
[val status] = str2num(answer{1}); % Use curly bracket for subscript
if status
if val>=WorkMinPressure && val<= WorkMaxPressure
SetPressureinSystem(handles,eventdata,val,0);
else
helpdlg('Допустиме значення тиску не встановлено','Задання тиску');
end end
function ResultShow(DST1,DST2,DST3,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,H2_3)
helpdlg(['Рівноважний поверхневий натяг досліджуваної рідини становить '
num2str(myround(EquilibriumIterResult_sigma*1000,1)) ' мН/м;' ' Густина рідини:' num2str(myround(delta_ro,1)) '
кг/м^3;' ' Глибина занурення 2-го і 3-го капілярів:' num2str(myround(H2_3*1000,1)) ' мм;'],'Результат вимірювання');
function ChangeStep()
global RepeatedArrayMinMax MaxNumberRepeatedArrayMinMax Step TolRelTlife
if RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=0.5 % якщо час існування поверхні менше 1 с то
встановити крок
Step=2;
TolRelTlife=0.2;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>0.5 &&
RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=1
Step=1,5;
TolRelTlife=0.2;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>1 &&
RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=2

```

Продовження додатку П

```

Step=1;
TolRelTlife=0.2;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>2 &&
RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=5
Step=0.5;
TolRelTlife=0.25;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>5 &&
RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=10
Step=0.3;
TolRelTlife=0.3;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)>10 &&
RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3)<=30
Step=0.3;
TolRelTlife=0.3;
elseif RepeatedArrayMinMax(MaxNumberRepeatedArrayMinMax,3) >30
Step=0.2;
TolRelTlife=0.3;
end
function Set_and_calb_Sensor_Diff_Pressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
SendCommandToDevice(53); % встановити обидва датчики в режим вимірювання до протічного капіляра
return;
global Pressure DiffPressure FindMaxStatus PlotPressure SystemAreReady CoeffCalibrationDiffPressure
WorkMinPressure
if SystemAreReady~=1
questdlg(['Система не налаштована, повторіть процедуру налаштування'],...
['Налаштування'],...
'Так,');
return;
end
if PlotPressure~=1
PlotPressure=1;
end
PlotPressureAndTempMenuItem_Callback(handles.PlotPressureAndTempMenuItem, eventdata, handles)% заборонити
вивід графіків для підвищення швидкодії
if FindMaxStatus==1 % якщо статус шукати максимум тоді зупинити пошук максимум
FindMaxButton_Callback(handles.FindMaxButton,eventdata,handles);
end
SendCommandToDevice(54); % встановити обидва датчики в режим вимірювання до протічного капіляра
pause(10);
MeanTempPressure=mean(Pressure);

```

Продовження додатку П

```

MeanTempDiffPressure=mean(DiffPressure);
k=1;
while (k<10)
k=k+1;
pause(2);
MeanTempPressure=mean([MeanTempPressure mean(Pressure)]);
MeanTempDiffPressure=mean([MeanTempDiffPressure mean(DiffPressure)]);
end
selection='Hi';
if strcmp(selection,'Hi')
selection =questdlg(['Встановити новий калібровочний коефіцієнт для датчика перепаду тиску'],...
['Налаштування вимірювальної системи'],...
'Так','Hi','Hi');
end
if strcmp(selection,'Так')
CoeffCalibrationDiffPressure=CoeffCalibrationDiffPressure* (MeanTempPressure/MeanTempDiffPressure);
end
function SetClosedRegulatorPressure_Callback(hObject, eventdata, handles)
SendCommandToDevice(50);
function [DST1 DST2 DST3 EquilibriumIterResult_sigma delta_ro
H2_3]=myFindDST(myFilePmax1,myFilePmax2,myFilePmax3,EquilibriumTimeSec,TypeDeterminedST)
figure;
format long; % встановити формат виводу результатів
g=9.8;% прискорення вільного падіння
dh=4.155e-3;
ErrorH=0;
r1=3.193676578699388e-004;
r2=4.959711675854401e-004;
AirResistanceCapillaries=load('AirResistanceCapillaries.txt'); % завантажити масив даних з файлу для обробки
if ~isempty(AirResistanceCapillaries)
resistanceCapillary1=AirResistanceCapillaries(1,1);
resistanceCapillary2=AirResistanceCapillaries(1,2);
resistanceCapillary3=AirResistanceCapillaries(1,3);
end
Pmax1=load(myFilePmax1); % завантажити масив даних з файлу для обробки
Pmax2=load(myFilePmax2); % завантажити масив даних з файлу для обробки
Pmax3=load(myFilePmax3); % завантажити масив даних з файлу для обробки
% Pmax1(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску
% Pmax2(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску
% Pmax3(:,2) - значення тиску відносно атмосфери в момент максимального тиску

```

Продовження додатку П

```

Pmax1(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax1(:,7)*9.8,Pmax1(:,8)*9.8,Pmax1(:,9)*9.8,Pmax1(:,2)*9.8,resistance
Capillary1); % врахування динамічного впливу системи
Pmax2(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax2(:,7)*9.8,Pmax2(:,8)*9.8,Pmax2(:,9)*9.8,Pmax2(:,2)*9.8,resistance
Capillary2); % врахування динамічного впливу системи
Pmax3(:,2)=TakeAccountOfDymamicPressure(Pmax3(:,7)*9.8,Pmax3(:,8)*9.8,Pmax3(:,9)*9.8,Pmax3(:,2)*9.8,resistance
Capillary3); % врахування динамічного впливу системи
% обов'язково для визначення в тому числі правильного рівноважного значення
Pmax1=sortrows(Pmax1,3); % посортувати тиск по значенню lifetime.
Pmax2=sortrows(Pmax2,3); % посортувати тиск по значенню lifetime.
Pmax3=sortrows(Pmax3,3); % посортувати тиск по значенню lifetime.
if TypeDetermineDST==0
if ~(length(Pmax1(:,2))>=5)
helpdlg('Недостатньо точок (не менше 5) чи максимального часу існування поверхні (не менше 10 с) для
екстраполяції залежності кривої максимального тиску від часу існування поверхні функцією виду y=f(1/sqrt(x))',...
'Знаходження рівноважного поверхневого натягу');
DST1=0; DST2=0; DST3=0;
EquilibriumIterResult_sigma=0;
delta_ro=0;
H2_3=0;
return;
end
%% знаходження рівноважного Pmax шляхом лінійної екстраполяції виміряних даних як функції f(1/sqrt(x))
EquilibriumPmax1_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax1(1:end,3)),Pmax1(1:end,2),1./sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
EquilibriumPmax2_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax2(1:end,3)),Pmax2(1:end,2),1./sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
EquilibriumPmax3_Extrap = interp1(1./sqrt(Pmax3(1:end,3)),Pmax3(1:end,2),1./sqrt(EquilibriumTimeSec),'linear','extrap');
elseif TypeDetermineDST==1
%% знаходження рівноважного Pmax шляхом апроксимація виміряних даних степенною функцією виду
y=a*x^b+c
if ~(length(Pmax1(:,2))>=5)
helpdlg('Недостатньо точок (не менше 5) чи максимального часу існування поверхні (не менше 10 с) для
екстраполяції залежності кривої максимального тиску від часу існування поверхні функцією виду y=a*x^b+c',...
'Знаходження рівноважного поверхневого натягу');
DST1=0;
DST2=0; DST3=0;
EquilibriumIterResult_sigma=0;
delta_ro=0;
H2_3=0;
return;
end
[cfunPmax1,gofPmax1]=fit(Pmax1(1:end,3),Pmax1(1:end,2),fitype('power2'));

```

Продовження додатку II

```

[cfunPmax2,gofPmax2]=fit(Pmax2(1:end,3),Pmax2(1:end,2),fitype('power2'));
[cfunPmax3,gofPmax3]=fit(Pmax3(1:end,3),Pmax3(1:end,2),fitype('power2'));
EquilibriumPmax1_Extrap=feval(cfunPmax1,EquilibriumTimeSec);
EquilibriumPmax2_Extrap=feval(cfunPmax2,EquilibriumTimeSec);
EquilibriumPmax3_Extrap=feval(cfunPmax3,EquilibriumTimeSec);
elseif TypeDetermineDST==2
%% за кінцевими значеннями тиску
EquilibriumPmax1_Extrap=Pmax1(end,2);
EquilibriumPmax2_Extrap=Pmax2(end,2);
EquilibriumPmax3_Extrap=Pmax3(end,2);
% EquilibriumTimeSec=max([max(Pmax1(1:end,3)) max(Pmax2(1:end,3)) max(Pmax3(1:end,3)) ]);
elseif TypeDetermineDST==3
%% за лінійною екстраполяцією для найменшого значення тиску по часу
EquilibriumTimeSec =FoundmyEquilibriumTimeSec(Pmax1,Pmax2,Pmax3);
if EquilibriumTimeSec<=Pmax1(end,3)
for lucj555=1:length(Pmax1(:,3))
if EquilibriumTimeSec==Pmax1(end,3)
EquilibriumPmax1_Extrap=Pmax1(end,2);
break;
end
if EquilibriumTimeSec==Pmax1(lucj555,3)
EquilibriumPmax1_Extrap=Pmax1(lucj555,2);
break;
end
if EquilibriumTimeSec < Pmax1(lucj555,3)
x1=Pmax1(lucj555-1,3);
y1=Pmax1(lucj555-1,2);
x2=Pmax1(lucj555,3);
y2=Pmax1(lucj555,2);
EquilibriumPmax1_Extrap=(y2-y1)*(EquilibriumTimeSec-x1)/(x2-x1)+y1;
break;
end end
else
EquilibriumPmax1_Extrap=Pmax1(end,2);
end
if EquilibriumTimeSec<=Pmax2(end,3)
for lucj555=1:length(Pmax2(:,3))
if EquilibriumTimeSec==Pmax2(end,3)
EquilibriumPmax2_Extrap=Pmax2(end,2);
break;

```

Продовження додатку П

```

end
if EquilibriumTimeSec==Pmax2(lucj555,3)
EquilibriumPmax2_Extrap=Pmax2(lucj555,2);
break;
end
if EquilibriumTimeSec < Pmax2(lucj555,3)
x1=Pmax2(lucj555-1,3);
y1=Pmax2(lucj555-1,2);
x2=Pmax2(lucj555,3);
y2=Pmax2(lucj555,2);
EquilibriumPmax2_Extrap=(y2-y1)*(EquilibriumTimeSec-x1)/(x2-x1)+y1;
break;
end end
else
EquilibriumPmax2_Extrap=Pmax2(end,2);
end
if EquilibriumTimeSec<=Pmax3(end,3)
for lucj555=1:length(Pmax3(:,3))
if EquilibriumTimeSec==Pmax3(end,3)
EquilibriumPmax3_Extrap=Pmax3(end,2);
break;
end
if EquilibriumTimeSec==Pmax3(lucj555,3)
EquilibriumPmax3_Extrap=Pmax3(lucj555,2);
break;
end
if EquilibriumTimeSec < Pmax3(lucj555,3)
x1=Pmax3(lucj555-1,3);
y1=Pmax3(lucj555-1,2);
x2=Pmax3(lucj555,3);
y2=Pmax3(lucj555,2);
EquilibriumPmax3_Extrap=(y2-y1)*(EquilibriumTimeSec-x1)/(x2-x1)+y1;
break;
end
end
else
EquilibriumPmax3_Extrap=Pmax3(end,2);
end end
plot([Pmax1(1:end,3);

```

Продовження додатку П

```

EquilibriumTimeSec],[Pmax1(1:end,2);
EquilibriumPmax1_Extrap],'s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10);
grid on hold on
if TypeDetermineDST==1
fplot(cfunPmax1,[Pmax1(1,3) EquilibriumTimeSec],'-g');
end
plot([Pmax2(1:end,3);
EquilibriumTimeSec],[Pmax2(1:end,2);
EquilibriumPmax2_Extrap],'s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
if TypeDetermineDST==1
fplot(cfunPmax2,[Pmax2(1,3) EquilibriumTimeSec],'-b');
end
if TypeDetermineDST==1
legend(strcat('Pmax1VStlifetime','CKB=',num2str(gofPmax1.sse),'
Pmax(капіляр1,r1=',num2str(r1,'%g'),'м'),'Pmax1VStlifetimeапрокс',strcat('Pmax2VStlifetime','CKB=',num2str(gofPmax2.
sse),' Pmax(капіляр1,r1=',num2str(r1,'%g'),'м'),'Pmax2VStlifetimeапрокс');
end
xlabel('Час існування поверхні, с');
ylabel('Pmax, Па');
title(strcat('Залежність максимального тиску від часу поверхні'));
% hold off
% subplot(2,1,2);
plot([Pmax3(1:end,3);
EquilibriumTimeSec],[Pmax3(1:end,2);
EquilibriumPmax3_Extrap],'s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','m','MarkerSize',10);
grid on
if TypeDetermineDST==1
legend(strcat('Pmax3VStlifetime','CKB=',num2str(gofPmax3.sse),' Pmax(капіляр3,r2=',num2str(r2,'%g'),'м'));
end
hold on
if TypeDetermineDST==1
fplot(cfunPmax3,[Pmax3(1,3) EquilibriumTimeSec],'-r');
end
title(strcat('Залежність максимального тиску від часу поверхні'));
xlabel('Час існування поверхні, с');
ylabel('Pmax, Па');
%% розрахунок рівноважного ПН, різниці густини delta_rho та глибини занурення капілярів H:
delta_rho=(EquilibriumPmax2_Extrap-EquilibriumPmax1_Extrap)/(dh*g)% різниця густин досліджуваної рідини та газу в
кг/м3

```


Продовження додатку П

```

f=@(sigma)((EquilibriumPmax3_Extrap-(EquilibriumPmax2_Extrap+delta_ro*g*ErrorH)-delta_ro*g*(z0(r2,sigma, delta_ro,
g)-z0(r1,sigma, delta_ro, g)))/(2*(1/R0(r2,sigma,delta_ro,g)-1/R0(r1,sigma,delta_ro,g)))-sigma) % формула розрахунку
рівноважного ПН
EquilibriumIterResult_sigma=fzero(f,[10e-3 100e-3])% функція пошуку ПН в діапазоні від 10 до 100 мН/м
% розрахунок глибини занурення
% глибина занурення другого і третього капіляра за EquilibriumPmax2 другого
% капіляра оскільки його тиск найбільший
H2_3=EquilibriumPmax3_Extrap/(delta_ro*g)-
2*EquilibriumIterResult_sigma/(R0(r2,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro,g)*delta_ro*g)-
z0(r2,EquilibriumIterResult_sigma,delta_ro, g)
H1=(H2_3-ErrorH)-dh % глибина занурення першого капіляр враховуючи не точність встановлення другого і
третього капіляра
% визначення DST для кожного капіляра
% капіляр 1
Pmax1(end+1,2)=EquilibriumPmax1_Extrap;% додати до масиву максимумів тиску його екстрапольоване
рівноважене значення
Pmax1(end,3)=EquilibriumTimeSec;
for licul=1:length(Pmax1(:,1))
DST1(licul,2)=iterformul1(Pmax1(licul,2),delta_ro,r1,H1);
end
DST1(:,1)=Pmax1(:,3); % час поверхні
% % капіляр 1
Pmax2(end+1,2)=EquilibriumPmax2_Extrap;% додати до масиву максимумів тиску його екстрапольоване
рівноважене значення
Pmax2(end,3)=EquilibriumTimeSec;
for licul=1:length(Pmax2(:,1))
DST2(licul,2)=iterformul1(Pmax2(licul,2),delta_ro,r1,H2_3-ErrorH);
end
DST2(:,1)=Pmax2(:,3); % час поверхні
% % капіляр 3
Pmax3(end+1,2)=EquilibriumPmax3_Extrap;% додати до масиву максимумів тиску його екстрапольоване
рівноважене значення
Pmax3(end,3)=EquilibriumTimeSec;
for licul=1:length(Pmax3(:,1))
DST3(licul,2)=iterformul1(Pmax3(licul,2),delta_ro,r2,H2_3);
end
DST3(:,1)=Pmax3(:,3); % час поверхні
DST1=sortrows(DST1,1); % посортувати DST по часу поверхні
DST2=sortrows(DST2,1); % посортувати DST по часу поверхні
DST3=sortrows(DST3,1); % посортувати DST по часу поверхні

```

Продовження додатку П

```

%%%%%%%%%% апроксимація ДПН
figure; grid on hold on
if TypeDeterminedST==1
[cfunPDST1,gofDST1]=fit(DST1(1:end,1),DST1(1:end,2),fitype('power2'));
[cfunPDST2,gofDST2]=fit(DST2(1:end,1),DST2(1:end,2),fitype('power2'));
[cfunPDST3,gofDST3]=fit(DST3(1:end,1),DST3(1:end,2),fitype('power2'));
%%%%%%%%%% розрахунок усередненого DST
cfunPDST1_Evaluated=feval(cfunPDST1,[0.01:0.01:0.5,0.6:0.1:1,1:1:10,11:10:EquilibriumTimeSec]);
cfunPDST2_Evaluated=feval(cfunPDST2,[0.01:0.01:0.5,0.6:0.1:1,1:1:10,11:10:EquilibriumTimeSec]);
cfunPDST3_Evaluated=feval(cfunPDST3,[0.01:0.01:0.5,0.6:0.1:1,1:1:10,11:10:EquilibriumTimeSec]);
cfunPDST_Average(:,2)=(cfunPDST1_Evaluated+cfunPDST2_Evaluated+cfunPDST3_Evaluated)/3;
cfunPDST_Average(:,1)=[0.01:0.01:0.5,0.6:0.1:1,1:1:10,11:10:EquilibriumTimeSec];
fplot(cfunPDST1,[min([DST1(1,1) DST2(1,1) DST3(1,1)]) max([DST1(end,1) DST2(end,1) DST3(end,1)])],'-g');
fplot(cfunPDST2,[min([DST1(1,1) DST2(1,1) DST3(1,1)]) max([DST1(end,1) DST2(end,1) DST3(end,1)])],'-b');
fplot(cfunPDST3,[min([DST1(1,1) DST2(1,1) DST3(1,1)]) max([DST1(end,1) DST2(end,1) DST3(end,1)])],'-r');
plot(cfunPDST_Average(:,1),cfunPDST_Average(:,2),'d','MarkerEdgeColor','m','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',3);
fid=fopen('myDST_Average.txt','w');
fprintf(fid,'%f %f\n', [cfunPDST_Average(:,1);cfunPDST_Average(:,2)]);
fclose(fid);
end
%% запис ДПН для кожного файлу в окремі файли
fid=fopen('myDST_Capillary1.txt','w');
fprintf(fid,'%f %f %f\n', [DST1(:,1);DST1(:,2);Pmax1(:,2)]);
fclose(fid);
fid=fopen('myDST_Capillary2.txt','w');
fprintf(fid,'%f %f %f\n', [DST2(:,1);DST2(:,2);Pmax2(:,2)]);
fclose(fid);
fid=fopen('myDST_Capillary3.txt','w');
fprintf(fid,'%f %f %f\n', [DST3(:,1);DST3(:,2);Pmax3(:,2)]);
fclose(fid);
% mytimenow=clock;
% name=strcat('DST', num2str(mytimenow(1)), '_' , num2str(mytimenow(2)) , '_' ,num2str(mytimenow(3)) , '_'
,num2str(mytimenow(4)), '_' ,num2str(mytimenow(5)), '_' ,num2str(mytimenow(6)), '_');
% eval(['!mkdir ' name]) % створення папки
% copyfile('myDST_Capillary1.txt',name); % копіювання файлів
% copyfile('myDST_Capillary2.txt',name); % копіювання файлів
% copyfile('myDST_Capillary3.txt',name); % копіювання файлів
%%%%%%%%%% розрахунок площі для різних капілярів
% для першого капіляра
AreaForCapillary1(:,2)=FoundAreaFor_DST_r_Pmax(DST1(:,2),r1,Pmax1(:,2));

```

Продовження додатку П

```

AreaForCapillary1(:,1)=DST1(:,1);
% для другого капіляра
AreaForCapillary2(:,2)=FoundAreaFor_DST_r_Pmax(DST2(:,2),r1,Pmax2(:,2));
AreaForCapillary2(:,1)=DST2(:,1);
% для третього капіляра
AreaForCapillary3(:,2)=FoundAreaFor_DST_r_Pmax(DST3(:,2),r2,Pmax3(:,2));
AreaForCapillary3(:,1)=DST3(:,1);
subplot(2,1,1);
plot(AreaForCapillary1(:,1),AreaForCapillary1(:,2),'-s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',5);
hold on
plot(AreaForCapillary2(:,1),AreaForCapillary2(:,2),'-d','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
legend(strcat('Площа(капіляр1,r=',num2str(r1,'%g'),'м2'),strcat('Площа(капіляр2,r=',num2str(r1),'м2')));
subplot(2,1,2);
plot(AreaForCapillary3(:,1),AreaForCapillary3(:,2),'-v','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
legend(strcat('Площа(капіляр3,r=',num2str(r2),'м')');
figure;
hold on
plot(DST1(:,1),DST1(:,2),'s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',5);
plot(DST2(:,1),DST2(:,2),'d','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
plot(DST3(:,1),DST3(:,2),'v','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
if TypeDetermineDST==1
legend(strcat('ДПН(капіляр1,r=',num2str(r1,'%g'),'м,H=',num2str(H1),'м)'),'ДПН(капіляр1)апрокс.',strcat('ДПН(капіляр2
,r=',num2str(r1),'м,H=',num2str(H2_3),'м)'),'ДПН(капіляр2)апрокс.',strcat('ДПН(капіляр3,r=',num2str(r2),'м,H=',num2str
(H2_3),'м)'),'ДПН(капіляр3)апрокс.','ДПНсер.');
```

```

else
legend(strcat('ДПН(капіляр1,r=',num2str(r1,'%g'),'м,H=',num2str(H1),'м)'),strcat('ДПН(капіляр2,r=',num2str(r1),'м,H=',n
um2str(H2_3-ErrorH),'м)'),strcat('ДПН(капіляр3,r=',num2str(r2),'м,H=',num2str(H2_3),'м')));
end
NameLiquid='Вода дист.';
TempLiquid='20';
title(strcat('Залежність ДПН: ' Рівноважний поверхневий натяг рідини становить: ',
,num2str(myround(EquilibriumIterResult_sigma*1000,1)), ' мН/м;', ' Густина рідини:', num2str(myround(delta_ro,1)), '
кг/м^3;', ' Глибина занурення 2-го і 3-го капілярів:', num2str(myround(H2_3*1000,1)), ' мм;', ' Рідина: ', '
',NameLiquid, ' Т-ра: ', ' ',TempLiquid, ' C'));
xlabel('Час існування поверхні, с');
ylabel('ДПН, Н/м');
grid on
function Cap_const_a=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)
Cap_const_a=(sqrt(sigma/(g*delta_ro))); % формула розрхунку капілярної сталої
end

```

Продовження додатку П

```

function z0=z0(r,sigma, delta_ro, g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
z0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168*r_a-
36.990684667380286*r_a^2+43.823733638082880*r_a^3-
25.646434108785900*r_a^4+6.616357594546090*r_a^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240*r_a+42.636406466905065*r_a^2-
21.468316667902630*r_a^3+2.900558342028609*r_a^4+r_a^5));
end
function R0=R0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
x=r_a;
w=2.064006154225540;
a0=7.538335628900215;
a1=-0.949653873696233;
b1=-11.732394127778775;
a2=-8.706697763134265;
b2=-0.570453267792374;
a3=-1.049907159035991;
b3=5.769903690006246;
a4=3.162638328628503;
b4=0.894258757353888;
a5=0.548176726783395;
b5=-1.411823364440087;
a6=-0.487164305772356;
b6=-0.237015527609773;
a7=-0.071153087516410;
b7=0.117899637375715;
a8=0.016604248643217;
b8=0.011194689911517;
R0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*(a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) +
a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +a6*cos(6*x*w) +
b6*sin(6*x*w) + a7*cos(7*x*w) + b7*sin(7*x*w) +a8*cos(8*x*w) + b8*sin(8*x*w));
end
function [z]=iterformul1(Pmax,delta_ro,r,H)
f=@(sigma)((R0(r,sigma, delta_ro, g)/2)*(Pmax-delta_ro*g*(H+z0(r,sigma, delta_ro, g)))-sigma) % формула розрахунку
ПН
z=fzero(f,[1e-3 100e-3])% функція пошуку ПН в діапазоні від 10 до 100 мН/м
end

```

Продовження додатку II

```

function CorrectedPressure=TakeAccountOfDymamicPressure
(DiffPressureInmomentMPB,myPressureForClosedCapillaries,myDiffPressureForClosedCapillaries,
MeasuredPressure,MyresistanceCapillary)
% тут будемо вираховувати величину пневматичного (динамічного) тиску
% Pmax3(:,7) % середнє значення перепаду тиску через систему в момент максимуму тиску
MyresistanceFlowCapillary=(8*15.11e-6*12.17e-3)/(pi*(0.18e-3)^4);
Q1=DiffPressureInmomentMPB./MyresistanceFlowCapillary; % витрата Q1 через систему в момент МТБ
resistanceCapillaryRegulatorOfPressure=myPressureForClosedCapillaries./(myDiffPressureForClosedCapillaries./Myresista
nceFlowCapillary);
Q3=MeasuredPressure./resistanceCapillaryRegulatorOfPressure;
Q2=Q1-Q3;
P_dunamic=Q2.*MyresistanceCapillary;
CorrectedPressure=MeasuredPressure-P_dunamic;
end
function[myEquilibriumTimeSec] =FoundmyEquilibriumTimeSec(Pmax1,Pmax2,Pmax3)
%%%%%%%%% вивід графіків тиску
plot(Pmax1(1:end,3),Pmax1(1:end,2),'-s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',10);
hold on
plot(Pmax2(1:end,3),Pmax2(1:end,2),'-s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
grid on
hold on
xlabel('Час існування поверхні, с');
ylabel('Pmax, Па');
title(strcat('Залежність максимального тиску від часу поверхні'));
plot(Pmax3(1:end,3),Pmax3(1:end,2),'-s','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','m','MarkerSize',10);
grid on
title(strcat('Залежність максимального тиску від часу поверхні'));
xlabel('Час існування поверхні, с');
ylabel('Pmax, Па');
MinEquilibriumTime=10;
MaxEquilibriumTime=3600;
% ручне введення моменту рівноважного максимального тиску
prompt = {'Введіть значення рівноважного часу, за який рівноважний тиск наступив для кожного із 3 капілярів
діапазоні від ' num2str(MinEquilibriumTime) ' до ' num2str(MaxEquilibriumTime) ' секунд' };
dlg_title = 'Введення рівноважного часу експерименту';
num_lines = 1;
def = {'180'};
options.WindowStyle='normal';
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def,options);
myEquilibriumTimeSec=180;

```

Продовження додатку П

```
[val status] = str2num(answer{1}); % Use curly bracket for subscript
if status
if val>=MinEquilibriumTime && val<= MaxEquilibriumTime
myEquilibriumTimeSec=val;
else
errordlg('Невірно задане значення рівноважного часу')
end endend
function Result=myround(Data,NumberValueAfterPoint)
Result=floor(Data)+(round(abs(Data-floor(Data)).*10^NumberValueAfterPoint))./10^NumberValueAfterPoint;
end
function [Area]=FoundAreaFor_DST_r_Pmax(DST,r,Pmax)
sigma_rPmax=DST./(r.*Pmax);
A_r2=9.911362456750386-3.248419678332252*sigma_rPmax-
0.914388427259476*sigma_rPmax.^2+2.097047640478529*sigma_rPmax.^3+0.233595541291354*sigma_rPmax.^4-
1.126647195804200*sigma_rPmax.^5-
0.074827483513700*sigma_rPmax.^6+0.359625009513585*sigma_rPmax.^7+0.008692748274247*sigma_rPmax.^8-
0.044779999979488*sigma_rPmax.^9;
Area=A_r2*r.^2;
end
```

Додаток Р

**Методика повірки трикапілярного пристрою ВПН-3 для дослідження
поверхневого натягу рідин і розчинів поверхнево-активних речовин**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**Трикапілярний пристрій**

**для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів поверхнево-
активних речовин**

ВПН-3**МЕТОДИКА ПОВІРКИ****(проект)**

Продовження додатку Р

Ці методичні вказівки поширюються на трикапілярні пристрої ВПН-3, які призначені для дослідження поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР на границі рідина–газ.

Міжповірочний інтервал трикапілярних пристроїв ВПН-3 становить 1 рік. Основні технічні характеристики пристрою ВПН-3 наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Показник	Значення
1. Діапазон дослідження поверхневого натягу рідин σ , мН/м	від 10 до 100
2. Діапазон дослідження густин рідин відносно повітря, кг/м ³ , де σ – значення поверхневого натягу рідин у мН/м	від 10σ до 100σ
2. Довірча похибка визначення поверхневого натягу рідин, мН/м	згідно рис. 1.1
3. Часовий діапазон дослідження динамічного поверхневого натягу рідин (інтервал часу між бульбашками), с	від 0,1 до 50 000
4. Робоча температура, °С	від 0 до 95
5. Термін безперервної роботи пристрою, год	24
6. Споживана потужність, Вт	28
7. Габаритні розміри пристрою, мм	240x285x140
8. Маса пристрою, кг	10
12. Інтерфейс підключення до персонального комп'ютера	RS-232, USB

1. ОПЕРАЦІЇ ПОВІРКИ

1.1. При проведенні повірки повинні бути проведені операції, які наведені в таблиці 1.2.

2. ЗАСОБИ ПОВІРКИ

2.1. При проведенні повірки застосовують наступні засоби повірки:

- термометр ТЛ-4 4-А2 с ціною поділки 0,1°С і діапазоном вимірювання від 0 до 100°С згідно ГОСТ 27 544-87;

Продовження додатку Р

- IBM-сумісний персональний комп'ютер;
- підйомний столик з кроком піднімання\опускання $1,5 \pm 1$ мм;
- штатив для встановлення планки із трьома вимірювальними капілярами;

2.1.1. Промивні рідини:

- етиловий спирт 1-го сорту згідно ГОСТ 18300-87;
- хромова суміш (двохромовий калій (60 г)) згідно ГОСТ 4220-75;
- сірчана кислота (1 л) згідно ГОСТ 4204-77;
- дистильована вода (1л) згідно ГОСТ 6709-72;
- авіаційний бензин (0,5 л) згідно ГОСТ 1012-72.

2.1.2. Еталонні рідини, які відповідають ДСТУ ГОСТ 8.428:2009:

- дистильована вода (50 мл);
- водні розчини етанолу (50 мл) з концентраціями: 10%; 50%;100%.

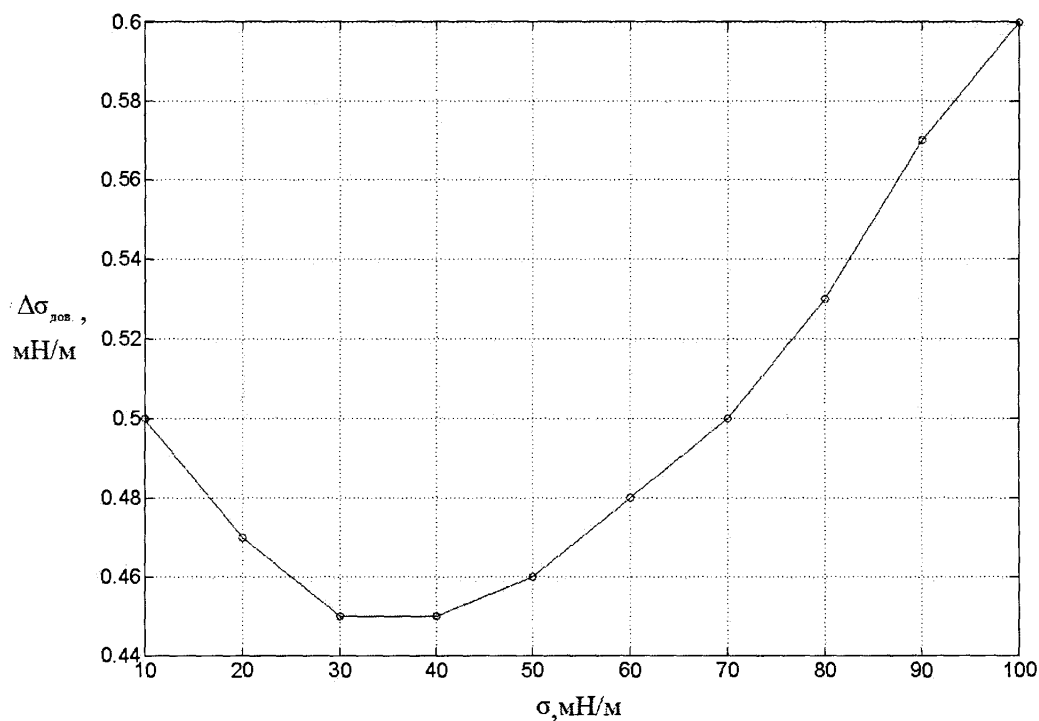


Рис. 1.1. Залежність довірчої похибки $\Delta\sigma_{\text{дов.}}$ від ПН рідини σ

Допускається застосування інших засобів повірки, які пройшли метрологічну атестацію в органах державної метрологічної служби і задовольняють дані метрологічні вказівки по метрологічним характеристикам.

Продовження додатку Р

Таблиця 1.2

Найменування операції	Номер пункту методики повірки	Проведення операцій	
		Первинна повірка	Періодична повірка
1. Загальний огляд пристрою	п.6.1	Так	Так
2. Здійснення діагностики (опробування) пристрою	п.6.2	Так	Так
3. Визначення довірчої похибки визначення поверхневого натягу рідин	п.6.3	Так	Так

3. УМОВИ ПОВІРКИ

3.1. При проведенні повірки в приміщенні повинні бути дотримані наступні

умови:

- температура повітря: $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- атмосферний тиск: $86 \div 106$ кПа;
- відносна вологість повітря при вказаній температурі: $30 \div 80\%$;
- напруга живлення електричної мережі: $220 \pm 5\text{В}$;
- частота змінного струму електричної мережі 50 ± 1 Гц;
- відсутність вібрацій, ударів, протягів повітря, а також надмірних електричних чи магнітних полів, які можуть впливати на роботу пристрою.

4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

4.1. Приміщення для проведення повірки повинно відповідати пожежним, санітарно-гігієнічним вимогам та вимогам техніки безпеки при роботі з побутовим електрообладнанням. В приміщенні повинна бути встановлена пожежна сигналізація та наявні засоби пожежогасіння згідно ГОСТ 12.4.009-83.

Продовження додатку Р

4.2. При роботі з легкозаймистими і шкідливими для здоров'я людини речовинами, якими є деякі промивні рідини та еталонні рідини, слід працювати з підвищеною обережністю у резинових рукавицях, в захисному халаті та окулярах.

5. ПІДГОТОВКА ДО ПОВІРКИ

5.1. Перед проведенням повірки необхідно здійснити наступні операції.

5.2. Запустити на персональному комп'ютері програмний комплекс ВПН-3.

5.3. В основному меню програмного комплексу ВПН-3 вибрати пункт «Налаштувати пристрій».

5.4. Керуючись підказками діалогових вікон програмного комплексу ВПН-3 здійснити та перевірити підключення пристрою до електричної мережі та персонального комп'ютера.

5.5. Керуючись підказкою відповідного діалогового вікна запустити режим продування трикапілярного пристрою;

5.6. Ретельно промити вимірювальні капіляри за наступною послідовністю:

- занурити капіляри в посудину з гарячою водою на 5 хв., а потім ще на 5 хв. при увімкненому режимі продування системи;
- при ймовірному забрудненні, яке не змивається водою, занурити капіляри у посудину з хромовою сумішшю на 5 хв.;
- занурити капіляри в посудину з дистильованою водою на 5 хв. при вимкненому режимі продування системи, а потім ще на 5 хв. при увімкненому режимі продування системи;
- встановити капіляри у навколишнє середовище (в порожню посудину) при увімкненому режимі продування системи на 5 хв.;
- при забрудненні капілярів нафтопродуктами чи іншими органічними речовинами занурити капіляри в посудину з бензином на 5 хв., а потім ще на 5 хв. при увімкненому режимі продування системи, а після цього повторити вище наведені пункти промивання.

Продовження додатку Р

6. ПРОВЕДЕННЯ ПОВІРКИ

6.1 Зовнішній огляд.

6.1.1. Провести загальний огляд пристрою на наявність будь-яких зовнішніх дефектів та ушкоджень вимірювальних капілярів. В разі їх виявлення повірка пристрою не допускається.

6.1.2. Перевірити на задній стінці трикапілярного пристрою наявність усіх необхідних маркувань (позначення похибки пристрою, найменування виробника, рік випуску пристрою тощо).

6.1.3. Зазначити результати огляду у протоколі повірки пристрою.

6.2. Здійснити автоматизовану процедуру діагностики (опробування) пристрою.

6.2.1. Встановити на штативі планку із трьома вимірювальними капілярами строго вертикально вниз.

6.2.2. В основному меню програмного комплексу ВПН-3 вибрати пункт «Провести діагностику\налаштування пристрою».

6.2.3. В разі заміни вимірювальних капілярів (тільки при першому випадку їх застосування) слід погодитися на запис нових параметрів калібрування у відповідному діалоговому вікні. Перед їх заміною слід упевнитися у правильності роботи вимірювального блоку пристрою шляхом відмови від запису нових параметрів калібрування та одержання відповідного інформаційного повідомлення про успішний результат діагностики з попереднім комплектом капілярів.

6.2.4. При невдалому результаті провести повторне налаштування пристрою згідно п. 5.3–5.4 та за необхідності повторно промити капіляри згідно п. 5.6.

6.2.5. При кількох невдалих спробах здійснити успішну діагностику пристрою (не менше 3 спроб із інтервалом в 20 хв. при увімкненому та

Продовження додатку Р

налаштованому згідно п. 5.3 пристрої) робиться висновок про несправність пристрою.

6.2.6 В разі позитивного результату проходження процедури діагностики провести процедуру повірки пристрою.

6.3. Визначення довірчої похибки визначення ПН рідин.

6.3.1. За допомогою підйому до планки з капілярами столика із посудиною, що містить дистильовану воду, занурити три вимірювальні капіляри на глибину занурення другого і третього капілярів близько 7 – 8 мм.

6.3.2. В основному меню запущеного програмного комплексу ВПН-3 вибрати пункт «Провести вимірювання».

6.3.3. Зачекати доки пристрій здійснить декілька процедур автоматизованого вимірювання ПН рідини на даній глибині (не менше 3) і зупинити вимірювання шляхом вибору пункту меню «Зупинити вимірювання».

6.3.4. За допомогою підйому столика занурити три вимірювальні капіляри на глибину занурення другого і третього капілярів 9 – 10 мм і повторно виконати п.6.3.2 –6.3.3.

6.3.5. Занурити три вимірювальні капіляри на глибину занурення другого і третього капілярів 11 – 12 мм і повторно виконати п. 6.3.2 –6.3.3.

6.3.6. За допомогою опускання столику почергово занурити у зворотному напрямі вимірювальні капіляри на глибину занурення другого і третього капілярів: 10–11 мм, 8 – 9 мм, 6 – 7 мм, відповідно, і повторити п. 6.3.2 –6.3.3.

6.3.7 Точність встановлення глибини занурення другого і третього капілярів є неважливою, але мінімальне значення цієї глибини не повинно бути менше 5 мм.

6.3.8. Визначені значення ПН рідини на різних глибинах занурення при прямому і зворотному напрямку зміни глибини занурення капілярів $\sigma_{\text{визн.}}$ записують у протокол повірки трикапілярного пристрою.

6.3.9. Аналогічно здійснити п. 6.3.1 –6.3.8 з водними розчинами етанолу з

Продовження додатку Р

концентраціями: 10%; 50%; 100%.

6.3.10. За допомогою залежності (6.1) розрахувати абсолютну похибку вимірювання:

$$\Delta = \sigma_{\text{визн.}} - \sigma_{\text{етал.}} \quad (6.1)$$

6.3.11. Трикапілярний пристрій ВПН-3 успішно проходить повірку, якщо максимальне значення Δ для відповідного визначеного ПН рідини σ не перевищує значення, яке задане на рис. 1.1.

7. ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОВІРКИ

7.1. На пристрій, який пройшов повірку після його випуску з виробництва, видається свідоцтво про повірку із записом її результатів, завірену повірником із нанесенням повірочного тавра.

7.2. В паспорті пристрою приводять запис результатів повірки, завірену повірником із нанесенням повірочного тавра.

7.3. На пристрій, який пройшов повірку на місці його експлуатації або ремонту, в паспорті пристрою приводять запис про придатність пристрою до застосування із вказівкою дати повірки, наступної дати повірки, завірений повірником із нанесенням повірочного тавра.

7.4. При непроходженні повірки в паспорті пристрою приводять запис про непридатність пристрою до застосування, який завіряється повірником із нанесенням повірочного тавра.

Додаток С

Програма автоматичного визначення довірчих границь похибки

Визначення поверхневого натягу рідини і різниці густин рідини та газу

```
function [DovInterval_Sigma DovGranSystemPoh_delta_ro]=DovIntervalSigma(sigma, delta_ro,H,numberValue)
clc
format short
Pmax1vum=iterformul1_cap(3.193676578699388e-04,sigma,H-4.115e-3,delta_ro)
Pmax2vum=iterformul1_cap(3.193676578699388e-04,sigma,H,delta_ro)
Pmax3vum=iterformul1_cap(4.959711675854401e-04,sigma,H,delta_ro)
if numberValue==2
CoeffStudent=12.7;
elseif numberValue==3
CoeffStudent=4.303;
elseif numberValue==4
CoeffStudent=3.182;
elseif numberValue==5
CoeffStudent=2.776;
elseif numberValue==6
CoeffStudent=2.571;
elseif numberValue==7
CoeffStudent=2.447;
elseif numberValue==8
CoeffStudent=2.365;
elseif numberValue==9
CoeffStudent=2.306;
elseif numberValue==10
CoeffStudent=2.262;
end
% для r1 та r2
% Pmax2vum=50.8553*9.8;
% Pmax3vum=34.4275*9.8;
% для dh
% Pmax2vum=50.8553.*9.8;
% Pmax1vum=46.7403.*9.8;
g=9.8;% відома величина
% тут задаються вхідні вимірювальні параметри
RadiusProtichnuiCapillary=0.18e-3;% задаються як відомі
LengthProtichnuiCapillary=12.17e-3;% задаються як відомі
%% калібрування
% розрахунок похибки визначення опорів вимірювальних капілярів

Продовження додатку С

% капіляр 3
```

```

syms MeanTempPressure3 MeanTempDiffPressure3 TempCalibrCapillary3
resistanceCapillary3=MeanTempPressure3.*1e-3/(MeanTempDiffPressure3.*1e-3/((8.*((1.316639550910963e-
05+1.048462472822758e-07.*TempCalibrCapillary3-5.897306275183749e-
10.*TempCalibrCapillary3^2+5.753710345600439e-
12.*TempCalibrCapillary3^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary)^4)));
diff_resistanceCapillary3_MeanTempPressure3=abs(diff(resistanceCapillary3,MeanTempPressure3));
diff_resistanceCapillary3_MeanTempDiffPressure3=abs(diff(resistanceCapillary3,MeanTempDiffPressure3));
diff_resistanceCapillary3_TempCalibrCapillary3=abs(diff(resistanceCapillary3,TempCalibrCapillary3));
% капіляр 3
MeanTempPressure3=0.9.*9.8;
StdMeanTempPressure3=0.02431.*9.8;
NumberMeanTempPressure3=1000;
MeanTempDiffPressure3=111.9.*9.8;
StdMeanTempDiffPressure3=0.05542.*9.8;
NumberMeanTempDiffPressure3=1000;
TempCalibrCapillary3=20;
StdTempCalibrCapillary3=0.034;
NumberTempCalibrCapillary3=1435;
% оцінка випадкової похибки визначення опору третього капіляру
% розрахунок середнього значення опору третього капіляру
resistanceCapillary3mean=3.6042e+006;
std_resistanceCapillary3=9.6567e+004;
std_resistanceCapillary3mean=std_resistanceCapillary3/sqrt(1000);
% оцінка систематичної похибки визначення опору третього капіляру
LimitMeanTempPressure3=0.3;
LimitMeanTempDiffPressure3=3;
LimitTempCalibrCapillary3=0.5;
% граничне значення похибки
GranresistanceCapillary3_SystemPohubku=eval(diff_resistanceCapillary3_MeanTempPressure3.*LimitMeanTempPressur
e3+diff_resistanceCapillary3_MeanTempDiffPressure3.*LimitMeanTempDiffPressure3+diff_resistanceCapillary3_TempC
alibrCapillary3.*LimitTempCalibrCapillary3);
v_GranresistanceCapillary3_SystemPohubku_std_resistanceCapillary3mean=GranresistanceCapillary3_SystemPohubku/st
d_resistanceCapillary3mean;
% капіляр 2
syms MeanTempPressure2 MeanTempDiffPressure2 TempCalibrCapillary2
resistanceCapillary2=MeanTempPressure2.*1e-3/(MeanTempDiffPressure2.*1e-3/((8.*((1.316639550910963e-
05+1.048462472822758e-07.*TempCalibrCapillary2-5.897306275183749e-
10.*TempCalibrCapillary2^2+5.753710345600439e-
12.*TempCalibrCapillary2^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary)^4)));

```

Продовження додатку С

```

diff_resistanceCapillary2_MeanTempPressure2=abs(diff(resistanceCapillary2,MeanTempPressure2));

```



```

diff_resistanceCapillary2_MeanTempDiffPressure2=abs(diff(resistanceCapillary2,MeanTempDiffPressure2));
diff_resistanceCapillary2_TempCalibrCapillary2=abs(diff(resistanceCapillary2,TempCalibrCapillary2));
% капіляр 2
MeanTempPressure2=2.19.*9.8;
StdMeanTempPressure2=0.02753.*9.8;
NumberMeanTempPressure2=1000;
MeanTempDiffPressure2=110.6.*9.8;
StdMeanTempDiffPressure2=0.0772.*9.8;
NumberMeanTempDiffPressure2=1000;
TempCalibrCapillary2=20;
StdTempCalibrCapillary2=0.032;
NumberTempCalibrCapillary2=1445;
% оцінка систематичної похибки визначення опору другого капіляру
LimitMeanTempPressure2=0.3;
LimitMeanTempDiffPressure2=3;
LimitTempCalibrCapillary2=0.5;
% граничне значення похибки другого капіляру
GranresistanceCapillary2_SystemPohubku=eval(diff_resistanceCapillary2_MeanTempPressure2.*LimitMeanTempPressure2+diff_resistanceCapillary2_MeanTempDiffPressure2.*LimitMeanTempDiffPressure2+diff_resistanceCapillary2_TempCalibrCapillary2.*LimitTempCalibrCapillary2);
% капіляр 1
syms MeanTempPressure1 MeanTempDiffPressure1 TempCalibrCapillary1
resistanceCapillary1=MeanTempPressure1.*1e-3/(MeanTempDiffPressure1.*1e-3/((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-07.*TempCalibrCapillary1-5.897306275183749e-10.*TempCalibrCapillary1^2+5.753710345600439e-12.*TempCalibrCapillary1^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary)^4)));
diff_resistanceCapillary1_MeanTempPressure1=abs(diff(resistanceCapillary1,MeanTempPressure1));
diff_resistanceCapillary1_MeanTempDiffPressure1=abs(diff(resistanceCapillary1,MeanTempDiffPressure1));
diff_resistanceCapillary1_TempCalibrCapillary1=abs(diff(resistanceCapillary1,TempCalibrCapillary1));
% капіляр 1
MeanTempPressure1=2.392.*9.8;
StdMeanTempPressure1=0.02713.*9.8;
NumberMeanTempPressure1=1000;
MeanTempDiffPressure1=109.7.*9.8;
StdMeanTempDiffPressure1=0.08334.*9.8;
NumberMeanTempDiffPressure1=1000;
TempCalibrCapillary1=20;
StdTempCalibrCapillary1=0.03;
NumberTempCalibrCapillary1=1429;

```

Продовження додатку С

```

% оцінка систематичної похибки визначення опору першого капіляру

```

```

LimitMeanTempPressure1=0.3;
LimitMeanTempDiffPressure1=3;
LimitTempCalibrCapillary1=0.5;
% граничне значення похибки першого капіляру
GranresistanceCapillary1_SystemPohubku=eval(diff_resistanceCapillary1_MeanTempPressure1.*LimitMeanTempPressure1+diff_resistanceCapillary1_MeanTempDiffPressure1.*LimitMeanTempDiffPressure1+diff_resistanceCapillary1_TempCalibrCapillary1.*LimitTempCalibrCapillary1);
% знайти граничне значення визначення опору регулятора тиску R3
syms MeanTempPressureR3 MeanTempDiffPressureR3 TempCalibrCapillaryR3
resistanceCapillaryR3=MeanTempPressureR3.*1e-3/(MeanTempDiffPressureR3.*1e-3/((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-07.*TempCalibrCapillaryR3-5.897306275183749e-10.*TempCalibrCapillaryR3^2+5.753710345600439e-12.*TempCalibrCapillaryR3^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary)^4)));
diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempPressureR3=abs(diff(resistanceCapillaryR3,MeanTempPressureR3));
diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempDiffPressureR3=abs(diff(resistanceCapillaryR3,MeanTempDiffPressureR3));
diff_resistanceCapillaryR3_TempCalibrCapillaryR3=abs(diff(resistanceCapillaryR3,TempCalibrCapillaryR3));
% оцінка систематичної похибки визначення опору регулятора тиску в двох крайніх точках в нижній межі 10 мм води і верхній межі 60 мм води
MeanTempPressureR3=60.*9.8;% верхня межа
MeanTempDiffPressureR3=55.7.*9.8;
TempCalibrCapillaryR3=20;
LimitMeanTempPressureR3=0.3;
LimitMeanTempDiffPressureR3=3;
LimitTempCalibrCapillaryR3=0.5;
% граничне значення похибки регулятора тиску
GranresistanceCapillaryR3_SystemPohubku_Low=eval(diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempPressureR3.*LimitMeanTempPressureR3+diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempDiffPressureR3.*LimitMeanTempDiffPressureR3+diff_resistanceCapillaryR3_TempCalibrCapillaryR3.*LimitTempCalibrCapillaryR3);
MeanTempPressureR3=10.*9.8;% нижня межа
MeanTempDiffPressureR3=98.8.*9.8;
TempCalibrCapillaryR3=20;
GranresistanceCapillaryR3_SystemPohubku_High=eval(diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempPressureR3.*LimitMeanTempPressureR3+diff_resistanceCapillaryR3_MeanTempDiffPressureR3.*LimitMeanTempDiffPressureR3+diff_resistanceCapillaryR3_TempCalibrCapillaryR3.*LimitTempCalibrCapillaryR3);
%%%%%%%%%%%%%% результати розрахунку похибки калібровки
GranresistanceCapillary1_SystemPohubku
GranresistanceCapillary2_SystemPohubku
GranresistanceCapillary3_SystemPohubku
%% завершення процедури калібрування

```

Продовження додатку С

```

% оцінка граничних похибок вимірювання максимального тиску

```

```

% капіляр 3
syms Pmax3vumMeas Pr13 TempMeasCapillary3 resistanceMeasCapillaryR33 resistanceCapillary3
Pmax3=Pmax3vumMeas-resistanceCapillary3.*(Pr13./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary3-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary3.^2+5.753710345600439e-
12.*TempMeasCapillary3.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4))-
Pmax3vumMeas./resistanceMeasCapillaryR33);
diff_Pmax3_Pmax3vumMeas=diff(Pmax3,Pmax3vumMeas);
diff_Pmax3_Pr13=diff(Pmax3,Pr13);
diff_Pmax3_TempMeasCapillary3=diff(Pmax3,TempMeasCapillary3);
diff_Pmax3_resistanceMeasCapillaryR33=diff(Pmax3,resistanceMeasCapillaryR33);
diff_Pmax3_resistanceCapillary3=diff(Pmax3,resistanceCapillary3);
Pmax3vumMeas=Pmax3vum;
Pr13=110.*9.8-Pmax3vumMeas;
TempMeasCapillary3=20;
resistanceMeasCapillaryR33=(Pmax2vum+50)/(Pr13./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary3-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary3.^2+5.753710345600439e-
12.*TempMeasCapillary3.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4)));
resistanceCapillary3=3.5790e+06;
%% оцінка випадкової похибки
% оцінка випадкової похибки визначення опору третього капіляру
StdPmax3vum3=0.22;
StdMeanTempMeasDiffPressure3=0.42;
StdTempMeasCapillary3=0.25;
NumberTempMeasCapillary3=20;
std_Pmax3 =0.2;
std_mean_Pmax3 =std_Pmax3/sqrt(numberValue);
LimitPressure=0.3;
LimitDiffPressure=3;
LimitTemp=0.5;
DovGranresistancePmax3=eval(1.96/sqrt(3)).*sqrt(diff_Pmax3_Pmax3vumMeas^2.*LimitPressure^2+diff_Pmax3_Pr13^2.
*LimitDiffPressure^2+diff_Pmax3_TempMeasCapillary3^2.*LimitTemp^2+diff_Pmax3_resistanceMeasCapillaryR33^2.*
GranresistanceCapillaryR3_SystemPohubku_Low^2+diff_Pmax3_resistanceCapillary3^2.*GranresistanceCapillary3_Syst
emPohubku^2))
Vidnosh_DovGranresistancePmax3_std_mean_Pmax3=DovGranresistancePmax3/std_mean_Pmax3;
DovGranresistancePmax3VupakPoh=CoeffStudent.*std_mean_Pmax3; % 3.182 для vi=n-1=4-1=3
DovGranresistancePmax3_sum=0.8.*(DovGranresistancePmax3+DovGranresistancePmax3VupakPoh)
% аналогічно знайдемо похибку для другого капіляру
syms Pmax2vumMeas Pr12 TempMeasCapillary2 resistanceMeasCapillaryR32 resistanceCapillary2

```

Продовження додатку С

```

Pmax2=Pmax2vumMeas-resistanceCapillary2.*(Pr12./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary2-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary2.^2+5.753710345600439e-
12.*TempMeasCapillary2.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4))-
Pmax2vumMeas./resistanceMeasCapillaryR32);
diff_Pmax2_Pmax2vumMeas=diff(Pmax2,Pmax2vumMeas);
diff_Pmax2_Pr12=diff(Pmax2,Pr12);
diff_Pmax2_TempMeasCapillary2=diff(Pmax2,TempMeasCapillary2);
diff_Pmax2_resistanceMeasCapillaryR3=diff(Pmax2,resistanceMeasCapillaryR32);
diff_Pmax2_resistanceCapillary2=diff(Pmax2,resistanceCapillary2);
Pmax2vumMeas=Pmax2vum;
Pr12=110.*9.8-Pmax2vumMeas;
TempMeasCapillary2=20;
resistanceMeasCapillaryR32=(Pmax2vum+50)/(Pr12./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary2-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary2.^2+5.753710345600439e-
12.*TempMeasCapillary2.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4)));
resistanceCapillary2=8.8114e+006;
%% оцінка випадкової похибки
% оцінка випадкової похибки визначення опору третього капіляру
StdPmax2vum2=0.2;
StdMeanTempMeasDiffPressure2=0.5;
StdTempMeasCapillary2=0.3;
NumberTempMeasCapillary2=20;
std_Pmax2 =0.18;
std_mean_Pmax2 =std_Pmax2/sqrt(numberValue);
DovGranresistancePmax2=eval(1.96/sqrt(3).*sqrt(diff_Pmax2_Pmax2vumMeas^2.*LimitPressure^2+diff_Pmax2_Pr12^2.
*LimitDiffPressure^2+diff_Pmax2_TempMeasCapillary2^2.*LimitTemp^2+diff_Pmax2_resistanceMeasCapillaryR3^2.*
GranresistanceCapillaryR3_SystemPohubku_Low^2+diff_Pmax2_resistanceCapillary2^2.*GranresistanceCapillary2_Syst
emPohubku^2));
Vidnosh_DovGranresistancePmax2_std_mean_Pmax2=DovGranresistancePmax2/std_mean_Pmax2;
DovGranresistancePmax2VupakPoh=CoeffStudent.*std_mean_Pmax2; % 3.182 для vi=n-1=4-1=3
DovGranresistancePmax2_sum=0.8.*(DovGranresistancePmax2+DovGranresistancePmax2VupakPoh)
% аналогічно знайдемо похибку для першого капіляру
syms Pmax1vumMeas Pr11 TempMeasCapillary1 resistanceMeasCapillaryR31 resistanceCapillary1
Pmax1=Pmax1vumMeas-resistanceCapillary1.*(Pr11./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary1-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary1.^2+5.753710345600439e-
12.*TempMeasCapillary1.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4))-
Pmax1vumMeas./resistanceMeasCapillaryR31);
diff_Pmax1_Pmax1vumMeas=diff(Pmax1,Pmax1vumMeas);
diff_Pmax1_Pr11=diff(Pmax1,Pr11);

```

Продовження додатку С

```

diff_Pmax1_TempMeasCapillary1=diff(Pmax1,TempMeasCapillary1);

```

```

diff_Pmax1_resistanceMeasCapillaryR3=diff(Pmax1,resistanceMeasCapillaryR31);
diff_Pmax1_resistanceCapillary1=diff(Pmax1,resistanceCapillary1);
Pmax1vumMeas=Pmax1vum;
Pr11=110.*9.8-Pmax1vumMeas;
TempMeasCapillary1=20;
resistanceMeasCapillaryR31=(Pmax2vum+50)./(Pr11./((8.*((1.316639550910963e-05+1.048462472822758e-
07.*TempMeasCapillary1-5.897306275183749e-10.*TempMeasCapillary1.^2+5.753710345600439e-
11.*TempMeasCapillary1.^3)).*LengthProtichnuiCapillary)/(pi.*(RadiusProtichnuiCapillary).^4)));
resistanceCapillary1= 9.7030e+006;
StdPmax1vum1=0.2;
StdMeanTempMeasDiffPressure1=0.5;
StdTempMeasCapillary1=0.3;
NumberTempMeasCapillary1=20;
std_Pmax1 =0.22;
std_mean_Pmax1 =std_Pmax1/sqrt(numberValue);
DovGranresistancePmax1=eval(1.96/sqrt(3).*sqrt(diff_Pmax1_Pmax1vumMeas^2.*LimitPressure^2+diff_Pmax1_Pr11^2.
*LimitDiffPressure^2+diff_Pmax1_TempMeasCapillary1^2.*LimitTemp^2+diff_Pmax1_resistanceMeasCapillaryR3^2.*
GranresistanceCapillaryR3_SystemPohubku_Low^2+diff_Pmax1_resistanceCapillary1^2.*GranresistanceCapillary1_Syst
emPohubku^2));
Vidnosh_DovGranresistancePmax1_std_mean_Pmax1=DovGranresistancePmax1/std_mean_Pmax1;
DovGranresistancePmax1VupakPoh=CoeffStudent.*std_mean_Pmax1; % 3.182 для vi=n-1=4-1=3
DovGranresistancePmax1_sum=0.8.*(DovGranresistancePmax1+DovGranresistancePmax1VupakPoh)
% оцінка похибки визначення dh
syms Pmax2_mean_For_Radius_Etap2 Pmax1_mean_For_Radius_Etap2 deltar_sample_Liquid
dh=(Pmax2_mean_For_Radius_Etap2-Pmax1_mean_For_Radius_Etap2)/(deltar_sample_Liquid.*g);
diff_dh_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2=diff(dh,Pmax2_mean_For_Radius_Etap2);
diff_dh_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2=diff(dh,Pmax1_mean_For_Radius_Etap2);
diff_dh_deltar_sample_Liquid=diff(dh,deltar_sample_Liquid);
deltar_sample_Liquid=1000; % кг/м3;
GranPohubka_deltar_sample_Liquid=1;% кг/м3;
Pmax2_mean_For_Radius_Etap2=50.8553.*9.8;
Pmax1_mean_For_Radius_Etap2=46.7403.*9.8;
std_Pmax1_For_Radius_Etap2=0.22;
std_Pmax2_For_Radius_Etap2=0.23;
NumberM_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2=100;
NumberM_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2=100;
DovGranresistancePmax2_dh=0.3843;
DovGranresistancePmax1_dh=0.4063;
% знайдемо стандартне відхилення випадкої похибки

```

Продовження додатку С

```

StandartVidhVupPoh_dh=eval(sqrt(diff_dh_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2^2.*std_Pmax2_For_Radius_Etap2^2/NumberM_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2+diff_dh_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2^2.*std_Pmax1_For_Radius_Etap2^2/NumberM_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2));
GranSystemPoh_dh=eval(abs(diff_dh_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2).*DovGranresistancePmax2_dh+abs(diff_dh_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2).*DovGranresistancePmax1_dh+abs(diff_dh_deltaro_sample_Liqiud).*GranPohubka_deltaro_sample_Liqiud);
DovGranSystemPoh_dh=eval(1.96/sqrt(3).*sqrt(diff_dh_Pmax2_mean_For_Radius_Etap2^2.*DovGranresistancePmax2_dh^2+diff_dh_Pmax1_mean_For_Radius_Etap2^2.*DovGranresistancePmax1_dh^2));
DovGranSystemPoh_dh=0.01e-3;
%%% знайдемо похибку визначення густини
syms Pmax2_deltaro Pmax1_deltaro dh
deltaro_Meas=(Pmax2_deltaro-Pmax1_deltaro)/(dh.*g);
diff_deltaro_Pmax2_deltaro=diff(deltaro_Meas,Pmax2_deltaro);
diff_deltaro_Pmax1_deltaro=diff(deltaro_Meas,Pmax1_deltaro);
diff_deltaro_dh=diff(deltaro_Meas,dh);
dh=4.115e-3; % м;
Pmax2_deltaro=eval(Pmax2);
Pmax1_deltaro=eval(Pmax1);
DovGranSystemPoh_deltaro=eval(1.96/sqrt(3).*sqrt(diff_deltaro_Pmax2_deltaro^2.*DovGranresistancePmax2_sum^2+diff_deltaro_Pmax1_deltaro^2.*DovGranresistancePmax1_sum^2+diff_deltaro_dh^2.*DovGranSystemPoh_dh^2))
% визначення похибки радіусів капілярів
% третій капіляр
dh0=0.01e-3;
dR02=2.119e-8;
dz02=1.575e-7;
%GranPohubka_deltaro_sample_Liqiud=1;
GranPohubka_sigma_sample_Liqiud=0.01e-3;
diff_r2_Pmax3= 1.702926056124489e-06;
diff_r2_dh= 0.016808987653415;
diff_r2_dh0=0.016732208746274;
diff_r2_R0= -0.999111499620081;
diff_r2_z0= -0.016735146882692;
diff_r2_deltaro_sample_Liqiud=7.486646117469981e-08;
diff_r2_sigma_sample_Liqiud=0.006890615950170;
DovGranresistancePmax3_r2=0.3639;
GranPohubka_dr2=abs(diff_r2_Pmax3).*DovGranresistancePmax3_r2+abs(diff_r2_dh).*DovGranSystemPoh_dh+abs(diff_r2_dh0).*dh0+abs(diff_r2_R0).*abs(dR02)+abs(diff_r2_z0).*abs(dz02)+abs(diff_r2_deltaro_sample_Liqiud).*GranPohubka_deltaro_sample_Liqiud+abs(diff_r2_sigma_sample_Liqiud).*GranPohubka_sigma_sample_Liqiud
Dov_GranPohubka_dr2=1.96/sqrt(3).*sqrt(abs(diff_r2_Pmax3)^2.*DovGranresistancePmax3_r2^2+abs(diff_r2_dh)^2.*DovGranSystemPoh_dh^2+abs(diff_r2_dh0)^2.*dh0^2+abs(diff_r2_R0)^2.*abs(dR02)^2+abs(diff_r2_z0)^2.*abs(dz02)^2+

```

Продовження додатку С

```

abs(diff_r2_deltaro_sample_Liqiud)^2.*GranPohubka_deltaro_sample_Liqiud^2+abs(diff_r2_sigma_sample_Liqiud)^2.*
GranPohubka_sigma_sample_Liqiud^2)
% аналогічно розрахуємо похибку визначення радіусу першого і другого
% капілярів
dh0=0.01e-3;
dR01=2.119e-8;
dz01=1.575e-7;
diff_r1_Pmax2= 7.041440420072818e-07;
diff_r1_dh=0.006930791316590;
diff_r1_dh0=0.006912079190762;
diff_r1_R0= 1.001351451377164;
diff_r1_z0= 0.006911351482095;
diff_r1_deltaro_sample_Liqiud=3.041627583453372e-08;
diff_r1_sigma_sample_Liqiud=0.004413271623104;
DovGranresistancePmax2_r1=0.3755;
Dov_GranPohubka_dr1=1.96/sqrt(3).*sqrt(abs(diff_r1_Pmax2)^2.*DovGranresistancePmax2_r1^2+abs(diff_r1_dh)^2.*D
ovGranSystemPoh_dh^2+abs(diff_r1_dh0)^2.*dh0^2+abs(diff_r1_R0)^2.*abs(dR01)^2+abs(diff_r1_z0)^2.*abs(dz01)^2+
abs(diff_r1_deltaro_sample_Liqiud)^2.*GranPohubka_deltaro_sample_Liqiud^2+abs(diff_r1_sigma_sample_Liqiud)^2.*
GranPohubka_sigma_sample_Liqiud^2)
w=2.064006154225540;
a0=7.538335628900215;
a1=-0.949653873696233;
b1=-11.732394127778775;
a2=-8.706697763134265;
b2=-0.570453267792374;
a3=-1.049907159035991;
b3=5.769903690006246;
a4=3.162638328628503;
b4=0.894258757353888;
a5=0.548176726783395;
b5=-1.411823364440087;
a6=-0.487164305772356;
b6=-0.237015527609773;
a7=-0.071153087516410;
b7=0.117899637375715;
a8=0.016604248643217;
b8=0.011194689911517;
syms r1 CapStala
R01=CapStala.*(a0 + a1.*cos(r1/CapStala.*w) + b1.*sin(r1/CapStala.*w) +a2.*cos(2.*r1/CapStala.*w) +
b2.*sin(2.*r1/CapStala.*w) + a3.*cos(3.*r1/CapStala.*w) + b3.*sin(3.*r1/CapStala.*w) +a4.*cos(4.*r1/CapStala.*w) +

```

Продовження додатку С

```

b4.*sin(4.*r1/CapStala.*w) + a5.*cos(5.*r1/CapStala.*w) + b5.*sin(5.*r1/CapStala.*w) + a6.*cos(6.*r1/CapStala.*w) +
b6.*sin(6.*r1/CapStala.*w) + a7.*cos(7.*r1/CapStala.*w) + b7.*sin(7.*r1/CapStala.*w) + a8.*cos(8.*r1/CapStala.*w) +
b8.*sin(8.*r1/CapStala.*w));
diff_R01_r1=diff(R01,r1);
%diff_R01_a=diff(R01,a);
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g)); % в метрах
r1=3.193676578699388e-04;
GranPph_R01_max_a=eval(diff_R01_r1.*Dov_GranPohubka_dr1);
Dov_GranPph_R01_max_a=eval(1.1*sqrt(diff_R01_r1^2.*Dov_GranPohubka_dr1^2));
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g));
GranPph_R01_min_a=eval(diff_R01_r1.*Dov_GranPohubka_dr1);
GranPph_R01=max([GranPph_R01_max_a GranPph_R01_min_a])
GranPph_R01=abs(GranPph_R01)+abs(dR01);
% визначення максимальної похибки R02
w=2.064006154225540;
a0=7.538335628900215;
a1=-0.949653873696233;
b1=-11.732394127778775;
a2=-8.706697763134265;
b2=-0.570453267792374;
a3=-1.049907159035991;
b3=5.769903690006246;
a4=3.162638328628503;
b4=0.894258757353888;
a5=0.548176726783395;
b5=-1.411823364440087;
a6=-0.487164305772356;
b6=-0.237015527609773;
a7=-0.071153087516410;
b7=0.117899637375715;
a8=0.016604248643217;
b8=0.011194689911517;
syms r2 CapStala
R02=CapStala.*(a0 + a1.*cos(r2/CapStala.*w) + b1.*sin(r2/CapStala.*w) + a2.*cos(2.*r2/CapStala.*w) +
b2.*sin(2.*r2/CapStala.*w) + a3.*cos(3.*r2/CapStala.*w) + b3.*sin(3.*r2/CapStala.*w) + a4.*cos(4.*r2/CapStala.*w) +
b4.*sin(4.*r2/CapStala.*w) + a5.*cos(5.*r2/CapStala.*w) + b5.*sin(5.*r2/CapStala.*w) + a6.*cos(6.*r2/CapStala.*w) +
b6.*sin(6.*r2/CapStala.*w) + a7.*cos(7.*r2/CapStala.*w) + b7.*sin(7.*r2/CapStala.*w) + a8.*cos(8.*r2/CapStala.*w) +
b8.*sin(8.*r2/CapStala.*w));
diff_R02_r2=diff(R02,r2);
%diff_R01_a=diff(R01,a);

```

Продовження додатку С


```

r2=4.959711675854401e-04;
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g)); % в метрах
GranPph_R02_max_a=eval(diff_R02_r2.*Dov_GranPohubka_dr2);
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g));
GranPph_R02_min_a=eval(diff_R02_r2.*Dov_GranPohubka_dr2);
GranPph_R02=max([GranPph_R02_max_a GranPph_R02_min_a])
GranPph_R02=abs(GranPph_R02)+abs(dR02);
% визначення максимальної похибки z01
syms r1 CapStala
z01=CapStala.*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168.*r1/CapStala-
36.990684667380286.*r1/CapStala^2+43.823733638082880.*r1/CapStala^3-
25.646434108785900.*r1/CapStala^4+6.616357594546090.*r1/CapStala^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240.*r1/CapStala+42.636406466905065.*r1/CapStala^2-
21.468316667902630.*r1/CapStala^3+2.900558342028609.*r1/CapStala^4+r1/CapStala^5));
diff_z01_r1=diff(z01,r1);
r1=3.193676578699388e-04;
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g));
GranPph_z01_max_a=eval(diff_z01_r1.*Dov_GranPohubka_dr1);
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g));
GranPph_z01_min_a=eval(diff_z01_r1.*Dov_GranPohubka_dr1);
GranPph_z01=max([GranPph_z01_max_a GranPph_z01_min_a])
GranPph_z01=abs(GranPph_z01)+abs(dz01);
% визначення максимальної похибки z02
syms r2 CapStala
z02=CapStala.*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168.*r2/CapStala-
36.990684667380286.*r2/CapStala^2+43.823733638082880.*r2/CapStala^3-
25.646434108785900.*r2/CapStala^4+6.616357594546090.*r2/CapStala^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240.*r2/CapStala+42.636406466905065.*r2/CapStala^2-
21.468316667902630.*r2/CapStala^3+2.900558342028609.*r2/CapStala^4+r2/CapStala^5));
diff_z02_r2=diff(z02,r2);
r2=4.959711675854401e-04;
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro*g)); % в метрах
GranPph_z02_max_a=eval(diff_z02_r2.*Dov_GranPohubka_dr2);
GranPph_z02_min_a=eval(diff_z02_r2.*Dov_GranPohubka_dr2);
GranPph_z02=max([GranPph_z02_max_a GranPph_z02_min_a])
GranPph_z02=abs(GranPph_z02)+abs(dz02);
% розрахунок похибки ПН рідини
syms Pmax3_sigma Pmax2_sigma deltarho_sigma z02_sigma z01_sigma R02_sigma R01_sigma

```

Продовження додатку С

```

sigmaMeas = (Pmax3_sigma - Pmax2_sigma -deltaro_sigma .*g.* ( z02_sigma-z01_sigma )) / (2 .* ( 1/R02_sigma -
1/R01_sigma ));
diff_sigma_Pmax3_sigma=diff(sigmaMeas,Pmax3_sigma);
diff_sigma_Pmax2_sigma=diff(sigmaMeas,Pmax2_sigma);
diff_sigma_deltaro_sigma=diff(sigmaMeas,deltaro_sigma);
diff_sigma_z02_sigma=diff(sigmaMeas,z02_sigma);
diff_sigma_z01_sigma=diff(sigmaMeas,z01_sigma);
diff_sigma_R02_sigma=diff(sigmaMeas,R02_sigma);
diff_sigma_R01_sigma=diff(sigmaMeas,R01_sigma);
Pmax3_sigma=eval(Pmax3);
Pmax2_sigma=eval(Pmax2);
deltaro_sigma=delta_ro;
CapStala=sqrt(sigma/(delta_ro.*g));
z02_sigma=CapStala.*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168.*r2/CapStala-
36.990684667380286.*r2/CapStala^2+43.823733638082880.*r2/CapStala^3-
25.646434108785900.*r2/CapStala^4+6.616357594546090.*r2/CapStala^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240.*r2/CapStala+42.636406466905065.*r2/CapStala^2-
21.468316667902630.*r2/CapStala^3+2.900558342028609.*r2/CapStala^4+r2/CapStala^5));
z01_sigma=CapStala.*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168.*r1/CapStala-
36.990684667380286.*r1/CapStala^2+43.823733638082880.*r1/CapStala^3-
25.646434108785900.*r1/CapStala^4+6.616357594546090.*r1/CapStala^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240.*r1/CapStala+42.636406466905065.*r1/CapStala^2-
21.468316667902630.*r1/CapStala^3+2.900558342028609.*r1/CapStala^4+r1/CapStala^5));
R02_sigma=CapStala.*(a0 + a1.*cos(r2/CapStala.*w) + b1.*sin(r2/CapStala.*w) +a2.*cos(2.*r2/CapStala.*w) +
b2.*sin(2.*r2/CapStala.*w) + a3.*cos(3.*r2/CapStala.*w) + b3.*sin(3.*r2/CapStala.*w) +a4.*cos(4.*r2/CapStala.*w) +
b4.*sin(4.*r2/CapStala.*w) + a5.*cos(5.*r2/CapStala.*w) + b5.*sin(5.*r2/CapStala.*w) +a6.*cos(6.*r2/CapStala.*w) +
b6.*sin(6.*r2/CapStala.*w) + a7.*cos(7.*r2/CapStala.*w) + b7.*sin(7.*r2/CapStala.*w) +a8.*cos(8.*r2/CapStala.*w) +
b8.*sin(8.*r2/CapStala.*w));
R01_sigma=CapStala.*(a0 + a1.*cos(r1/CapStala.*w) + b1.*sin(r1/CapStala.*w) +a2.*cos(2.*r1/CapStala.*w) +
b2.*sin(2.*r1/CapStala.*w) + a3.*cos(3.*r1/CapStala.*w) + b3.*sin(3.*r1/CapStala.*w) +a4.*cos(4.*r1/CapStala.*w) +
b4.*sin(4.*r1/CapStala.*w) + a5.*cos(5.*r1/CapStala.*w) + b5.*sin(5.*r1/CapStala.*w) +a6.*cos(6.*r1/CapStala.*w) +
b6.*sin(6.*r1/CapStala.*w) + a7.*cos(7.*r1/CapStala.*w) + b7.*sin(7.*r1/CapStala.*w) +a8.*cos(8.*r1/CapStala.*w) +
b8.*sin(8.*r1/CapStala.*w));
DovInterval_Sigma=eval(1.96/sqrt(3)).*sqrt(
diff_sigma_Pmax3_sigma^2.*DovGranresistancePmax3_sum^2+diff_sigma_Pmax2_sigma^2.*DovGranresistancePmax2_
sum^2+diff_sigma_deltaro_sigma^2.*DovGranSystemPoh_deltaro^2+diff_sigma_z02_sigma^2.*GranPph_z02^2+diff_sig
ma_z01_sigma^2.*GranPph_z01^2+diff_sigma_R02_sigma^2.*GranPph_R02^2+diff_sigma_R01_sigma^2.*GranPph_R0
1^2)).*1000

```

Додаток Т


**Програма визначення максимального тиску для заданого поверхневого
натягу рідини, різниці густин рідини та газу і глибини занурення
вимірювального капіляру**

```

function [Pmax]=iterformul1_cap(r,sigma,H,delta_ro)
%r - встановити радіус капіляра в м
%H - глибину занурення капіляра
% delta_ro - ввести різницю густин досліджуваної рідини та газу в кг/м3
g=9.8;% прискорення вільного падіння
f=@(Pmax)((R0(r,sigma, delta_ro, g)/2)*(Pmax-delta_ro*g*(H+z0(r,sigma, delta_ro, g)))-sigma) % формула розрахунку
ПН
Pmax=fzero(f,[10 2000])% функція пошуку максимального тиску у діапазоні від 10 до 2000 Па
function Cap_const_a=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)
Cap_const_a=(sqrt(sigma/(g*delta_ro))); % формула розрхунку капілярної сталої
end
function z0=z0(r,sigma, delta_ro, g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
z0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*((1.834672521378576e-04+12.842738296647168*r_a-
36.990684667380286*r_a^2+43.823733638082880*r_a^3-
25.646434108785900*r_a^4+6.616357594546090*r_a^5)/(12.883406602579328-
37.458028270564240*r_a+42.636406466905065*r_a^2-
21.468316667902630*r_a^3+2.900558342028609*r_a^4+r_a^5));
end
function R0=R0(r,sigma,delta_ro,g)
r_a=r/Cap_const_a(sigma,delta_ro,g);
x=r_a;
w=2.064006154225540; a0=7.538335628900215; a1=-0.949653873696233; b1=-11.732394127778775;
a2=-8.706697763134265; b2=-0.570453267792374; a3=-1.049907159035991; b3=5.769903690006246;
a4=3.162638328628503; b4=0.894258757353888; a5=0.548176726783395; b5=-1.411823364440087;
a6=-0.487164305772356; b6=-0.237015527609773; a7=-0.071153087516410; b7=0.117899637375715;
a8=0.016604248643217; b8=0.011194689911517;
R0=Cap_const_a(sigma,delta_ro,g)*(a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) +
a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +a6*cos(6*x*w) +
b6*sin(6*x*w) + a7*cos(7*x*w) + b7*sin(7*x*w) +a8*cos(8*x*w) + b8*sin(8*x*w));
end
end

```

Додаток У
Акт впровадження результатів дисертаційної роботи


 «ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Головний лікар
 Чернівецького обласного
 спеціального онкологічного
 диспансеру
 _____ Гонца А.О.
 « 05 » _____ 10 _____ 2012р.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи
 аспіранта кафедри МПКЯіСП ІФНТУНГ Кучірка Юрія Михайловича
 «Удосконалені методи та пристрій для дослідження поверхневого натягу рідин
 за максимальним тиском у бульбашці»

Ми, які нижче підписалися, представник Чернівецького обласного клінічного онкологічного диспансеру (ЧОКОД) зав. радіологічним відділенням Пахолка Людмила Іванівна та аспірант кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції (МПКЯіСП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) Кучірка Юрій Михайлович, склали акт про те, що за допомогою трикалілярного пристрою ВПН-3, який розроблений Кучіркою Ю.М., були проведені дослідження динамічного поверхневого натягу зразків сироватки крові пацієнтів, що страждають на онкологічні захворювання.

Використання запропонованих методів визначення рівноважного та динамічного поверхневого натягу рідин та пристрою ВПН-3, який їх реалізує, дозволить здійснювати пошук кореляційних залежностей між динамічним поверхневим натягом біологічних рідин людського організму та наявністю конкретного захворювання в людини.

Дослідження проводилося із 03 вересня по 01 жовтня 2012 року. В процесі досліджень було розроблено ряд рекомендацій щодо подальшого удосконалення запропонованих методів і пристрою ВПН-3 при дослідженні біологічних рідин людини, які, в свою чергу, дозволять удосконалити згаданий технічний засіб.

Даний акт не є основою для взаємних фінансових розрахунків.

Зав.
радіологічним
відділенням ЧОКОД

Аспірант каф. МПКЯіСП





Пахолка Л.І.

Кучірка Ю.М.

Додаток Ф

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Вінісін»

Пукіш Р.Є.

2013р.

Акт впровадження

результатів дисертаційної роботи асистента кафедри МПКЯІСП ІФНТУНГ Кучірка Юрія Михайловича «Удосконалені методи та пристрій для дослідження поверхневого натягу рідин за максимальним тиском у бульбашці»

Ми, які нижче підписалися, представник ТОВ «Вінісін» - заступник директора з охорони праці Ференц Тарас Іванович та асистент кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції (МПКЯІСП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) Кучірка Юрій Михайлович, склали акт про те, що за допомогою запропонованих Кучіркою Ю.М. методів та трикапілярного пристрою ВПН-3, що їх реалізує, були проведені дослідження поверхневого натягу водних розчинів поверхнево-активних речовин «ВУК LPD 6296» з різними концентраціями ПАР.

Використання запропонованих методів визначення поверхневого натягу промислових розчинів ПАР та пристрою ВПН-3 дозволить здійснювати контроль якості промислових розчинів ПАР, які використовуються підприємством.

Дослідження проводилися з 15 січня по 15 лютого 2013 року. В процесі досліджень було розроблено ряд рекомендацій щодо подальшого удосконалення запропонованих методів і пристрою ВПН-3 при дослідженні промислових розчинів ПАР, які, в свою чергу, дозволять удосконалити заводий технічний засіб.

Даний акт не є основою для взаємних фінансових розрахунків.

Заступник директора
з охорони праці

Ференц Т.І.

Асистент каф. МПКЯІСП

Кучірка Ю.М.



d478