

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

На правах рукопису

***Боднар Роман Тарасович***

(043)  
УДК 532.6123

Б75

# **РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАНOSTІ ТВЕРДИХ ТІЛ РІДИНАМИ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:  
кандидат технічних наук,  
доцент Дранчук М.М.**

Івано-Франківськ - 2006



## ЗМІСТ

Стор.

Вступ .....	5
1. Аналіз відомих методів і приладів для визначення крайового кута змочування твердих тіл .....	12
1.1. Фізико-хімічні основи взаємодії взаємонерозчинних рідкої, твердої і газоподібної фаз на межі їх контакту .....	12
1.2. Аналіз відомих методів і засобів контролю крайового кута змочування на межі контакту трьох фаз з урахуванням зовнішніх факторів .....	26
1.2.1 Прямі методи визначення крайового кута змочування .....	26
1.2.2 Опосередковані геометричні методи визначення крайового кута змочування .....	29
1.2.3 Опосередковані фізико-механічні методи визначення крайового кута змочування .....	37
1.3. Обґрунтування та постановка задачі досліджень .....	41
2. Теоретичне обґрунтування визначення крайового кута змочування твердих монолітних тіл шляхом вимірювання фізичних та геометричних параметрів обмежених капілярних поверхонь .....	44
2.1. Загальна характеристика капілярних поверхонь .....	44
2.2. Математичне моделювання процесу утворення газового містка .....	50
2.3. Одержання та аналіз залежності крайового кута змочування від вимірюваного тиску в газовому містку .....	74
2.4. Визначення крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл шляхом вимірювання розмірів лежачої краплі .....	82
2.5. Метод оперативного визначення крайового кута змочування шляхом розрахунку значення похідної в точці контакту рідини з поверхнею твердого тіла .....	88
Висновки до розділу .....	92

3.Теоретичне обґрунтування визначення крайового кута змочування пористих тіл рідинами методом капілярного тиску .....	94
3.1. Фізичні аспекти змочування пористих тіл рідиною.....	94
3.2. Аналіз впливу крайового кута змочування нафтоносних порід на процес витіснення з них нафти.....	98
3.3. Розробка математичної моделі визначення крайового кута змочування пористих тіл шляхом вимірювання капілярного тиску.....	108
Висновки до розділу .....	113
4. Технічна реалізація запропонованих методів контролю крайового кута змочування твердих тіл .....	115
4.1. Розроблення структурної схеми і методики контролю крайового кута змочування шляхом вимірювання максимального тиску в газовому містку.....	115
4.2. Розроблення структурної схеми приладу і методики визначення крайового кута змочування поверхні твердого монолітного тіла оптичним методом .....	120
4.3. Розробка структурної схеми приладу і методики для контролю крайового кута змочування пористих тіл .....	124
4.4. Особливості технічної реалізації розроблених засобів запропонованих методів контролю крайового кута змочування.....	127
4.4.1.Розроблення пневматичної схеми приладу ВКЗ-1 для визначення крайового кута змочування і її характерні особливості.....	127
4.4.2.Розроблення електричної схеми приладу ВКЗ-1 для визначення крайового кута змочування і її характерні особливості.....	134
4.4.3.Опис конструкції і методики визначення крайового кута змочування за допомогою приладу ВКЗ-1 методом максимального тиску в газовому пухирці .....	137
4.4.4.Особливості технічної реалізації приладу для визначення крайового кута змочування поверхонь твердого монолітного тіла оптичними методами .....	143

4.4.5.Особливості технічної реалізації приладу для визначення крайового кута змочування пористих тіл .....	151
Висновки до розділу .....	155
5.Метрологічний аналіз розроблених приладів для визначення крайового кута змочування монолітних і пористих тіл .....	157
5.1.Аналіз метрологічних характеристик приладу для визначення крайового кута змочування методом максимального тиску в газовому містку .....	157
5.1.1.Загальний метрологічний аналіз приладу ВКЗ-1 .....	157
5.1.2.Дослідження окремих складових сумарної випадкової похибки приладу ВКЗ-1 .....	160
5.1.3.Визначення сумарної відносної похибки приладу ВКЗ-1 .....	170
5.2. Метрологічний аналіз приладу ВКЗО-1 для визначення крайового кута змочування оптичним методом .....	172
5.2.1.Похибка обчислень .....	173
5.2.2.Похибка негоризонтальності поверхні зразка .....	173
5.2.3.Похибка обробки зображення .....	175
5.2.4.Сумарна похибка.....	180
5.3.Метрологічний аналіз приладу ВЗПТ-1 для контролю змочуваності пористих тіл .....	180
6.Випробування приладів для контролю змочуваності твердих тіл .....	184
6.1.Результати лабораторних випробувань .....	185
6.2.Результати промислових випробувань .....	191
Висновки .....	194
Список використаних джерел.....	196
Додатки .....	206



## Вступ

В багатьох галузях промисловості при виготовленні продукції одним з основних факторів, які впливають як на проходження технологічного процесу, так і на якість кінцевого продукту, є поверхневі властивості речовин. Знання поверхневих властивостей і розуміння фізико-хімічних процесів, які відбуваються на межі розділу різних фаз (тверде тіло – рідина - газ), дають можливість оптимізувати різноманітні технологічні процеси (флотація, нанесення покриття, нафтовидобуток тощо).

Поверхневі властивості взаємодіючих фаз найчастіше характеризуються такими параметрами, як поверхневий (міжфазний) натяг та крайовий кут змочування. Поверхневий натяг (ПН) характеризує взаємодію на межі розділу рідина – газ і є визначальним при розробці і використанні поверхнево-активних речовин (ПАР), які широко використовуються в різних галузях виробництва та побуті [3...12]. Крайовий кут змочування (ККЗ) є поверхневою характеристикою на межі розділу трьох фаз (рідина – тверде тіло – газ або рідина – тверде тіло – рідина) і він є визначальним в процесах нанесення лакофарбових та інших покриттів на різні вироби, в процесах флотації та нафтовидобутку, в процесах очищення від забруднень, нанесення мастил і гербіцидів і т. п.[13...21]

Значно зросла в останній час цікавість до вивчення кінетичних закономірностей змочування, тобто до вивчення процесу розтікання рідин по поверхні твердих тіл. Ці дослідження важливі для виявлення молекулярного механізму змочування. Разом з тим вони мають і велике прикладне значення, так як швидкість багатьох процесів взаємодії між рідиною і твердим тілом визначається саме швидкістю змочування. Наприклад, при руйнуванні твердих тіл в присутності поверхнево-активних рідких середовищ (при наявності відкритого П. А, Ребіндером ефекту адсорбційного зниження міцності твердих тіл) швидкість поширення руйнівних тріщин часто залежить від розтікання рідин вздовж стінок тріщини [22]. Кількість робіт, які присвячені дослідженню розтікання рідин по поверхні твердих тіл, особливо різко зросла в останні

десятиліття, що на думку американських вчених зв'язано в першу чергу з розвитком космічної техніки.

Також і в багатьох інших процесах важливо знати зміну поверхневих властивостей з часом, тобто динамічні характеристики ПН, МН і ККЗ[23-29].

В даний час в Україні і за кордоном ведуться роботи по створенню приладів для вимірювання вказаних параметрів. Причому значно більший прогрес є у створенні приладів для контролю поверхневого натягу, а в галузі створення приладів для вимірювання ККЗ, які б відповідали сучасним вимогам, є явне відставання. Великий вклад в розробку теоретичних основ поверхневих властивостей, зокрема змочування і засобів вимірювання ККЗ, внесли Т.Юнг [36], П.С.Лаплас [37], П.О.Ребіндер [14,22,30,31], П.П.Пугачевич [32], Ю.М.Іваненк [33], О.І.Русанов [34,35], Т.Смітт [ ], І.Клоубек [40], Д.Паддей [41,47], Р.Гуд [39], А.Адамсон [38], А. Ньюмен [43-45], Б.Д. Сумм [13] та ін.

Існуючі в даний час засоби вимірювання ККЗ, які використовуються в науково-дослідних і заводських лабораторіях, базуються на прямих вимірюваннях, є вкрай малопродуктивні і практично не мають можливості автоматизувати процес вимірювання та обробки результатів. Як правило, вони метрологічно не забезпечені, що приводить до неузгодженості результатів вимірювання між собою. Дослідження кінетики процесів змочування, особливо в заводських лабораторіях, практично не проводиться або здійснюється шляхом багатократного вимірювання ККЗ в різні моменти часу [10, 24-26]. На такі експерименти витрачається багато часу, зусиль, а не рідко і коштів, а тому такі експерименти є досить поодинокі.

В даний час в Україні та в країнах СНД відсутні серійні промислові засоби контролю ККЗ і кожен дослідник в цій галузі використовує зроблені в єдиних примірниках установки, які часто є примітивними та недостатньо точними. Також повністю відсутні високопродуктивні прилади для визначення ККЗ як в статичному, так в динамічному режимах, як в Україні, так і за кордоном.

Вищенаведені міркування показують на необхідність створення приладів для точних вимірювань як рівноважних так і динамічних значень ККЗ в умовах

науково-дослідних і заводських лабораторій, які б дозволили швидко і дешево проводити вимірювання в автоматичному режимі і не потребували б високої кваліфікації робочого персоналу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати дослідження, які приведені в дисертації, безпосередньо пов'язані із виконанням у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) держбюджетних науково-дослідних тем Д4-01-Ф "Наукові основи контролю, управління і екологічного моніторингу об'єктами нафтогазового комплексу України" (номер державної реєстрації 0204U003207) і Д-8/7-04Ф "Дослідження нових технологій підвищення ефективності видобування вуглеводнів, в тому числі із низькодебітних свердловин" (номер державної реєстрації 0104U004086), а також госпдоговірної теми № 8/2000 "Розробка методики підбору компонентів розчинів поверхнево-активних речовин для проведення обробок привибійних зон пластів газових і газоконденсатних свердловин".

**Мета роботи** полягає у розробці теоретичних, методологічних основ і технічних засобів для контролю змочування виробів та матеріалів у лабораторних і промислових умовах і методики їх використання.

Відповідно до поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести теоретичний аналіз фізико-хімічного процесу змочування поверхонь твердих тіл рідинами та існуючих методів його контролю;
- розробити математичні моделі змочування суцільних та пористих твердих тіл рідинами;
- на основі розроблених математичних моделей отримати залежності величини ККЗ від зв'язаних з ним параметрів, що характеризують різні форми змочування поверхонь твердих тіл рідинами;
- розробити методи для контролю змочуваності для різних випадків змочування;
- розробити технічні засоби для контролю змочуваності для різних випадків змочування;

- розробити методики проведення процесів контролю змочуваності з використанням розроблених технічних засобів;
- оцінити похибки розроблених технічних засобів для контролю змочуваності;
- провести лабораторні і промислові випробування розроблених технічних засобів для контролю змочування.

**Об'єкт дослідження:** фізико-хімічні процеси змочування суцільних та пористих тіл рідинами.

**Предмет дослідження:** методи та засоби контролю процесів змочування суцільних та пористих твердих тіл рідинами.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- вперше отримано аналітичну залежність величини ККЗ від максимального тиску у газовому містку; що дає можливість контролювати ККЗ неперервно в автоматичному режимі, визначати кінетику змочування, отримати інтегральну оцінку змочування;
- вдосконалено контроль ККЗ методом лежачої краплі шляхом отримання аналітичних залежностей величини ККЗ від різних вимірюваних геометричних параметрів профілю краплі рідини на поверхні твердого тіла, що дає можливість визначати оперативно величину ККЗ в різних умовах, в т. ч. і шкідливих, для різних об'єктів, оцінювати ізоморфізм поверхні твердого тіла;
- вперше отримано аналітичну залежність величини ККЗ від зміни тиску при капілярному насиченні рідиною пористих твердих тіл, що дає можливість оперативно оцінити змочування пористих твердих тіл, зокрема кернів нафтоносних порід з метою інтенсифікації процесів нафтовидобутку.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що розроблено засоби контролю крайового кута змочування монолітних і пористих твердих тіл рідинами, що дозволяє проводити автоматизований контроль змочування у різних реальних умовах, та методики використання вказаних приладів.

**Вірогідність результатів** Вірогідність отриманих наукових результатів в роботі обумовлена виконанням теоретичних досліджень з використанням теорії

капілярності Лапласа-Юнга, теоретичних методів прикладної математики і теоретичних основ метрології.

Вірогідність результатів теоретичних досліджень підтверджена результатами експериментальних випробувань за допомогою розроблених технічних засобів.

Вірогідність отриманих результатів експериментальних досліджень зумовлена правильністю виконання експериментів і підтверджується їх збіжністю при отриманні їх різними методами, а також результатами впровадження розроблених методів контролю змочуваності.

**Особистий внесок здобувача.** Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, висновки і рекомендації виконані автором самостійно. Автором проаналізовано існуючі методи для контролю змочуваності твердих тіл рідинами, сформульовано мету і задачі досліджень, розроблено методи контролю змочуваності суцільних і пористих твердих тіл; розроблено математичний опис конфігурації газового містка у змочуючій рідині між досліджуваним твердим тілом та каліброваним капіляром, форми краплі змочуючої рідини на поверхні досліджуваного тіла та залежності зміни тиску над змочуваним пористим твердим тілом від величини змочування; розроблено методи визначення крайового кута змочування рідинами суцільних твердих тіл шляхом вимірювання максимального тиску у газовому містку, шляхом вимірювання висоти, максимального діаметру та площі профілю краплі рідини на поверхні твердого тіла та шляхом встановлення координат точок профілю краплі рідини на твердому тілі і діаметра основи краплі; розроблено метод визначення величини змочування рідинами пористих твердих тіл шляхом вимірювання швидкості зміни тиску у герметичній камері над твердим тілом в процесі змочування; розроблено функціональні схеми, конструкції приладів для визначення крайового кута змочування на основі розроблених методів та методики їхнього використання; проведено метрологічний аналіз розроблених технічних засобів для контролю змочуваності твердих тіл.

Із робіт, що опубліковані в співавторстві, використано результати, отримані особисто здобувачем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ІФНТУНГ (1995р., 1996р., 1997р., 1999р., 2000р.); на міжнародній конференції "Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики та неруйнівного контролю нафтогазового, хімічного та енергетичного обладнання" (м.Івано-Франківськ, 1996р.); на 4-й спеціалізованій конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ 1999р.); на науково-технічній конференції "Підвищення ефективності використання поверхнево-активних речовин в нафтогазовидобутку" (м.Івано-Франківськ, 2000р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Леотест-2001" (с-ще Славськ Львівської обл., 2001р.); на III-ій міжнародній науково-технічній конференції "Метрологія та вимірювальна техніка", (Метрологія-2002), (м. Харків, 2002р.); на 3-й науково-технічній конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю технічної діагностики промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ, 2002р.); на другій науково-технічній конференції "Приладобудування" (м. Київ, 2003р.); на 4-й Національній науково-технічній конференції "НКТД-2003. Неруйнівний контроль та технічна діагностика" (м. Київ, 2003р.); на сьомій Українській конференції-виставці "НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ 2004" (м.Київ, ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2004р.); на 8-й Міжнародній науково-практичній конференції - "НАФТА І ГАЗ УКРАЇНИ- 2004" (м.Судак, АР Крим, 2004р.); на XII міжнародній міжвузівській школі-семінарі "Методи і засоби технічної діагностики" (Івано-Франківськ, 2005р.); на 4-й науково-технічній конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ, 2005р.).

**Публікації.** Результати роботи висвітлені у 10 статтях, надрукованих у фахових наукових журналах (3 статті одноособово) та у 8 збірниках матеріалів і тез н/т конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновку, переліку використаних джерел із 143 найменувань і викладена на 203 сторінках. Крім того дисертація проілюстрована 54 рисунками, включає 6 таблиць і 9 додатків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Багато технологічних процесів пов'язані із взаємодією рідин і твердих тіл. Взаємодію між рідкою та твердою фазами називають адгезією, яка нерозривно зв'язана із явищем змочування. Рідиною може бути пластовий флюїд, фарба, мастило, чорнило, розплавлений метал, гербіциди тощо. Тверде тіло може представляти собою або монолітне тверде тіло із гладкою поверхнею (наприклад, метали після відповідної механічної обробки), або пористе тіло (наприклад, скелет нафтогазоносного пласта).

#### 1.1. Взаємодія рідин з поверхнями твердих тіл

1.1.1. Фізико-хімічні основи взаємодії взаємо нерозчинних рідкої, твердої і газоподібної фаз на межі їх контакту

Величину адгезійної взаємодії між рідинами і твердими тілами можна визначити в процесі видалення рідини з поверхні твердого тіла, що відбувається в середовищі газоподібної фази. Адгезію рідини оцінюють роботою, яку потрібно затратити для відривання рідини з твердої фази. Таким чином робота адгезії є важливою характеристикою взаємодії на межі розділу “рідина - тверде тіло”.

Контакт рідини з твердою поверхнею може здійснюватись на різній площі, тому роботу адгезії  $W_a$  необхідно відносити до одиниці площі контакту [16], тобто

$$W_a = \frac{W}{S}, \quad (1.1)$$

де  $W$  — робота, яка визначає взаємодію рідини з твердою поверхнею і яка необхідна для роз'єднання контактуючих тіл;  $S$  — площа контакту рідини з



поверхнею твердого тіла.

Таким чином, для визначення роботи, яка виникає при контакті рідини з твердим тілом, необхідно знати площу контакту її з поверхнею. Ця площа визначається здатністю рідини змочувати тверді поверхні.

Змочування відбувається на межі трьох фаз, одна з яких є твердим тілом, а дві інші – або рідини, які не змішуються, або рідина і газ. В останньому випадку поверхня рідини може бути оточеною газоподібним (повітряним) середовищем, або бульбашка газу може контактувати з твердою поверхнею в оточенні рідкої фази.

Теоретична оцінка роботи адгезії досить приблизна, що зв'язано не тільки з недосконалістю рівнянь, за якими розраховуються сили міжмолекулярних зв'язків, але і з тим, що неможливо оцінити реальну кількість зв'язків, які припадають на одиницю площі. Крім того, важко оцінити реальну площу контакту, яка є значно більшою від візуально спостережуваної завдяки наявності шорсткостей у поверхневому шарі.

Адгезія залежить від величин, які обумовлюють властивості поверхонь. Насамперед, це є питома вільна поверхнева енергія або поверхневий натяг, які фактично є синонімами, але термін “поверхневий натяг” використовується частіше. Поверхня рідини може самовільно скорочуватися, що вказує на наявність питомої вільної поверхневої енергії, яка визначається роботою, яку треба затратити на утворення одиниці нової поверхні рідини. Поверхневий натяг — це сила, яка діє по дотичній до поверхні рідини і яка прагне зменшити вільну поверхню рідини до мінімальних розмірів. Типовим прикладом, який ілюструє взаємодію трьох фаз, є крапля рідини на плоскій твердій поверхні. Між контактуючими фазами виникають поверхневі напруження, які показані для випадку змочуваної рідиною поверхні на рис. 1.1, а для незмочуваної поверхні – на рис. 1.2.

Поверхневий натяг на межі розділу тверде тіло – газ  $\sigma_{тг}$  збільшує площу контакту рідини з твердою поверхнею і сприяє розтіканню краплі. На противагу цьому поверхневий натяг  $\sigma_{тр}$  перешкоджає розтіканню краплі і

прагне скоротити межу розділу – тверде тіло рідина. Поверхневий натяг  $\sigma_{тр}$  на межі рідини з газом прагне зменшити поверхню краплі. Він спрямований під кутом  $\theta$  до твердого тіла.

При умові рівноваги між вказаними натягами має місце співвідношення

$$\sigma_{pg} \cdot \cos \theta = \sigma_{mg} - \sigma_{mp}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma_{pg}$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі розділу рідина-газ.

Рівняння (1.2) було виведене Юнгом [38] більше ста років тому і є фундаментальним рівнянням, яке пов'язує між собою найважливіші термодинамічні величини – поверхневі натяги контактуючих фаз  $\sigma_{pg}, \sigma_{mg}$  і  $\sigma_{mp}$  з кутом  $\theta$ . Кут  $\theta$  є однією з основних характеристик змочування і має назву крайового кута змочування (ККЗ).

ККЗ визначається значенням кута між поверхнею твердого тіла і дотичною до поверхні рідини в точці контакту трьох фаз і відраховується завжди в сторону рідкої фази. ККЗ є мірою змочування поверхонь. При  $\theta < 90^\circ$ , то вважається, що тверді поверхні змочуються рідиною. Такі поверхні називаються гідрофільними (рис. 1.1). При  $\theta > 90^\circ$  відбувається обмежене змочування поверхонь. Такі поверхні називаються гідрофобними (рис. 1.2).

Робота адгезії  $W_a$  рідини на межі з твердою фазою [50]

$$W_a = \sigma_{pg} + \sigma_{mg} - \sigma_{mp}. \quad (1.3)$$

З врахуванням рівняння (1.2) можна записати, що

$$W_a = \sigma_{pg}(1 + \cos \theta). \quad (1.4)$$

Як видно з рівняння (1.4) існує певний зв'язок між ККЗ і роботою адгезії. Із збільшенням ККЗ робота адгезії зменшується.

Цей висновок підтверджується експериментальними даними [52, 53]. Кількісно ККЗ часто характеризується безрозмірною величиною – косинусом крайового кута змочування,  $(\cos \theta)$ , яку і називають величиною змочування.

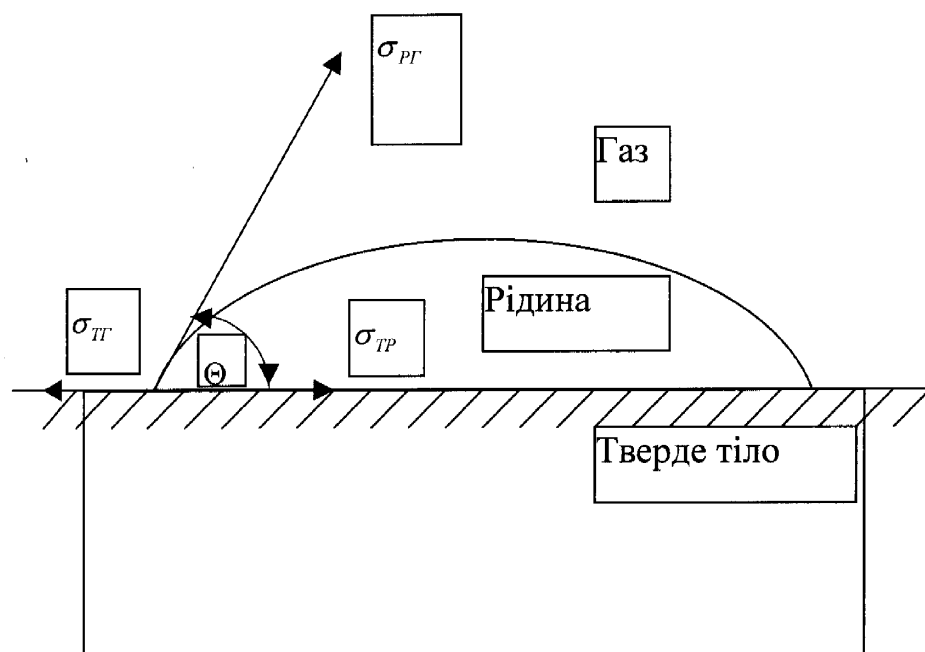


Рис. 1.1. Форма краплі рідини на змочуваній поверхні

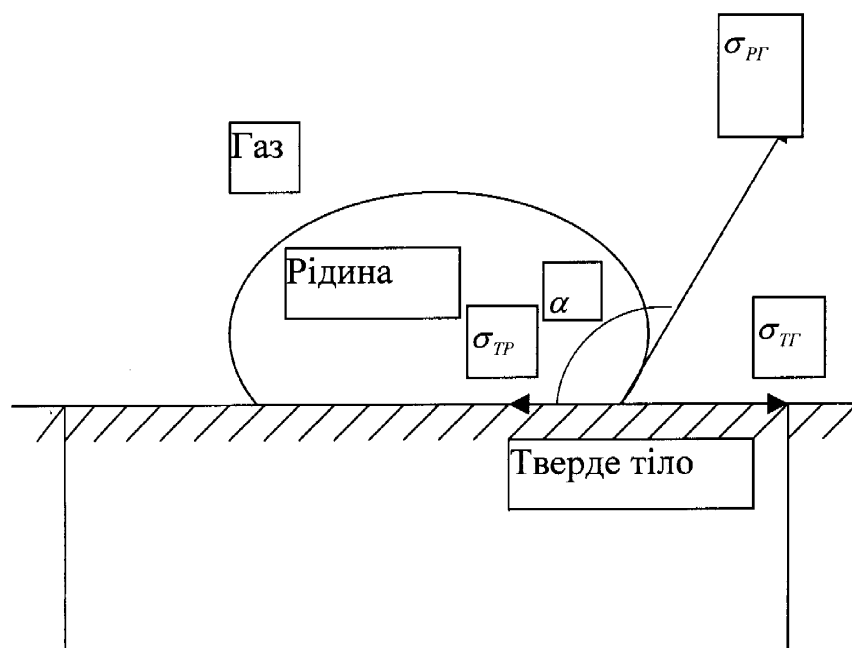


Рис. 1.2. Форма краплі рідини на не змочуваній поверхні

### 1.1.2. Методи оцінки взаємодії трьох фаз на межі їх контакту

Із рівняння (1.4) видно, що таку важливу характеристику взаємодії двох фаз як роботу адгезії можна легко визначити, знаючи поверхневий натяг рідини  $\sigma_{pg}$  та ККЗ. Обидві ці величини можна визначити експериментально [16,40].

Рівноважне значення ККЗ можна було б розрахувати з рівняння Юнга (1.2) за відомими поверхневими натягами. Але з трьох поверхневих натягів  $\sigma_{pg}, \sigma_{tg}, \sigma_{tp}$  можна виміряти загальнодоступними методами тільки поверхневий натяг  $\sigma_{pg}$  на межі рідини з газоподібним середовищем. Поверхневий натяг твердого тіла на межі з рідкою та газоподібною фазами важко визначити експериментально. Тому розрахувати ККЗ за допомогою рівняння Юнга не є можливим. В зв'язку з цим використовують інші методи визначення ККЗ, в тому числі безпосередні методи його вимірювання.

На змочування поверхонь твердих тіл, а значить і на величину ККЗ, мають вплив ряд чинників, до яких відносяться: гістерезис змочування; шорсткість досліджуваних твердих поверхонь та їх неоднорідність; пористість твердих тіл; деформація поверхні твердого тіла; фізико-хімічні процеси, які відбуваються при стиканні фаз, що беруть участь при змочуванні, тощо.

Гістерезис змочування — це здатність рідини мати при контакті з твердим тілом декілька стійких (метастабільних) статичних ККЗ, відмінних від рівноважного (термодинамічного) значення ККЗ  $\theta_0$ . Гістерезис є дуже важливою фундаментальною особливістю змочування реальних твердих тіл, оскільки в більшості випадків без його врахування неможливо правильно інтерпретувати експериментальні дані та здійснювати потрібний характер процесу змочування.

При змочуванні реальних твердих тіл крайові кути з різних причин відрізняються в тій чи іншій мірі від ідеального значення рівноважного ККЗ, який визначається з рівняння Юнга (1.2). Більше того, при змочуванні однією і тією ж рідиною однієї і тієї ж поверхні при одних і тих же значеннях термодинамічних параметрів системи (температура, тиск і т.д.) статичні крайові

кути можуть бути різними в залежності від умов їх формування.

При аналізі гістерезису змочування розрізняють ККЗ натікання і відтікання (використовують також терміни - “наступаючі” і “відступаючі” ККЗ). Крайові кути натікання  $\theta_n$  можуть формуватись різними способами, найчастіше при натіканні рідини на тверду поверхню (тобто при збільшенні змочуваної площі) (рис. 1.3, а), або при збільшенні об'єму краплі при незмінній площі контакту рідини з твердим тілом (рис. 1.3, б). Крайові кути натікання утворюються також біля переднього краю краплі, яка знаходиться на похилій поверхні (рис. 1.3, в). Крайові кути відтікання  $\theta_e$  утворюються при відтіканні із раніше змоченої ділянки твердої поверхні (рис. 1.3, г), при зменшенні об'єму краплі і постійній змоченій площі, наприклад, при випаровуванні чи відсмоктуванні об'єму краплі (рис. 1.3, е), на похилій твердій поверхні біля заднього краю краплі (рис. 1.3, з).

Розрізняють наступні види гістерезису змочування:

1) статичний гістерезис, який проявляється у відмінності статичних ККЗ при різній послідовності дотикання твердого тіла з іншими фазами, які будуть участь у змочуванні: рідиною і газом чи полярною і неполярною рідиною при вибіркового змочуванні. Статичний гістерезис не залежить від часу контакту рідини з твердим тілом;

2) кінетичний гістерезис, обумовлений наявністю на твердій поверхні

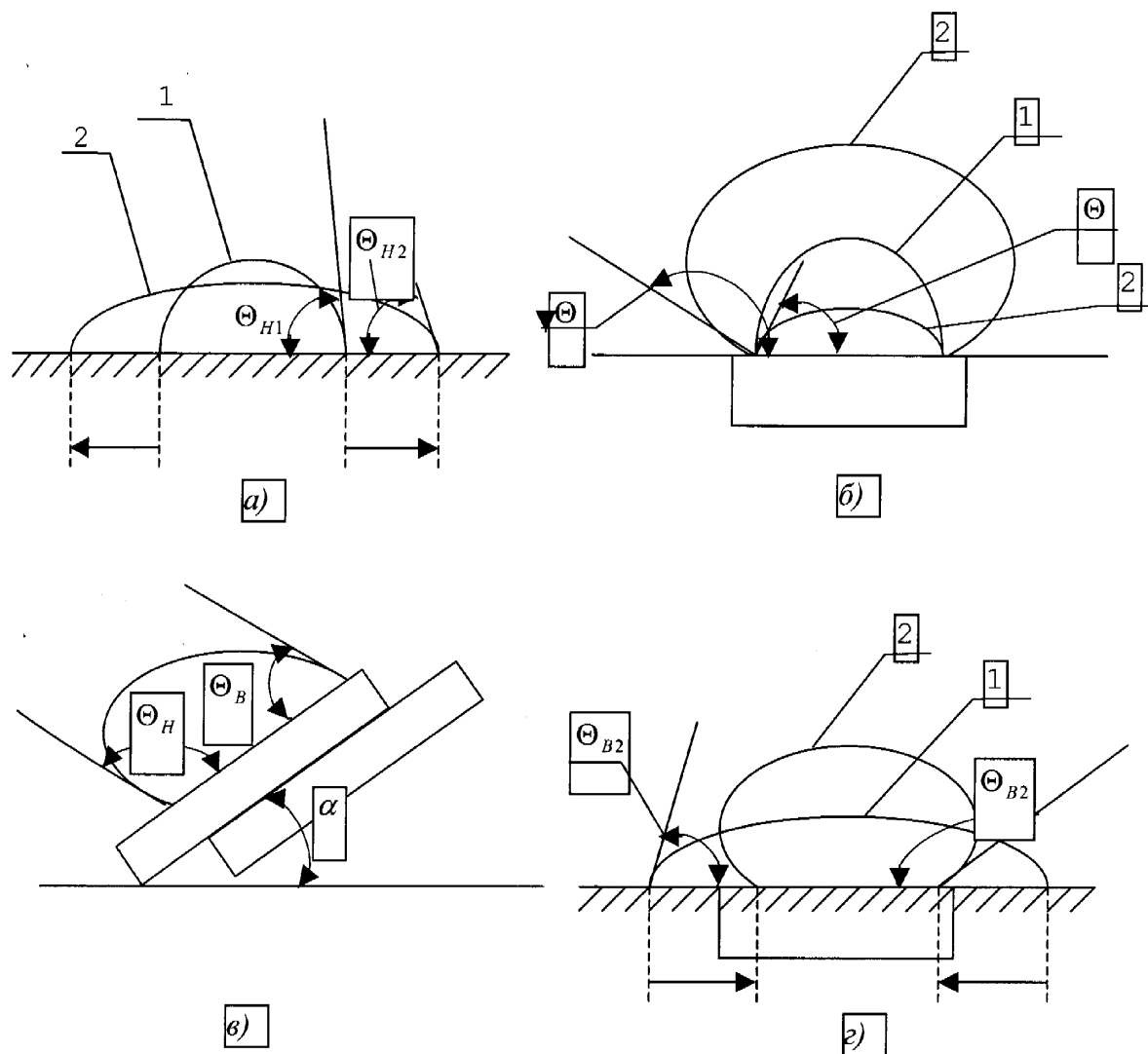


Рис. 1.3. Крайові кути натікання  $\Theta_H$  і відтікання  $\Theta_B$ :

*а, г* – при зміні змочуваної площі (1 та 2 – послідовні положення периметра змочування); *б* – при зміні об'єму краплі; *в* – при розміщенні краплі на похилій площині.

різних перешкод (енергетичних бар'єрів), які заважають розтіканню рідини, тобто переміщенню лінії змочування. В цьому випадку ККЗ залежить від часу контакту фаз;

3) фізико-хімічний гістерезис, який представляє собою різницю ККЗ натікання і відтікання і викликається тим, що при змочуванні можуть відбуватися одночасно різні фізико-хімічні процеси (наприклад, адсорбція, розчинення, хімічні реакції, випаровування). До цієї групи фізико-хімічних причин гістерезису змочування відносяться переорієнтація молекул рідини біля поверхні твердого тіла при натіканні і відтіканні, всмоктування рідини у поверхневий шар твердого тіла, рух рідини по сухій поверхні при натіканні і при змоченій - по відтіканні [13].

Фізико-хімічні процеси змінюють об'єм фаз, які беруть участь у змочування, а також поверхневі натяги на межі розділу фаз. Тому властивості системи при натіканні і відтіканні можуть відрізнятися, що відображається, звичайно, на значеннях крайових кутів змочування. При проявленні фізико-хімічного гістерезису крайові кути змочування залежать від часу контакту фаз. Вплив фізико-хімічних факторів на гістерезис особливо сильний тоді, коли час, під час якого відбувається той чи інший фізико-хімічний процес, співмірний з часом вимірювання ККЗ. Тому для усунення впливу фізико-хімічних факторів треба зменшувати час вимірювання ККЗ [64].

Слід мати на увазі, що ККЗ натікання є більшими, а ККЗ відтікання меншими у порівнянні із рівноважними ККЗ ( $\theta_e < \theta_o < \theta_n$ ). Особливий інтерес для дослідників представляють максимальні значення ККЗ натікання і відтікання.

Показником шорсткості поверхні є відношення дійсної площі поверхні з урахуванням впадин та виступів до площі ідеальної поверхні в її плоскому наближенні.

Для некомпозиційної поверхні, яку рідина може вкрити повністю без утворення пустот, форма краплі цієї рідини буде відповідати мінімуму вільної енергії. При таких умовах показник шорсткості  $R$  представиться рівнянням [13]

$$R = \frac{\cos \psi}{\cos \theta}, \quad (1.5)$$

де  $\psi$  — ідеальний контактний кут краплі відносно горизонтальної площини;  $\theta$  — характеристичний контактний кут відносно реальної поверхні, який спостерігається при проведенні експерименту (рис. 1.4.).

Термодинамічне виведення рівняння (1.5) представлено в роботі Шаттлворта і Бейлі [67], а його обмеження обговорені в роботі Джонсона і Деттре [68]. Дослідження рівняння (1.5) показує, що якщо величина характеристичного ККЗ на даній поверхні менша  $90^\circ$ , то ККЗ для шорсткої поверхні зменшується.

З іншого боку, значення характеристичного ККЗ більше  $90^\circ$  приводить до збільшення ідеального контактного кута. Тому навіть незначне полірування поверхні приводить до покращення змочуваності цієї поверхні і до збільшення адгезії рідин.

Спостережувана на шорсткій поверхні величина кута  $\theta$  представляється виразом:

$$\psi = \theta \pm \alpha, \quad (1.6)$$

де  $\alpha$  — локальний кут нахилу поверхні в точці контакту рідини з твердою поверхнею.

Максимальне і мінімальне значення спостережуваних кутів будуть при  $\alpha = \alpha_{max}$ . Ці умови пов'язуються Шаттлвортом і Бейлі з величинами контактних кутів для висунутих і втягнутих країв. Але Джонсон і Деттре [2] вважають, що наявність в системі вібрації приведе до менших в порівнянні з їхніми екстремальними значеннями величин контактних кутів висунених і втягнутих країв. Вирази для них мають вигляд[?]:

$$\psi_{\alpha} \leq \psi_{max} = \theta + \alpha_{max}; \quad (1.7)$$

$$\psi_p \leq \psi_{min} = \theta - \alpha_{min}. \quad (1.8)$$

На рис. 1.4 схематично зображені контактні кути для висуненого і втягнутого країв на ідеалізованій шорсткій поверхні.



Рідини, які мають з твердими поверхнями великі значення ККЗ, можуть взагалі не змочувати шорсткі поверхні. Подібне можливе лише у тому випадку, коли для кута нахилу виконується умова[67]:

$$\theta = 180^\circ - \alpha. \quad (1.9)$$

Для ККЗ на композиційній поверхні, де на одиницю ідеальної поверхні межа розділу полімер-рідина має площу  $S_{tp}$ , а поверхня розділу рідина-повітря під краплею має площу  $S_{pg}$ , Кессі і Бекстер [69] вивели рівняння, яке мінімізує вільну енергію краплі на поверхні наступним чином:

$$\cos \psi = S_{tp} \cdot \cos \theta - S_{pg}. \quad (1.10)$$

При  $S_{tp} = 0$  рівняння (1.10) зводиться до рівняння Венцеля. Цей випадок означає, що рідина повністю змочує поверхню. Детальніше вивчення шорстких поверхонь було проведено Джонсоном і Деттре [68]. Ними була висунута теорія для ідеалізованої поверхні, яка складається з рівномірно розміщених впадин і виступів з різними показниками шорсткості. При цьому фронт шорсткості переміщується перпендикулярно по відношенню до виступів. Автори зробили припущення, що на ідеальній поверхні крапля може приймати кілька метастабільних конфігурацій, розділених між собою енергетичним бар'єром. Висота такого енергетичного бар'єра приблизно пропорційна висоті виступів на шорсткій поверхні. Стверджується також, що енергетичні бар'єри для композиційних поверхонь значно нижчі, ніж бар'єри на некомпозиційних поверхнях. Експерименти, проведені Деттре і Джонсоном з поверхнями різного ступеня шорсткості, дозволили виявити, що поведінка реальних систем добре описується приведеними моделями [68]. Було, зокрема, показано експериментально значне зниження гістерезису, яке виникає при трансформації некомпозиційної поверхні в композиційну.

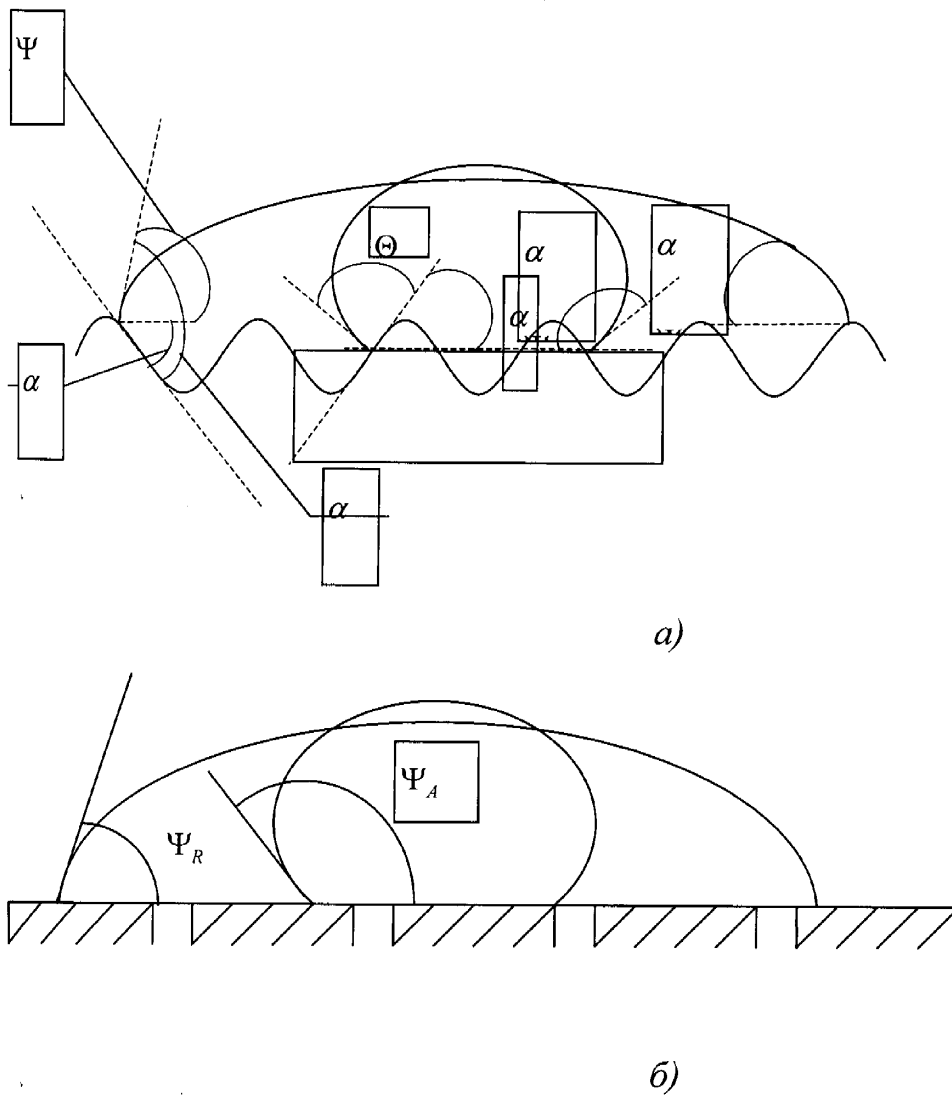




Рис. 1.4. Граничні випадки можливості конфігурації краплі на ідеалізованих поверхнях: *а)* – контактні кути для висуненого і втягнутого країв на некомпозиційній шорсткій поверхні; *б)* – контактні кути для висуненого і втягнутого країв на не композиційній гладкій неоднорідно-гетерогенній поверхні:

-  – високо енергетична область;  
 – низько енергетична область;

На гладких поверхнях гістерезис ККЗ обумовлюється хімічною гетерогенністю [41,65]. Це має місце в тому випадку, коли різні області поверхні мають різні значення вільної енергії. Поверхня може змінюватися за своїм хімічним складом. Поверхня блок-співполімерів складається з доменів, поверхнева вільна енергія яких є характеристикою об'єднуючого різні блоки полімера. Навіть такий полімер, як політетрафторетилен, має гетерогенну поверхню, вища поверхнева енергія неоднорідностей якої забезпечується наявністю карбонільних груп чи ланцюжками слабополімеризованих вуглеводнів. Ці елементи присутні як залишкові продукти від фрагментів ініціатора, які в процесі виготовлення не руйнуються. Навіть хімічно ідентичні атоми чи молекули можуть приводити до різних значень поверхневої вільної енергії, яка залежить від розміщення атомів чи молекул. Кристалічні полімери і метали мають більшу атомну чи молекулярну густину і, отже, різні значення поверхневої вільної енергії цих речовин є порівняльні із значеннями для аморфних форм. Відмінність кристалографічних площин також свідчить про відмінності в атомній упаковці. Тому полікристалічні поверхні є гетерогенними.

Для плоских поверхонь, які містять два типи елементів: 1 і 2, яким відповідають значення характеристичного ККЗ  $\theta_1$  і  $\theta_2$ , Кессі запропонував [71], що значення рівноважного ККЗ є зважене середнє значення по поверхні, тобто

$$\cos \psi = S_1 \cdot \cos \theta_1 + S_2 \cdot \cos \theta_2. \quad (1.11)$$

Рівняння (1.11) представляє собою узагальнену форму виразів Кессі і Бекстера для величини рівноважного ККЗ на композиційній шорсткій поверхні, яка описується рівнянням (1.10). Для випадку, коли другий член  $S_{PT} \cdot \cos \theta_1 = 180^\circ$ , Джонсон і Деттре запропонували модель гетерогенної поверхні, аналогічну моделі, яка описує шорстку поверхню. Ці автори розглядають кути на висунутих і втягнутих краях таких поверхонь як результат балансу між рівнем вібрації рідини і енергетичними бар'єрами на твердій

поверхні. Джонсон і Деттре запропонували також, що в міру підвищення коливного стану рідини чи в міру зменшення площі гетерогенних областей величини ККЗ для висунених і втягнутих країв, які описуються рівнянням (1.11), наближаються до значення рівноважного кута ККЗ. Але при менших коливаннях краплі більших розмірів гетерогенних областей значення ККЗ для витягнутих і втягнутих країв наближаються до значень характеристичних кутів  $\theta_1$  і  $\theta_2$ . Значить, величини кутів для витягнутих країв характеризують змочуваність доменів на поверхнях з меншою вільною енергією. Ця ситуація схематично зображена на рис. 1.46. Джонсон і Деттре запропонували також, що в широкому діапазоні великих значень ККЗ для висунених і втягнутих країв вони не залежать від відношення  $S_1 / S_2$ .

Ці ж автори зробили огляд експериментальних доказів своєї теорії, в яких включені результати досліджень одношарових покриттів низькоенергетичних парафінів на високоенергетичних металічних поверхнях[68]. Розроблена теорія в якісному плані співпадає з практичними спостереженнями і у випадку реальних поверхонь пропонує, що збіднені моношари адсорбуються неоднорідним способом.

Гуд з колегами розглянули залежність величини ККЗ від розмірів нерухомих крапель з точки зору гетерогенної природи поверхонь [64]. Вони виявили, що в міру зменшення діаметру крапель від 4 мм значення кутів для витягнутих і втягнутих країв крапель на поверхні співполімера тетрафторетилен - гексафторпропілен і поліметилметакрилату різко знижуються. Цей ефект має місце для крапель води. Гуд припустив, що якщо поверхня полімеру є в значній мірі гетерогенна і вода змочує високоенергетичні області, то лінія краю краплі, яка знаходиться на поверхні, повинна бути звивистою. В цьому випадку, коли крапля мала, звивистість лінії контакту трьох фаз є достатньою для зниження величини макроскопічного ККЗ і для врахування залежності розмірів краплі від величини ККЗ. Деякі рідини, наприклад, декан, не змочують ні один тип поверхні, але вони утворюють невикривлену лінію контакту трьох фаз. Подібні результати не можна пояснити

з точки зору шорсткості поверхні. Отже, очевидно, що на процес змочування існує вплив фізико-хімічних факторів.

При  $W_a > \sigma_{pg}$ , змочування можливе, а при  $W_a < \sigma_{pg}$  - відсутнє. За характером сил взаємодії між рідиною і твердим тілом такі системи можна розділити на рівноважні і нерівноважні си [72]. В рівноважних системах тверда фаза і контактуюча рідина ще до початку контакту знаходяться в хімічній рівновазі. Основний процес, який відбувається після зіткнення фаз — це зміна площі контакту внаслідок зменшення загальної поверхневої енергії системи, що приводить до явища гістерезису. В рівноважних системах хімічні потенціали контактуючих фаз в початковому стані не є однаковими. Тому після утворення поверхні контакту в системі поряд із змочуванням мають місце процеси, які супроводжуються вирівнюванням хімічного потенціалу (розчинення, дифузія речовин, структурні перетворення, хімічні реакції і т. п.) [72].

При дослідженні процесів розтікання рідини по поверхні твердого тіла зазвичай визначають рівноважне змочування, тобто аналізують залежності зміни ККЗ від часу взаємодії  $\theta = f(t)$  (часто цю залежність представляють у вигляді  $\cos \theta = f(t)$ ) або зміни площі змочування від часу  $S = f(t)$ . Дослідників цікавлять фактори, які впливають на ці залежності і методи та засоби надійного, оперативного і зручного їх дослідження.

Приведений вище короткий огляд показує, що дані про міжфазну взаємодію можуть бути корисні в найрізноманітніших аспектах. ККЗ, як і поверхневі натяги, є чутливим індикатором фізичного і хімічного стану взаємодіючих фаз як в об'ємі, так і на границях розділу фаз. Знання вказаних параметрів дозволяє проводити термодинамічні розрахунки важливих властивостей речовин. Точність таких розрахунків буде залежати від точності вимірювання параметрів міжфазної взаємодії, зокрема, ККЗ, яка у свою чергу буде залежати від використовуваних методик вимірювання, використовуваних засобів для проведення вимірювань і інших факторів.

## **1.2. Аналіз відомих методів і засобів контролю крайового кута змочування на межі контакту трьох фаз з урахуванням зовнішніх факторів**

У даний час крайові кути змочування визначають різними методами залежно від фізико-хімічних властивостей рідин і твердих тіл, а також в залежності від наявності технічних засобів, якими володіє дослідник. Методи визначення ККЗ можна поділити на прямі та опосередковані, залежно від того, чи ККЗ вимірюються безпосередньо по кутовій шкалі, чи вираховуються за теоретично встановленими залежностями інших вимірних величин. Опосередковані методи визначення ККЗ можна поділити на дві групи в залежності від вимірюваних параметрів:

визначення ККЗ шляхом попереднього вимірювання геометричних параметрів капілярних менісків, які утворюються на твердому досліджуваному тілі у відповідному газовому середовищі (або просто геометричні методи);

визначення ККЗ шляхом попереднього вимірювання фізичних параметрів (тиску, фізико-хімічних параметрів контактуючих фаз тощо) вказаних вище капілярних менісків (фізичні методи визначення ККЗ).

### **1.2.1 Прямі методи визначення крайового кута змочування**

Ці методи є найбільш простими і можуть бути застосовані як з використанням профілю рідкої краплі на горизонтальній поверхні досліджуваного твердого тіла (рис. 1.1), так і з використанням профілю повітряного пухирця, який знаходиться під твердою досліджуваною поверхнею. ККЗ визначають як кут між дотичною до меридіональної лінії поверхні рідини в точці трифазового контакту і лінією горизонтальної поверхні площини твердого тіла через рідину.

В процесі вимірювання крайового кута профілі краплі чи повітряного пухирця можна попередньо фотографувати чи проектувати на екран і на

зображеннях проводити вимірювання ККЗ [16, 40, 73]. Вимірювання ККЗ можуть виконуватися за допомогою спеціальної оптичної апаратури [72, 73, 74, 75, 77]. Існують серійно виготовлені прилади такого типу фірмою Kernko Instruments Co. (аналізатори змочуваності G-I, G-II, C-III), для яких похибка визначення ККЗ в діапазоні  $10^\circ \dots 90^\circ$  становить 1% [75]. Для визначення ККЗ цим методом немає необхідності у попередньому визначенні поверхневого натягу і густини досліджуваної рідини. Вимірювання ККЗ можуть проводитися із невеликими кількостями досліджуваних розчинів і на малих за розмірами поверхнях твердих тіл. Для виключення впливу на результати вимірювання багатьох факторів крапля разом із твердим тілом можуть бути розміщеними в термостаті. Діапазон визначення ККЗ даним методом знаходиться в межах від  $10^\circ$  до  $160^\circ$ , похибка визначення ККЗ залежить від прецизійності апаратури і від кваліфікації дослідника, однак значення похибки  $1^\circ$  може бути легко досягнутим. З метою виключення суб'єктивних факторів на результати в процесі визначення ККЗ даним методом пропонується використовувати ефект відбивання світлового променя від поверхні краплі в точці контакту. Таке вдосконалення звужує діапазон визначення крайового кута до  $90^\circ$  [77]. Точність обмежується неможливістю досягнення достатньо тонкого перерізу світлового пучка, який падає на краплю, із-за дифракції світла на отворі діафрагми освітлювача.

Метод стікання краплі по нахиленій пластинці [89] дозволяє одночасно визначити як крайовий кут натікання, так і крайовий кут відтікання (рис. 1.3, е).

Суть методу полягає в тому, що краплю досліджуваної рідини встановлюють на підкладці і її нахиляють до тих пір, поки крапля не починає рухатись по поверхні досліджуваного твердого тіла. Кут між дотичною спереду краплі до її поверхні в точці трифазного контакту через рідину у краплі є кутом натікання, а кут між дотичною позаду краплі до її поверхні у точці трифазного контакту через рідину в краплі і нахиленою поверхнею підкладки є кутом відтікання. Даний метод в основному застосовується для досліджень гістерезисних явищ змочування твердих поверхонь в динамічному режимі

визначення кутів натікання і відтікання. При цьому кути визначають або шляхом фотографування краплі в процесі її руху по поверхні, або безпосереднім вимірюванням.

Можна безпосередньо виміряти ККЗ на частково зануреному круглому стержні чи пластинці. Крайові кути можуть бути визначені або безпосереднім вимірюванням, або фотографуванням. Даний метод використовується для в'язких рідин, тому що час, необхідний для досягнення рівноваги на вертикальному стержні, є меншим від часу необхідного для досягнення рівноваги у лежачій краплі. Як відмітив Б.В. Дерягін [90] цей метод може привести до значних помилок, якщо діаметр стержня є дуже малим (меншим 50 мкм). Деякою модифікацією цього методу, яку вже слід віднести до геометричних методів, є пропозиція Б.В.Дерягіна визначати крайовий кут змочування за висотою підняття рідини по вертикальній стінці частково зануреного предмета. При цьому значення ККЗ розраховують за формулою [90]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot h^2}{2\sigma_{pe}}, \quad (1.16)$$

де  $\Delta \rho$  – різниця густин рідини і газу;  $h$  – висота підйому рідини по стінці пластинки чи стержня;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Необхідно відмітити, що похибка описаного методу залежить від похибки вимірювання величини  $S_1 / S_2$  і може не перевищувати  $0,5^\circ$ .

До переваг методів безпосереднього визначення ККЗ можна віднести:

безпосереднє одержання значення ККЗ, простоту і наглядність реалізації процесу вимірювання, можливість дослідження кінетики змочування;

можливість проведення досліджень при високих тисках і температурах навколишнього середовища;

можливість визначення ККЗ з достатньо високою точністю.

До недоліків вказаних вище методів слід віднести такі:

неможливість проведення вимірювань у непрозорому середовищі;

вплив випаровування рідини з поверхні краплі на дослідження динаміки



змочування;

вплив енергетичної, хімічної, кристалічної, структурної неоднорідностей твердої поверхні, її шорсткості, наявності окислів поверхні досліджуваного твердого тіла на отримані результати визначення ККЗ;

необхідність проведення декількох вимірювань з різними профілями однієї краплі;

вплив суб'єктивних факторів на одержані результати;

складність дослідження швидкозмінних процесів, що можуть мати місце на межі трифазового контакту, або на межі інших двофазових контактів (рідина-газ, тверде тіло-газ, тверде тіло-рідина);

складність автоматизації процесу вимірювання.

### **1.2.2 Опосередковані геометричні методи визначення ККЗ**

Геометричні методи визначення ККЗ базуються на залежності геометричних параметрів капілярних менісків від величини ККЗ та поверхневого (міжфазного) натягу рідини. Ці методи є точніші, ніж методи безпосереднього вимірювання ККЗ, так як похибка розташування дотичної при її проведенні вручну завжди значно більшою, ніж похибка встановлення контуру зображення краплі.

ККЗ може бути визначений на основі результатів вимірювання певних розмірів лежачої краплі на горизонтальній твердій підкладці. В даний час існує ряд модифікацій даного методу в залежності від вимірюваних розмірів краплі [13, 16, 45, 68, 71, 78, 79].

Для дуже малих крапель вплив гравітаційних сил на форму краплі є незначним, тому крапля може бути розглянута як фрагмент сфери. В цьому випадку крайовий кут змочування може бути розрахований на основі виміряної висоти краплі  $h$  і її основи  $d$  (рис. 1.5, а) з допомогою наступної залежності [80]:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{2h}{d}, \quad (1.13)$$

де  $h$  — висота краплі,  $d$  — діаметр основи краплі.

Залежність (1.13) застосовують для крапель, об'єм яких є меншим від  $10^{-4}$  мл [80]. В тих випадках, коли діаметр виміряти важко, величину ККЗ розраховують на основі об'єму краплі  $V$  шляхом розв'язування такого рівняння [81]:

$$\frac{d^3}{V} = \frac{24 \sin^3 \theta}{\pi(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}. \quad (1.14)$$

Для великих крапель, де відхилення форми краплі від сферичної поверхні є значними, для розрахунку ККЗ можуть бути застосовані таблиці Баштфорта і Адамса [89], в яких приведені результати чисельного розв'язку диференціального рівняння, що описує капілярну поверхню. Стайкопулос [83] запропонував в результаті відповідного перетворення таблиць Баштфорта і Адамса визначити ККЗ шляхом знаходження коренів полінома 4-го порядку. Причому попередньо необхідно виміряти максимальний діаметр краплі  $d$  і висоту краплі від максимального діаметра до вершини  $z$  (рис. 1.5, б).

$$\frac{d^3}{V} = \frac{24 \sin^3 \theta}{\pi(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}. \quad (1.14)$$

Для великих крапель, де відхилення форми краплі від сферичної поверхні є значними, для розрахунку ККЗ можуть бути застосовані таблиці Баштфорта і Адамса [89], в яких приведені результати чисельного розв'язку диференціального рівняння, що описує капілярну поверхню.

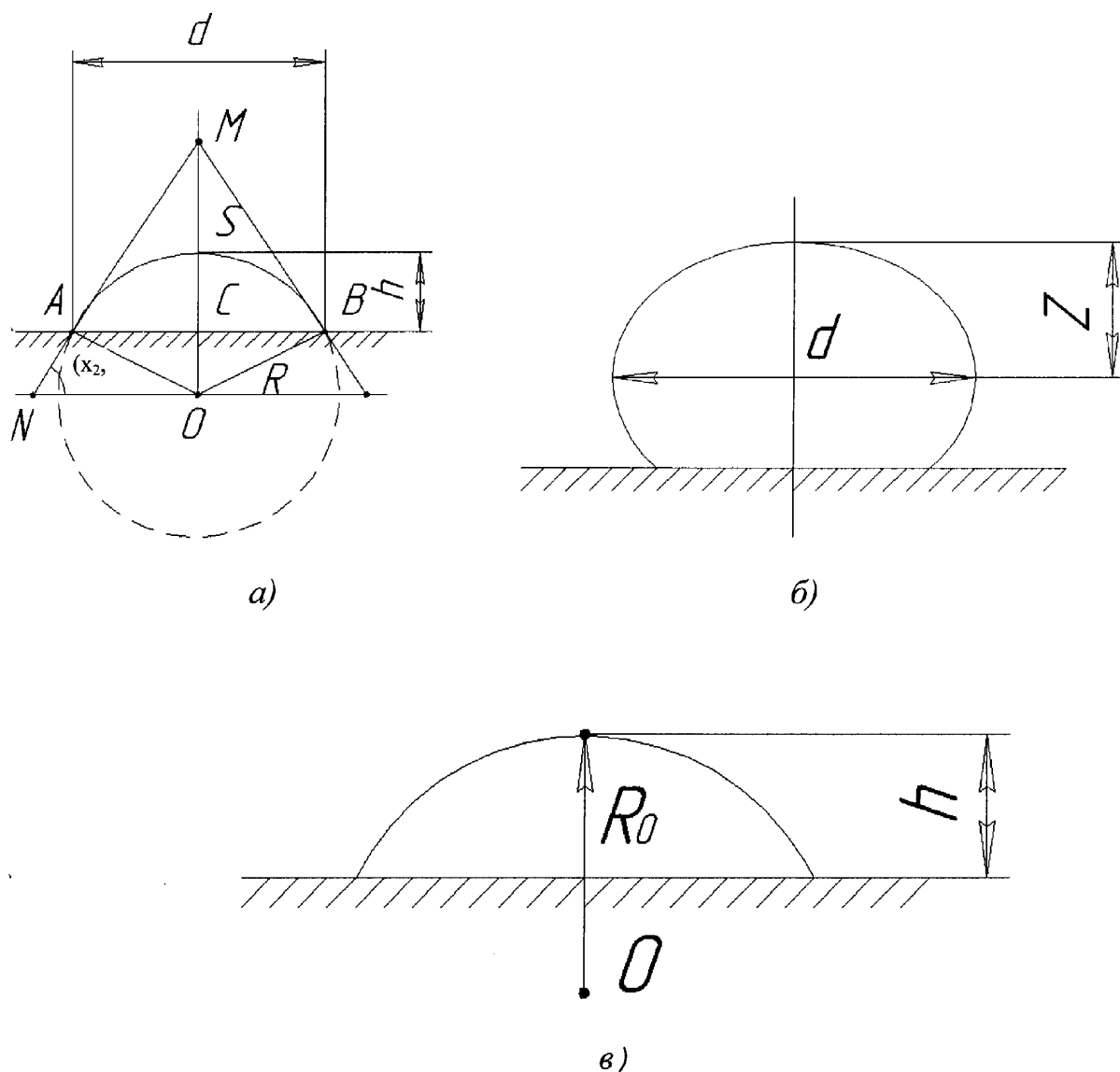


Рис. 1.5. Вимірювання ККЗ за параметрами  
лежачої на досліджуваній поверхні краплі

а) мала сферична змочуюча тверде тіло крапля; б) мала незмочуюча тверде тіло крапля; в) велика несферична крапля

. Стайкопулос [83] запропонував в результаті відповідного перетворення

таблиць Башфорта і Адамса визначити ККЗ шляхом знаходження коренів полінома 4-го порядку. Причому попередньо необхідно виміряти максимальний діаметр краплі  $d$  і висоту краплі від максимального діаметра до вершини  $z$  (рис. 1.5, б).

Пізніше Паддей [84] також запропонував залежність для розрахунку ККЗ на основі визначення об'єму краплі і її максимальних розмірів. Пуассон [85] запропонував розраховувати крайові кути на основі вимірних розмірів великих крапель (рис. 1.5, в) за допомогою такої залежності:

$$\cos \theta = 1 - 2 \cdot \left( \frac{h}{2a} - \frac{a}{3r} \cdot \left( \frac{1 - \cos^3 \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \right) + \frac{a}{R_0} \right)^2, \quad (1.15)$$

де  $h$  — висота краплі;  $r$  — радіус краплі;  $R_0$  — радіус кривизни краплі в її вершині;  $a$  — капілярна стала досліджуваної рідини;  $\sigma$  — поверхневий натяг досліджуваної рідини. Коли  $r$  є більшим 20 мм, виразом  $a/R_0$  у (1.15) можна знехтувати.

В роботах [87, 88] запропонована методика визначення ККЗ на основі результатів вимірювання координат трьох точок капілярної поверхні лежачої краплі при умові, що профіль краплі на горизонтальній поверхні може бути представленим у вигляді частини еліпса, а форма краплі — відповідно частини відповідного сплюсненого сфероїда.

Якщо визначені координати трьох точок  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ , тоді півосі еліпса  $a$  і  $b$  (рис. 1.6) і відстань  $c$  можуть бути розраховані на основі таких залежностей:



$$\begin{aligned}
 a &= x_1 \cdot \left( 1 - \frac{(y_1 + c)^2 \cdot (x_3 - x_1)^2}{(y_1 + c)^2 \cdot x_3^2 - (y_3 + c)^2 \cdot x_1^2} \right)^{-0,5}, \\
 b &= \left( \frac{(y_1 + c)^2 \cdot x_3^2 - x_1^2 \cdot (y_3 + c)^2}{x_3^2 - x_1^2} \right)^{-0,5}, \\
 c &= \frac{y_3^2 \cdot (x_1^4 - x_1^2 \cdot x_2^2) + y_1^2 \cdot (x_1^2 \cdot x_3^2 - x_1^4) + y_1^2 \cdot (x_1^2 \cdot x_2^2 - x_1^2 \cdot x_3^2)}{2y_3 \cdot (x_1^2 \cdot x_2^2 - x_1^4) + 2y_2 \cdot (x_1^4 - x_1^2 \cdot x_3^2) + 2y_1 \cdot (x_1^2 \cdot x_3^2 - x_1^2 \cdot x_2^2)}.
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Тоді величина ККЗ визначається із виразу:

$$\operatorname{tg} \theta = -b \cdot (b^2 - c^2)^{0,5} / (a \cdot c). \tag{1.17}$$

В роботі [?] запропонована методика розрахунку ККЗ на основі вимірювання найбільшої висоти краплі  $h_{\max}$  при додаванні до неї досліджуваної рідини за допомогою таких залежностей:

$$\cos \theta = 1 - h_{\max} \cdot \sqrt{2/(3\beta)}, \quad (\text{для } \theta \leq 90^\circ), \tag{1.18}$$

$$\cos \theta = -1 + \sqrt{4 - 2 \cdot \beta \cdot h_{\max}^2 / 3}, \quad (\text{для } \theta > 90^\circ), \tag{1.19}$$

$$\text{де } \beta = \Delta\rho \cdot g / (2\sigma).$$

Відомий метод вимірювання ККЗ методом нахиленої пластинки із твердого досліджуваного тіла [?], при реалізації, якого кут нахилу поверхні твердого тіла встановлюється таким, щоб рідина в місці її контакту з твердим тілом прийняла строго горизонтальне положення (рис. 1.7) [40].

Метод забезпечує високу точність і відтворюваність результатів при одночасній простоті проведення експерименту. Модифікація методу полягає в тому, що як тверде тіло використовується плоска пластина [65], або циліндричне тіло [76], або сферичне тіло [65]. У випадку циліндричного тіла глибину його занурення встановлюють такою, щоб з двох сторін рідина прийняла строго горизонтальне положення. Тоді значення ККЗ розраховують за формулою:

$$\cos \theta = 2h/d - 1, \tag{1.20}$$

де  $h$  — висота циліндра над поверхнею рідини,  $d$  — діаметр циліндра.

Для вимірювання крайових кутів натікання і відтікання циліндричний або горизонтально твердий предмет обертають в різних напрямках.

Метод забезпечує високу точність і відтворюваність результатів вимірювання.

Недостатками даного методу є вплив суб'єктивних факторів на отримані результати, трудність автоматизації процесу вимірювання та необхідність значної кількості рідини для проведення вимірювання.

Відомий також метод визначення ККЗ шляхом вимірювання висоти підняття рідини в капілярі, виготовленому із твердого досліджуваного матеріалу.

Даний метод придатний для визначення ККЗ, якщо існує можливість виміряти висоту підняття чи опускання рідини в капілярі  $h$  по відношенню до рівня рідини в посудині [37, 40, 91] (рис. 1.8).

В цьому випадку величина ККЗ визначається за допомогою такого виразу:

$$\cos \theta = \frac{h \cdot r \cdot \Delta \rho \cdot g}{2\sigma}, \quad (1.21)$$

де  $r$  — внутрішній радіус капіляра.

Опускаючи чи піднімаючи рідину в посудині можна досліджувати крайові кути відтікання і натікання. Метод вимагає, щоб капілярна трубка була виготовлена з досліджуваного твердого матеріалу, або з внутрішньої сторони трубка повинна бути покрита цим матеріалом.

Інколи крайові кути змочування можуть бути виміряні шляхом проведення дотичної до поверхні рідини в трубці в точці контакту рідини з внутрішньою стінкою трубки. При цьому капілярна трубка повинна бути виготовлена з прозорого матеріалу.

В останній час для вимірювання крайових кутів змочування знаходить застосування метод дослідження капілярних поверхонь рідин

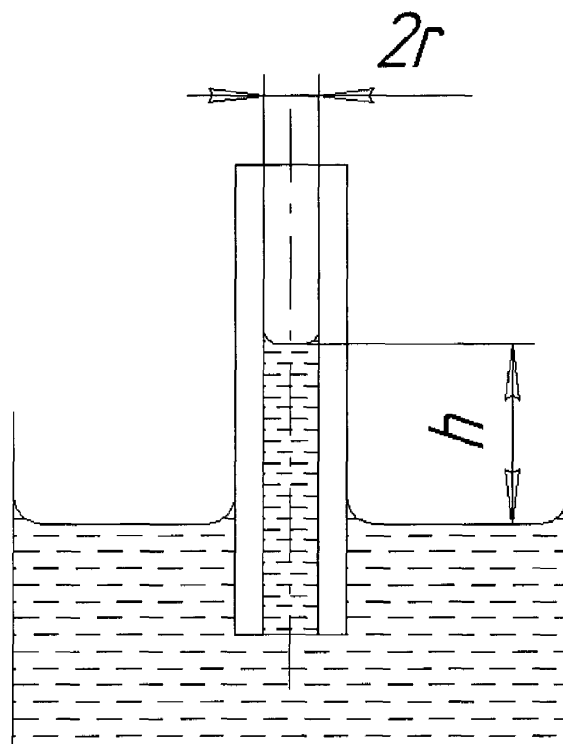


Рис. 1.8. Схема методу капілярного підняття

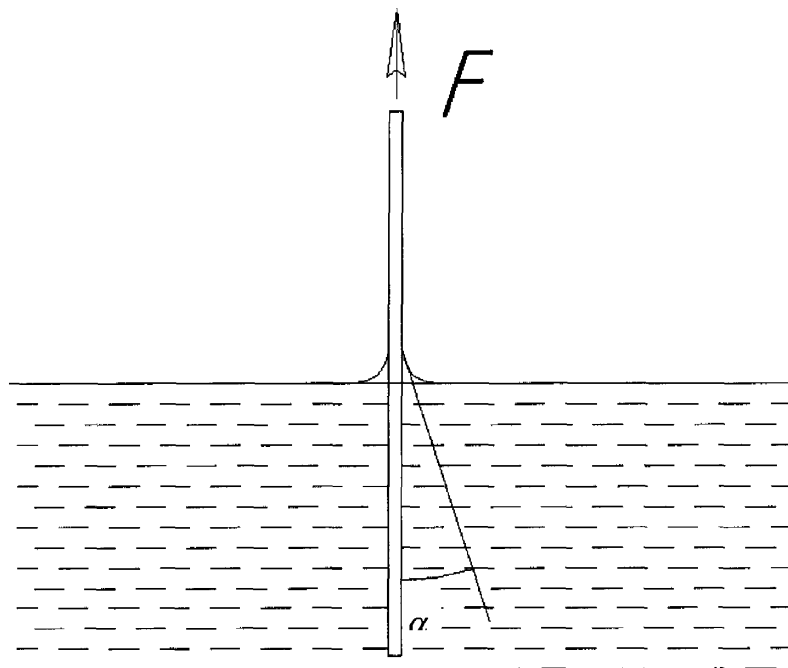


Рис. 1.9. Вимірювання ККЗ з методом Вільгельмі



між двома кулями [91]. Суть методу полягає в тому, що простір між двома кулями, виготовлених з досліджуваного матеріалу, заповнюють певним чином досліджуваною рідиною. Вимірюючи певні геометричні розміри між кулями за допомогою відповідних залежностей розраховують крайові кути змочування. Слід відмітити, що даний метод дозволяє визначити ККЗ натікання і відтікання до  $90^\circ$ .

Найпростіший варіант методу меніска біля плоскої пластини полягає у вимірюванні висоти  $h_c$  меніска, утвореного біля вертикальної стінки, тобто різниці рівнів рідини по центру посудини з нею (стінки якої виготовлені із досліджуваного твердого тіла), і на лінії контакту трьох фаз з подальшим розрахунком ККЗ при відомому ПН рідини за такою формулою [?]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot h_c^2}{2\sigma}. \quad (1.22)$$

Вимірювання  $h_c$  здійснюють катетометром. Похибка визначення ККЗ цим методом оцінювалось в межах  $1,0 \dots 1,5\%$ .

### 1.2.3 Опосередковані фізико-механічні методи визначення ККЗ

Крім вказаних вище геометричних методів визначення ККЗ і тих параметрів, які характеризують змочування, застосовуються непрямі методи оцінки змочуваності твердих тіл, які базуються на результатах вимірювання відповідних сил чи тисків при створенні або руйнуванні певної форми капілярної поверхні, яка утворена досліджуваною рідиною, твердим тілом у відповідному газовому середовищі.

В цих методах фіксують величини, які характеризують процес замочування.

При використанні методу Вільгельмі [40, 37] для визначення крайових кутів змочування здійснюють вимірювання сили, яка діє на тонку змочувану пластинку, коли остання знаходиться в контакті з досліджуваною рідиною (рис. 1.9).

Якщо ККЗ не дорівнює нулю, то сила, яка діє на предмет, визначається виразом:

$$F = l \cdot \sigma \cdot \cos \theta - V \cdot \rho \cdot g, \quad (1.23)$$

де  $l$  — периметр пластинки;  $V$  — об'єм рідини, витіснений пластинкою;  $\rho$  — густина досліджуваної рідини.

Крайові кути натікання методом Вільгельмі визначаються шляхом занурення пластинки в досліджувану рідину, а крайові кути відтікання відповідно при її витягуванні.

Різні перетворювачі для вимірювання діючої на пластинку сили використовуються в приладах, що реалізують вказаний метод Вільгельмі. Як пластинки також можуть використовуватись стрижні, паралелепіпеди, циліндри, кільця і предмети інших геометричних форм, які повинні бути виготовлені з твердого досліджуваного матеріалу.

Відомий також метод максимального тиску в газовому пухирці для визначення ККЗ.

Даний метод може бути використаний для визначення ККЗ, які є більшими від  $90^\circ$  (рис. 1.10) [92]. Суть методу полягає в тому, що три товстостінних вимірювальних каліброваних капіляри з різними радіусами вихідних отворів ( $r_1, r_2, r_3$ ) занурюють у досліджувану рідину на однакову глибину. Матеріал 2-го і 3-го капілярів повинен змочуватись досліджуваною рідиною з ККЗ, що дорівнює нулю, а 1-й капіляр повинен бути виготовлений з твердого матеріалу, змочування якого досліджується і для якого наперед відомо, що ККЗ є більшим  $90^\circ$ . Тоді ККЗ визначається за допомогою такої залежності:

$$\sin \theta = \frac{r_1 \cdot (r_2 \cdot (P_{\max 1} - P_{\max 2}) - r_3 \cdot (P_{\max 1} - P_{\max 3}))}{r_1 \cdot r_3 \cdot (P_{\max 3} - P_{\max 2})}, \quad (1.24)$$

де  $P_{\max 1}, P_{\max 2}, P_{\max 3}$  — відповідно виміряні максимальні тиски при утворенні газових пухирців із 1-го, 2-го і 3-го капілярів у досліджувану рідину.

Необхідною умовою досягнення максимального тиску  $P_{\max 1}$  на внутрішній кромці капіляра є така:

$$r_{\text{вн}} / r_{\text{зовн}} < \sin \theta, \quad (1.25)$$

де  $r_{вн}, r_{зовн}$  — відповідно внутрішній та зовнішній діаметри 1-го капіляра.

При визначенні ККЗ за виміряним тиском в рідинному мостіку [94] на ножовому торці капіляра 4 формують за допомогою дозатора 1 краплю 3 досліджуваної рідини до її зіткнення з горизонтальною поверхнею 2 досліджуваного твердого тіла, встановленого на заданій відстані  $h$  від торця капіляра (рис. 1.10).

За величиною тиску, виміряного у меніску після зіткнення краплі з твердим тілом, визначають величину ККЗ на основі такої залежності:

$$\cos \theta = \frac{2P}{P_0 - P_\pi} - \frac{P_0 + P_\pi}{P_0 - P_\pi}, \quad (1.26)$$

де  $P_\pi$  — тиск в меніску в моменті зіткнення краплі з твердою поверхнею;  $P_0$  — встановлений тиск в меніску після розтікання досліджуваної рідини по еталонному зразку, попередньо змоченому тією ж рідиною;  $P$  — тиск у рідинному мостіку між ножовим капіляром і поверхнею досліджуваного тіла.

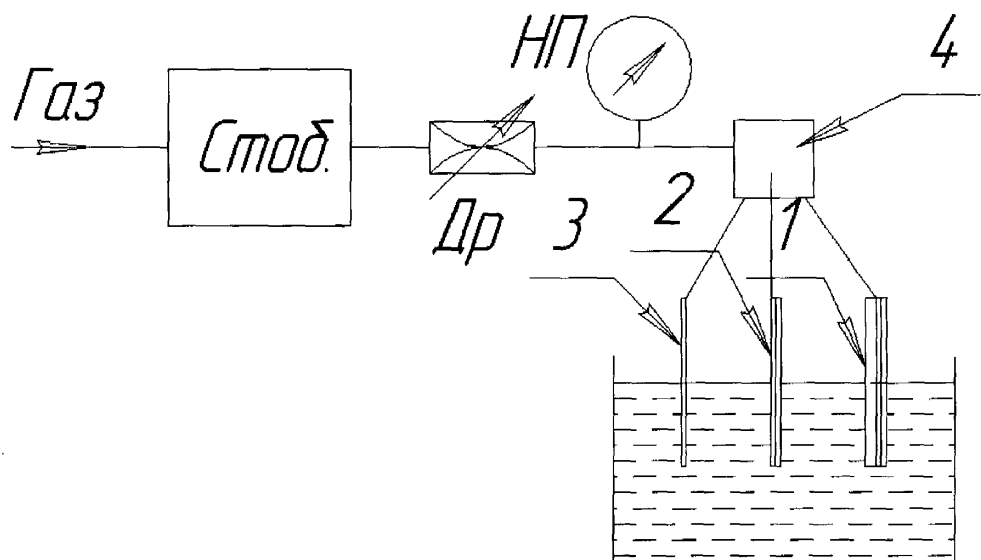


Рис. 1.10. Визначення ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску в газовому пухирці

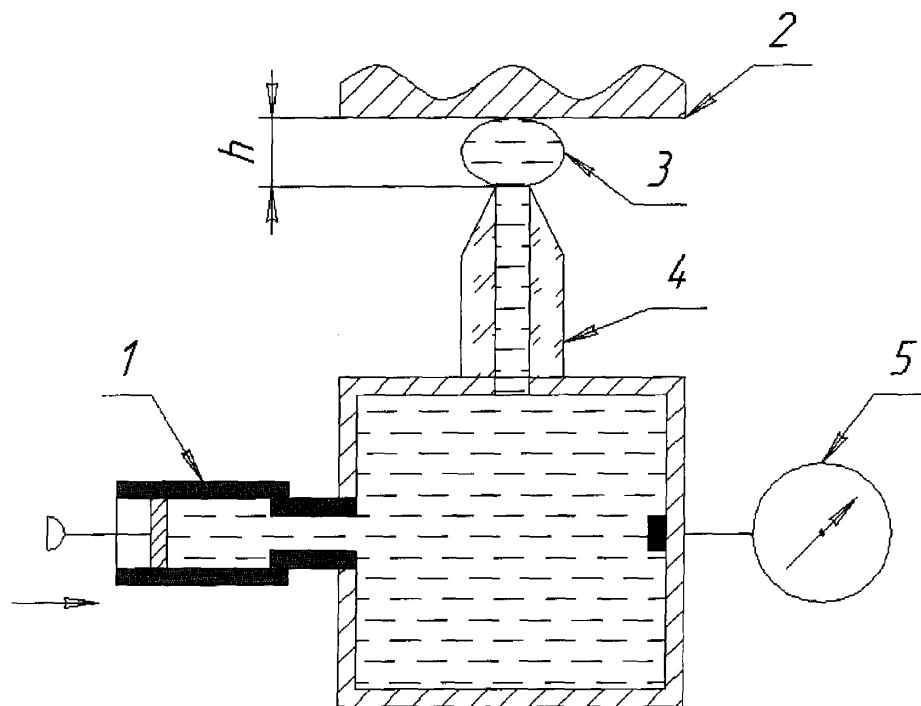


Рис. 1.11. Визначення ККЗ методом вимірювання тиску у капілярному мостіку

1 – дозатор; 2 – пластинка досліджуваного твердого тіла; 3 – капілярний мостик; 4 – ножовий калібрований капіляр; 5 – вимірювач тиску

Описаний метод дозволяє швидко і легко проводити вимірювання ККЗ, дозволяє автоматизувати процес вимірювання, але не позбавлений необхідності періодичного градуювання приладу з використанням еталонного зразка твердого тіла, на який треба попередньо ідеально тонкий шар досліджуваної рідини, а також складність очищення від досліджуваної рідини внутрішніх порожнин приладу, які з'єднують вимірювальний ножовий капіляр з дозатором і з давачем тиску.

### **1.3. Обґрунтування та постановка задачі досліджень**

Проаналізувавши розглянуті вище методи визначення ККЗ, можна стверджувати, що методи визначення ККЗ шляхом проектування на екран профілю краплі досліджуваної рідини на поверхні досліджуваного твердого тіла або безпосередньо маючи профіль краплі, є принципово простими і дуже наглядними, не містять методичної похибки, а тільки інструментальну похибку, яку можна звести до мінімуму, використовуючи прецизійні оптичні інструменти. Однак таке підвищення точності визначення ККЗ має зміст до певної межі. Оскільки поверхня твердого тіла завжди має неоднорідності механічного, фізичного, хімічного, структурного характеру і ці локальні неоднорідності суттєво впливають на величину ККЗ в кожній точці по периметру краплі (лінії контакту трьох фаз), тоді в результаті отримуємо тільки локальні значення ККЗ. Щоб отримати більш достовірні значення ККЗ по всьому периметру краплі можна проводити безпосередні вимірювання ККЗ, обертаючи систему крапля-тверде тіло відносно вертикальної осі симетрії з певним кроком. Але такий спосіб отримання достовірних значень ККЗ вимагає багатократних вимірювань і значного часу на проведення таких вимірювань. Це в свою чергу призводить до того, що за час вимірювання крапля випаровується і значення ККЗ внаслідок випаровування не відповідатимуть дійсності, тому що значення ККЗ тоді буде між значеннями кута натікання і кута відтікання. Заходи, спрямовані на зменшення випаровування краплі, не дадуть бажаного

результату тому, що в закритому об'ємі, в атмосфері насиченої пари крапля буде знаходитись в інших фізичних умовах і значення ККЗ буде відрізнятись від реального значення, визначеного при нормальних умовах.

Основною перевагою фізико-механічних методів визначення ККЗ є можливість автоматизувати процес, оскільки силу чи тиск легко перетворити в електричний сигнал сучасними технологічними засобами, а потім відповідним чином обробити отримані результати вимірювання вказаних параметрів. При використанні фізико-механічних методів практично відсутні суб'єктивні фактори. Однак, описаний вище метод Вільгельмі недостатньо оперативний, йому властива явна дискретність процесу, тому його важче автоматизувати. Методи, пов'язані з вимірюванням тиску у флюїдних менісках, реалізується технічно значно легше і дискретність вимірювань порівняно невелика, вона залежить від швидкості утворення флюїдних менісків і може бути зведена до одиниць секунд, що сприятиме високій продуктивності процесу вимірювань. Але враховуючи деякі недоліки методу визначення ККЗ за тиском у рідинному мостику у найбільш придатним є метод максимального тиску в газовому мостику.

В результаті приведенного вище аналізу можна зробити наступні висновки:

1) існує значна потреба знати і враховувати змочування рідинами і розчинами речовин поверхонь твердих тіл в технологічних процесах різних галузей народного господарства, де роль властивостей на границях розділу фаз є визначною. Особливо це є важливим у процесах витиснення пластових флюїтів при видобутку нафти і газу. Параметри, які характеризують змочування, в багатьох випадках є основними якісними і кількісними характеристиками таких процесів;

2) величина ККЗ нарівні з адгезією характеризує ступінь взаємодії рідин і твердих речовин при їхньому контакті. Однак параметр ККЗ є більш ефективним і значно легше піддається вимірюванню;

3) даний час як в Україні, так і за кордоном відсутні засоби, які б дозволяли проводити в автоматичному режимі вимірювання ККЗ з високою

точністю, а також дозволяли б досліджувати кінетику процесів змочування;

4) найбільш придатними з точки зору автоматизації процесу вимірювання ККЗ, забезпечення високої продуктивності процесу визначення ККЗ і високої точності отриманих результатів є фізичний метод, який базується на вимірюванні тиску в капілярних поверхнях.

Виходячи із вище наведених висновків таким чином необхідно:

виконати теоретичне обґрунтування методу і методики визначення ККЗ поверхонь твердих монолітних матеріалів шляхом вимірювання тиску в капілярних поверхнях, що можуть бути утвореними з використанням досліджуваних твердого тіла і відповідної рідкої фази у певному газовому середовищі;

особливу увагу приділити розробленню методу, методики і пристрою для визначення ККЗ пористих тіл з різними розмірами пористих каналів які при наявності попереднього насичення цих тіл певними рідкими чи газовими флюїдами, так і очищеними на межі контакту і заданим газовим середовищем;

розробити технічні засоби для контролю ККЗ на основі розроблених методів і методик, як для монолітних твердих матеріалів, так і для пористих тіл з різними розмірами пористих каналів і різного середовища в цих пористих каналах, а також дослідити метрологічні характеристики цих технічних засобів;

провести лабораторні випробування розроблених засобів контролю ККЗ з метою підтвердження дієздатності розроблених методик контролю як монолітних, так і пористих тіл і виконати аналіз отриманих результатів.

## Розділ 2

# ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ МОНОЛІТНИХ ТІЛ ШЛЯХОМ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБМЕЖЕНИХ КАПІЛЯРНИХ ПОВЕРХОНЬ

Для теоретичного обґрунтування визначення крайового кута змочування за вимірним тиском в газовому капілярному містку, а також відповідних геометричних параметрів лежачої краплі на поверхні досліджуваного твердого тіла доцільно розглянути можливі капілярні поверхні, особливості їх утворення, проаналізувати найхарактерніші як фізичні, так і геометричні параметри цих капілярних поверхонь, які можуть бути вимірними і в подальшому використані для визначення ККЗ. Це полегшить розробку математичної моделі процесу утворення лежачої краплі на поверхні твердого тіла і газового капілярного містка в досліджуваній рідині з вихідного отвору нижнього торця зануреного вертикально в рідину капіляра над поверхнею твердого тіла. У свою чергу це дозволить встановити функціональні залежності між ККЗ та вимірним тиском всередині газового містка, а також між геометричними параметрами лежачої краплі і ККЗ.

### 2.1. Загальна характеристика капілярних поверхонь

Трифазні системи тверде тіло-рідина-газ мають різні поверхні розділу фаз, причому поверхні розділу фаз рідина-газ і рідина-рідина є рухомими, тому вони утворюють рівноважні форми, які називають рівноважними капілярними поверхнями. Вивчення рівноважних капілярних поверхонь займає визначне місце в загальній теорії капілярності, основи якої були закладені Юнгом (рівняння (1.2)) [38], та Лапласом [39], який запропонував таке рівняння, що описує зв'язок між фізичними та геометричними параметрами двофазної системи



$$\Delta P = \sigma_{pg} (K_1 + K_2), \quad (2.1)$$

де  $\Delta P$  – різниця внутрішнього і зовнішнього тисків, які діють на поверхню розділу двох фаз у вибраній точці;  $K_1$ ,  $K_2$  – значення кривизни капілярної поверхні в цій точці у взаємно-перпендикулярних площинах;  $\sigma_{pg}$  – поверхневий натяг на межі розділу фаз „рідина–газ”.

В рівняннях Юнга (1.2) і Лапласа (2.1) вже закладена можливість визначення одного із фізико-хімічних параметрів взаємодії компонентів трифазної системи „рідина-тверде тіло-газ” – це ККЗ  $\theta$  або коефіцієнт ПН  $\sigma_{pg}$ , знаючи інші параметри та геометричні параметри капілярної поверхні.

Аналізуючи рівняння Лапласа (2.1), не можна не помітити, що однією з вимірюваних на практиці величин є капілярний тиск. Якщо він є відомим, то для знаходження ККЗ чи ПН не треба знати форму всієї капілярної поверхні, досить знати кривизни  $R_1$  і  $R_2$  цієї поверхні в якій-небудь одній точці. Досліджуючи цю проблему ще в минулому столітті Башфорт і Адамс [82] знайшли теоретичне розв'язання задачі для спрощення техніки вимірювання ПН, вдосконалення якого знайшло продовження в роботах Кантора, Шредінгера, С. Сагдена, Дюня, П. Ребіндера. П. Пугачевича, В. Файнермана, І. Кісіля [34, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113]. На основі раніше запропонованого ПН можна визначати, вимірюючи тільки максимальний тиск в газовому пухирці, який витискається в досліджувану рідину на певній глибині із каліброваного капіляра і не вимірюючи при цьому параметри пухирця, а тільки задавшись або вимірявши геометричні параметри капіляра.

Тому постає задача знаходження аналогічного рішення для проблеми визначення ККЗ методом максимального тиску у газовому містку, що утворюється між нижнім торцем каліброваного капіляра і поверхнею монолітного твердого тіла, що знаходиться нижче на певній віддалі.

Багато методів визначення міжфазних параметрів тією чи іншою мірою базуються на вивченні осесиметричних менісків, обмежених поверхнями обертання. Це зв'язано з тим, що, по-перше, саме даний тип менісків найлегше

реалізується в лабораторних умовах. По-друге, при наявності обертальної симетрії потрібен аналіз не всієї поверхні, а лише її меридіана, тобто плоскої кривої, яка утворює дану поверхню при обертанні відносно деякої осі [37]. Значно полегшує задачу той факт, що в літературі інтенсивно ведуться дослідження, присвячені аналізу форми симетричних менісків різної конфігурації.

Під меніском розуміють одну (звичайно меншу за об'ємом) із двох фаз (газ або рідина), яка обмежена викривленою поверхнею розділу цих фаз. Якщо поверхня має обертальну симетрію, то меніск називають осесиметричним. Фазу в середині меніска позначають буквою  $\alpha$ , а навколишнє середовище –  $\beta$ .

Якщо вісь обертання перетинається поверхнею меніска, то такі меніски називаються згорнутими. Якщо ж вісь обертання не перетинається поверхнею і при цьому у верхній чи нижній частині меніска поверхня асимптотично переходить в горизонтальну поверхню розділу фаз, такі меніски називають розгорнутими [37]. Ці види менісків формуються на одній поверхні твердого тіла. Якщо ж поверхня меніска сформована між двома твердими поверхнями, то такий тип меніска називається містком. Поверхня містка, як і розгорнутого меніска, не перетинає осі обертання.

Наявність двох твердих поверхонь забезпечує, очевидно, ширший спектр можливих конфігурацій містків в порівнянні з іншими типами менісків. Це пов'язано з тим, що виникає більша кількість можливих комбінацій різних граничних умов і параметрів, які характеризують форму містка. Деякі типові профілі рідинних ( $\rho_\alpha < \rho_\beta$ ) і газових ( $\rho_\alpha > \rho_\beta$ ) містків приведені на рис. 2.1, де  $\rho$  – густина відповідного середовища.

Кривизну поверхні у відповідній точці можна характеризувати за допомогою радіусів кривизни в точці перетину поверхні двома взаємно перпендикулярними площинами, орієнтованими нормально до поверхні в даній точці  $A$  (рис. 2.2).

Кривизна кожної з цих кривих залежить від напрямку перетинів. Але завжди існують такі перетини, в яких значення кривизни для однієї кривої буде

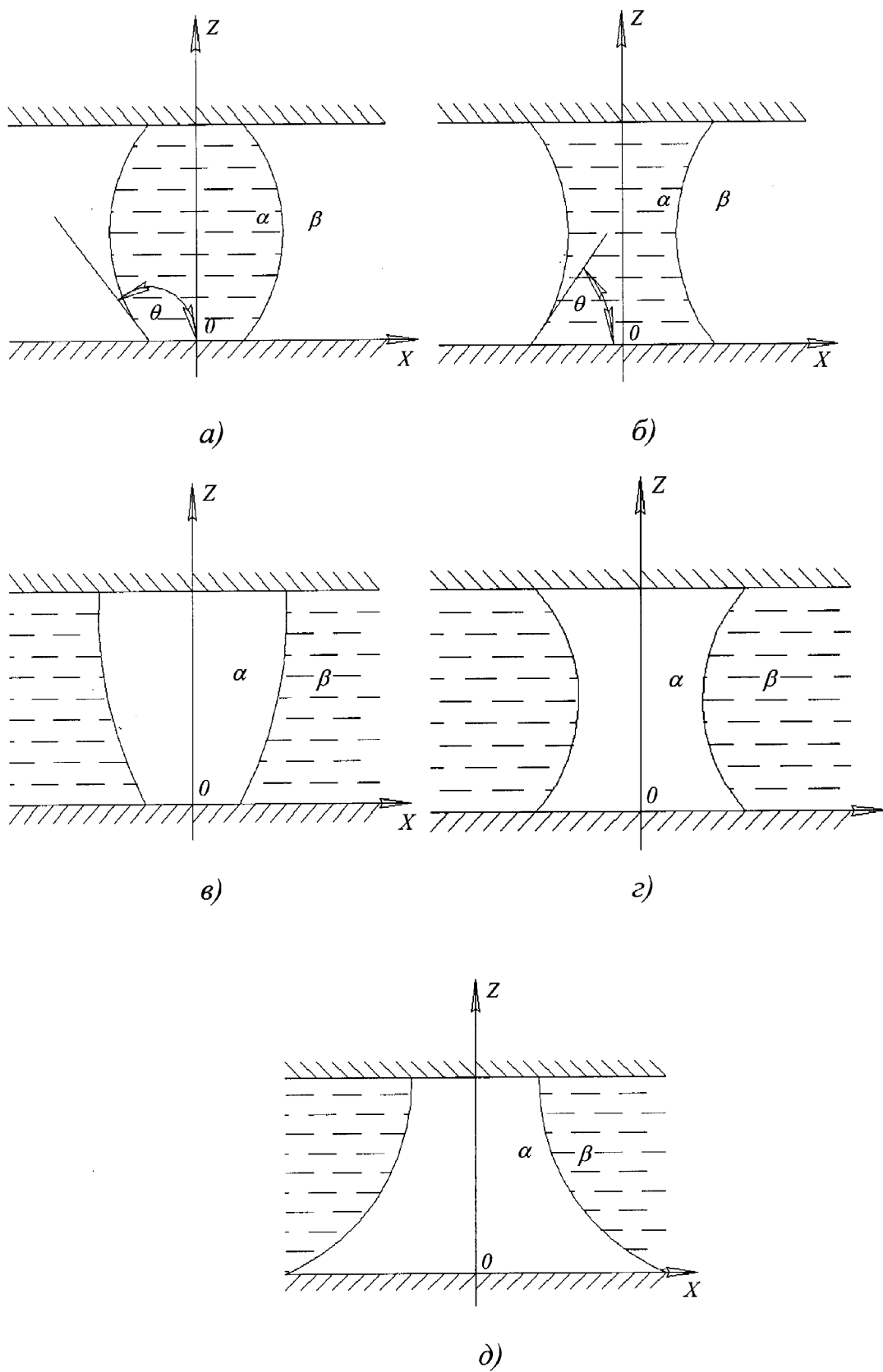


Рис. 2.1. Профілі рідких ( $\rho_\alpha > \rho_\beta$ ) (а, б) і газових ( $\rho_\alpha < \rho_\beta$ ) (в, г, д) містків

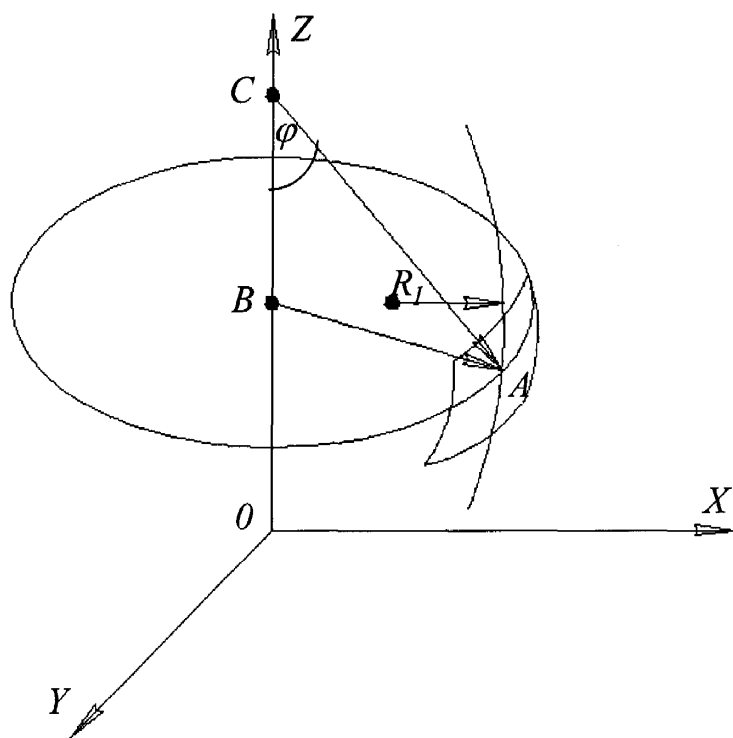


Рис. 2.2. Радіуси кривизни елемента меніска

максимальним, а для другої – мінімальним. Ці особливі значення кривизни називаються головними кривизнами поверхні в даній точці і саме вони ( $K_1$  і  $K_2$ ) фігурують у формулі Лапласа (2.1):

$$\Delta P = P_\alpha - P_\beta = \sigma_{p\sigma} (K_1 - K_2) = \sigma_{p\sigma} (1/R_1 - 1/R_2), \quad (2.2)$$

де  $P_\alpha$  — надлишковий тиск всередині меніска на рівні точки  $A$ ;  $P_\beta$  — надлишковий тиск ззовні меніска на рівні точки  $A$ ;  $K_1 = 1/R_1$ ;  $K_2 = 1/R_2$ ;  $R_1$  і  $R_2$  — відповідно радіуси кривизни капілярної поверхні в точці  $A$ .

При дослідженні поверхневих властивостей часто використовують різні типи згорнутих асиметричних менісків, якими є меніски лежачої краплі на горизонтальній поверхні твердого тіла, висячої краплі під поверхнею твердого тіла, притисненої бульбашки під горизонтальною поверхнею твердого тіла, а також інші типи менісків, наприклад газові чи рідинні містки між двома твердими поверхнями (рис. 2.1).

Профілі капілярних містків досліджувалися такими вченими, як Палдей [96], Гарт ланд [98], Еванс, Буш, Джонс [100, 102, 103], О. Малько [94].

Розглядалися деякі типові ситуації, коли капілярні містки розмішені між двома плоскими поверхнями [98, 101], між торцями двох циліндрів [102, 103], між двома сферичними поверхнями, між двома коаксіальними циліндричними поверхнями. Однак профілі таких містків розглядалися в ракурсі знаходження зв'язку між параметрами містків і поверхневим натягом на межі контакту рідина-газ, які утворюють місток. Тільки в роботі [94] було досліджено процес утворення рідинного містка між ножовим капіляром і досліджуваною плоскою горизонтальною поверхнею твердого тіла з метою визначення зв'язку між ККЗ, і геометричними параметрами меніска та тиску всередині нього.

Таке дослідження тільки згорнутих газових або рідинних менісків на відміну від незгорнутих рідинних містків пояснюється двома причинами: по-перше, раніше дослідженню змочування і його ролі в технологічних процесах приділялася менша увага, ніж поверхневому натягу рідин, а для визначення поверхневого натягу достатнім є вивчення двофазної системи „рідина-газ”.

(рідина-рідина); по-друге, теоретичне дослідження трифазної системи складніше, ніж двофазної, і вимагає знання крайових умов при розв'язуванні диференціальних рівнянь, які моделюють процеси утворення капілярних поверхонь. Відповідно кількість вимірюваних координат профілю незгорнутого містка повинна бути більшою, ніж при дослідженні згорнутих менісків.

## 2.2. Математичне моделювання процесу утворення газового містка

Для встановлення зв'язку у явній формі між фізичними, геометричними параметрами процесу утворення незгорнутого капілярного газового містка та максимальним тиском у цьому містку, який утворений в досліджувану рідину із капіляра до поверхні досліджуваного твердого тіла, необхідно теоретично проаналізувати процес утворення цього містка.

Процес утворення газового пухирця в рідині, як вказувалось вище, вивчений вже достатньо добре. Розглянемо продовження цього процесу з моменту, коли газовий пухирець дотикається до поверхні досліджуваного твердого тіла, тобто, коли меніск ще згорнутий, але почнеться його перехід до газового містка (незгорнутий газовий місток).

Для згорнутих менісків початок декартових координат зручно вибрати у вершині меніска, тобто в точці перетину поверхні обертання з її віссю (вісь  $z$ ), а саму вісь направити всередину меніска (рис. 2.2).

Меридіальна кривизна поверхні осесиметричного меніску визначається за виразом [114]:

$$K_1 = \frac{d\varphi}{dL}, \quad (2.3)$$

де  $\varphi$  – кут нахилу дотичної в даній точці меридіану (рис. 2.2),  $L$  – довжина елемента дуги.

Другу головну кривизну  $K_2$  можна виразити через кривизну паралелі згідно з теоремою Мен'є, в якій стверджується, що відхилення кривизни кривих в даній точці  $A$  (рис. 2.2) в нормальному та похилому перетинах

дорівнює косинусу кута між ними [114], тобто

$$K_2 = K_3 \cos \angle CAB = K_3 \cos(90^\circ - \varphi) = K_3 \sin \varphi. \quad (2.4)$$

Оскільки

$$K_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{X}, \quad (2.5)$$

то азимутальна кривизна  $K_2$  (іноді її називають циліндричною) буде такою:

$$K_2 = \frac{\sin \varphi}{X} = \frac{1}{R_2}. \quad (2.6)$$

Підставивши вирази (2.3) і (2.6) у рівняння Лапласа (2.1) і враховуючи густини рідкої ( $\rho_\beta$ ) і газової ( $\rho_\alpha$ ) фаз, а також координати точки  $A$ , одержимо:

$$\left( \frac{d\varphi}{dL} + \frac{\sin \varphi}{X} \right) \cdot \sigma = (P_{o\alpha} - P_{o\beta}) \pm (\rho_\alpha - \rho_\beta) \cdot g \cdot Z. \quad (2.7)$$

В цьому рівнянні знак „+” відповідає лежачій краплі і витягнутому пухирцю, а знак „-” – висячій краплі і притиснутому пухирцю, тобто має виконуватись умова:  $\rho_\beta > \rho_\alpha$  і  $(\Delta\rho = \rho_\beta - \rho_\alpha)$ . Причому в обидвох випадках початок координат знаходиться у вершині меніска (в омболічній точці меніска), а напрям осі  $z$  відповідає напрямку в середину меніска.

Поділивши рівняння (2.7) на  $\sigma_{pg}$ , одержимо:

$$\frac{d\varphi}{dL} + \frac{\sin \varphi}{X} = \frac{P_{o\alpha} - P_{o\beta}}{\sigma_{pg}} \pm \frac{\rho_\alpha - \rho_\beta}{\sigma_{pg}} \cdot g \cdot Z. \quad (2.8)$$

Якщо ввести позначення

$$\left( \frac{\rho_\alpha - \rho_\beta}{\sigma_{pg}} \cdot g \right) = \frac{1}{a^2}, \quad (2.9)$$

тобто

$$a = \sqrt{\frac{\sigma_{pg}}{(\rho_\alpha - \rho_\beta) \cdot g}} = \sqrt{\frac{\sigma_{pg}}{\Delta\rho \cdot g}}, \quad (2.10)$$

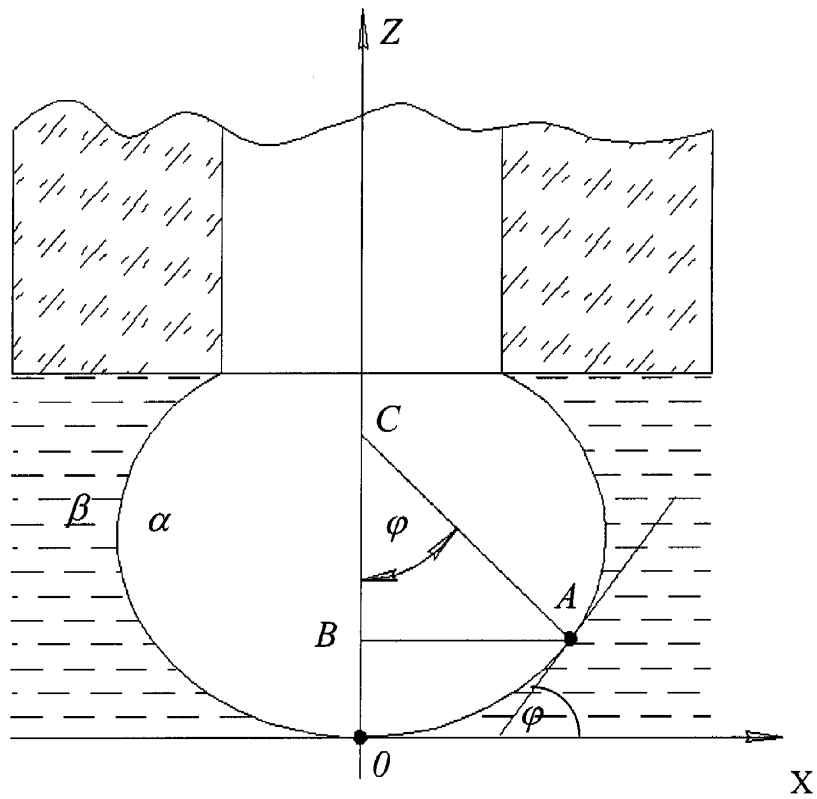


Рис. 2.3. Меридіанний профіль меніска газового пухирця в момент торкання його вершини із плоскою твердою поверхнею



то одержимо рівняння Лапласа у вигляді

$$\frac{d\varphi}{dL} + \frac{\sin \varphi}{X} = \frac{\Delta P}{\sigma_{pe}} - \frac{1}{a^2} \cdot Z. \quad (2.11)$$

Введена величина  $a^2$  є капілярною сталою, яка має розмірність квадрата довжини і визначає вплив сили тяжіння на форму капілярних поверхонь. Наприклад, якщо для води при температурі 20°C  $\sigma = 72,5 \text{ мН/м}$  і  $\Delta \rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , то капілярна стала  $a^2 \approx 7,4 \text{ мм}^2$ .

Якщо розглянути рівняння (2.11) відносно вершини пухирця, то його окремі члени будуть наступними:

$$\frac{d\varphi}{dL} = K_{10}, \quad \frac{\sin \varphi}{X} = K_{20}, \quad \frac{Z}{a^2} = 0. \quad (2.12)$$

Але у вершині меніска кривизни поверхні у взаємно перпендикулярних площинах однакові, тобто  $K_{10} = K_{20} = K_0$ . Звідси

$$\frac{\Delta P}{\sigma_{pe}} = 2 \cdot K_0. \quad (2.13)$$

З урахуванням (2.13) рівняння (2.11) буде мати вигляд:

$$\frac{d\varphi}{dL} + \frac{\sin \varphi}{X} = 2 \cdot K_0 - \frac{Z}{a^2}. \quad (2.14)$$

Інші параметри меніска визначаються з рис. 2.3 наступним чином:

$$\frac{dX}{dL} = \cos \varphi, \quad \frac{dZ}{dL} = \sin \varphi. \quad (2.15)$$

Диференціали об'єму та площі поверхні осесиметричного меніска, враховуючи інтегральні формули об'єму  $V$  та площі  $A$  тіл обертання, матимуть вигляд:

$$\frac{dA}{dL} = 2\pi X, \quad \frac{dV}{dL} = \pi X^2 \sin \varphi. \quad (2.16)$$

Рівняння (2.14–2.16) утворюють систему, розв'язок якої визначає координати всіх точок лінії меридіального перетину осесиметричного меніска для капілярної сталої  $a^2$  і кривизни  $R_0$ . Розв'язати таку систему рівнянь можна чисельними методами, додаючи відповідні крайові умови.

Вибір як незалежної змінної довжини дуги  $L$  обумовлений тим, що довжина дуги неперервно зростає вздовж меридіана в напрямку від вершини, в тому числі і в області перегину, в якій похідні  $\frac{dX}{dL}$  і  $\frac{dZ}{dL}$  на відміну від похідних  $\frac{dX}{d\varphi}$  та  $\frac{dZ}{d\varphi}$  не зазнають розриву.

Для загального аналізу всіх можливих капілярних поверхонь доцільно всі параметри системи (2.14–2.16) привести до безрозмірного вигляду. Це можна зробити аналогічно Башфорту і Адамсу [82] шляхом множення всіх параметрів у (2.14–2.16) на параметр  $K_0$  у такій степені, яку розмірність має змінна  $a$ .

Така постановка є правомірною на основі теорії подібності [35], яка дозволяє досліджувати кількісні співвідношення між різними параметрами реальних фізичних систем чи на їх зменшених, чи збільшених моделях і встановлює, що будь-яке кількісне співвідношення між різними фізичними величинами може бути виражене у вигляді функціонального зв'язку між безрозмірними комбінаціями цих величин. Наприклад, взаємозв'язок параметрів  $a'$  і  $a''$  для двох капілярних поверхонь, кривизни яких в омболічній точці дорівнюють відповідно  $K'_0$  і  $K''_0$ , буде виражений відношенням

$$\frac{a'}{a''} = \frac{K''}{K'}. \quad (2.17)$$

Це означає, що можна переходити від однієї капілярної поверхні до іншої з коефіцієнтом подібності

$$k_{\text{под}} = \frac{K''}{K'} = \frac{a'}{a''} \quad (2.18)$$

вивчати множину подібних капілярних поверхонь на основі вивчення однієї, враховуючи що відношення будь-яких геометричних параметрів в довільній точці капілярної поверхні із параметром  $K'$  буде рівне відношенню відповідних параметрів у відповідній точці капілярної поверхні з параметром  $K''$ .

Висновки з теорії подібності дозволяють досліджувати капілярні поверхні,

в тому числі газові містки і краплі рідини на поверхні, у безрозмірному вигляді, тобто всі геометричні параметри привести до одного з них, який приймається за одиницю масштабу. Найзручніше для порівняння різних газових містків і простоти аналізу фізичного процесу утворення газового пухирця і містка в ролі одного параметра взяти радіус  $r$  вихідного отвору капіляра, який рівний радіусу основи пухирця або містка.

Оскільки, виходячи з теорії подібності, безрозмірна капілярна поверхня може цілком характеризуватися відношенням фізичного параметру  $a$  до будь-якого геометричного параметру у відповідному степені і кутом  $\varphi$ , то при фіксованому відношенні

$$a_{\delta} = a/r \quad (2.19)$$

різним значенням кута  $\varphi$  у системі рівнянь (2.14–2.16) буде відповідати ряд досліджуваних станів капілярної поверхні. Причому, до тих пір, поки капілярною поверхнею буде згорнутий газовий пухирець, який утворюється з вихідного отвору вертикально напрямленого вниз капіляра, то при фіксованому значенні  $r$  буде тільки одне значення  $a_{\delta}$  для заданого безрозмірного об'єму  $V_{\delta}$  пухирця, якому відповідає тільки одна капілярна поверхня, а комбінації  $a_{\delta}$  і  $V_{\delta}$  створюватимуть нескінчену множину менісків.

Інші параметри приводяться до безрозмірного вигляду після ділення на радіус капіляра  $r$  в такому степені, як і розмірність відповідних змінних:

$$L_{\delta} = L/r; \quad X_{\delta} = X/r; \quad Z_{\delta} = Z/r; \quad (2.20)$$

$$S_{\delta} = S/r^2; \quad V_{\delta} = V/R^3; \quad K_{\delta} = K_0 \cdot r,$$

де  $L_{\delta}$ ,  $S_{\delta}$ ,  $K_{\delta}$  – відповідно безрозмірні довжина дуги меніска, площа поверхні і кривизна.

Після підстановки безрозмірних параметрів (2.19–2.20) у систему (2.14–2.16) одержимо таку систему диференціальних рівнянь, які комплексно описують осесиметричну капілярну поверхню у безрозмірній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi}{dL_6} = 2 \cdot K_6 - \frac{\sin \varphi}{x_6} - \frac{z_6}{a_6^2}; \\ \frac{dx_6}{dL_6} = \cos \varphi; \\ \frac{dz_6}{dL_6} = \sin \varphi; \\ \frac{dS_6}{dL_6} = 2\pi x_6; \\ \frac{dV_6}{dL_6} = \pi x_6^2 \sin \varphi. \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Система диференціальних рівнянь (2.21) є математичною моделлю осесиметричних менісків.

Математичне моделювання процесу утворення меніска здійснюється з урахуванням того, що капіляр має ідеально тонку стінку. З цією метою на практиці використовують так званий ножовий капіляр, ідеалізована форма якого зображена на рис. 2.4.

Метою математичного моделювання газового містка є знаходження для різних значень капілярної сталої  $a^2$  геометричних параметрів (2.20) газового містка як функції кута змочування  $\theta$ . Геометричний параметр  $K_6$  – пов'язаний відношенням (2.13) з перепадом тиску через поверхню газового містка в точці, який також може бути приведеним до безрозмірної форми наступним чином:

$$P_6 = \frac{\Delta P}{\Delta \rho \cdot g \cdot r}. \quad (2.22)$$

У свою чергу екстремум тиску  $P_6$  в газовому містку прямо зв'язаний з екстремумом геометричної кривизни капілярної поверхні. Задача полягає в знаходженні дискретної множини капілярних поверхонь на різних стадіях формування газового містка, меридіальні перерізи яких можуть мати різну форму і відповідно різну кривизну при фіксованих параметрах  $a_6^2$ ,  $z_6$ ,  $r$  та  $\theta$  (рис.2.4).

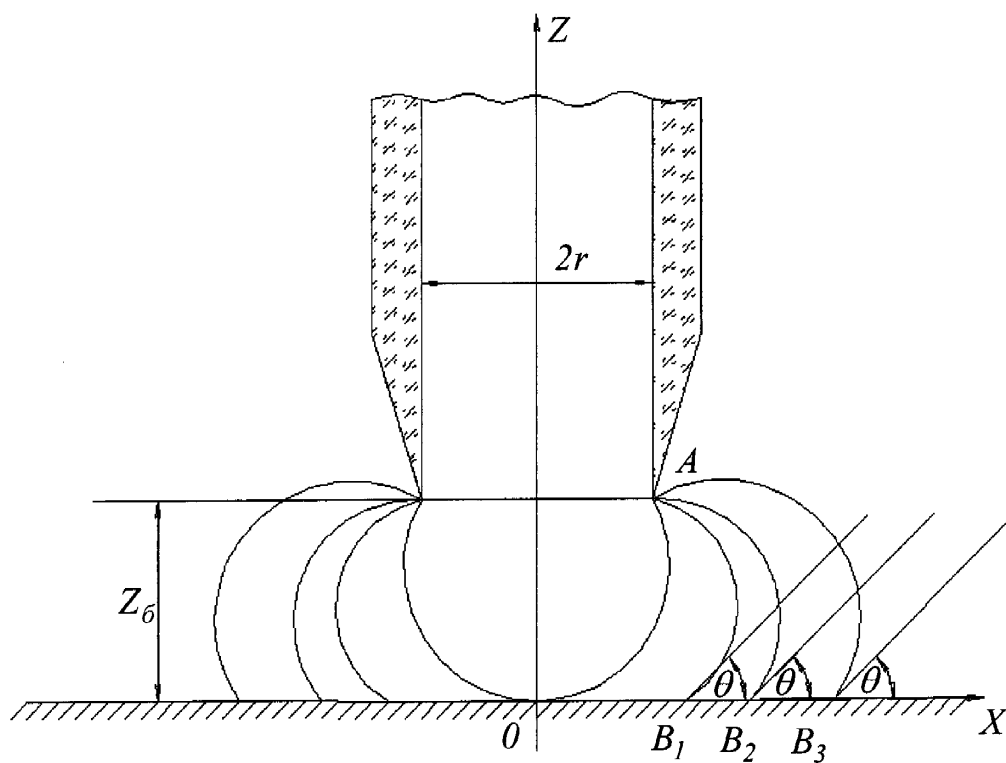


Рис. 2.4. Капілярні поверхні газового містка на різних стадіях його утворення

Взагалі, таких капілярних поверхонь, меридіональний переріз яких зображено кривими  $AB_1, AB_2, AB_3$ , існує нескінченна кількість, але сам принцип числового інтегрування диференціальних рівнянь визначає дискретність математичного моделювання процесу утворення капілярного містка.

Розглянемо фізично, як буде відбуватися процес утворення капілярного містка після того, як газовий пухирець зіткнувся омболічною точкою з поверхнею твердого тіла. Враховуємо, що нижній зріз капіляру, з якого утворюється газовий пухирець, зафіксований на певній віддалі  $z_0$  від поверхні твердого тіла.

У момент торкання газового пухирця поверхні твердого тіла відбувається якісна зміна капілярної поверхні. Якщо до цих пір форма капілярної поверхні визначалась взаємодією рідини і газу, то з цього моменту вступила в дію третя фаза – тверде тіло. До цього моменту мав місце згорнутий меніск, а власне з цього моменту починається капілярний місток, який представляє собою незгорнутий меніск.

Реальний ножовий капіляр має притуплений край вихідного торця (рис. 2.5).

Отже, фізично процес росту пухирця при збільшенні тиску в капілярі буде полягати в переміщенні меніска вниз і зміні його форми. Якщо рідина змочує капіляр, то, враховуючи гістерезис змочування, між капілярною поверхнею і поверхнею капіляра встановлюється крайовий кут відтікання  $Q_0$ . В положенні 1 ККЗ  $\theta_0$  при умові перпендикулярності внутрішньої стінки капіляру до площини торця буде рівний куту  $\psi_1$  між горизонтальною лінією та дотичною до меніска в точці контакту трьох фаз. При збільшенні тиску меніск рухатиметься вниз, його форма буде змінюватися, але ККЗ,  $\theta_0$  весь час буде однаковим, тому що властивості взаємодіючих фаз залишаються незмінними.

При переміщенні лінії контакту меніска по торцю капіляра фактично змінюється радіус ліній контакту, але при достатній гостроті торця капіляра цим приростом радіуса можна знехтувати і вважати радіус основи пухирця постійним.

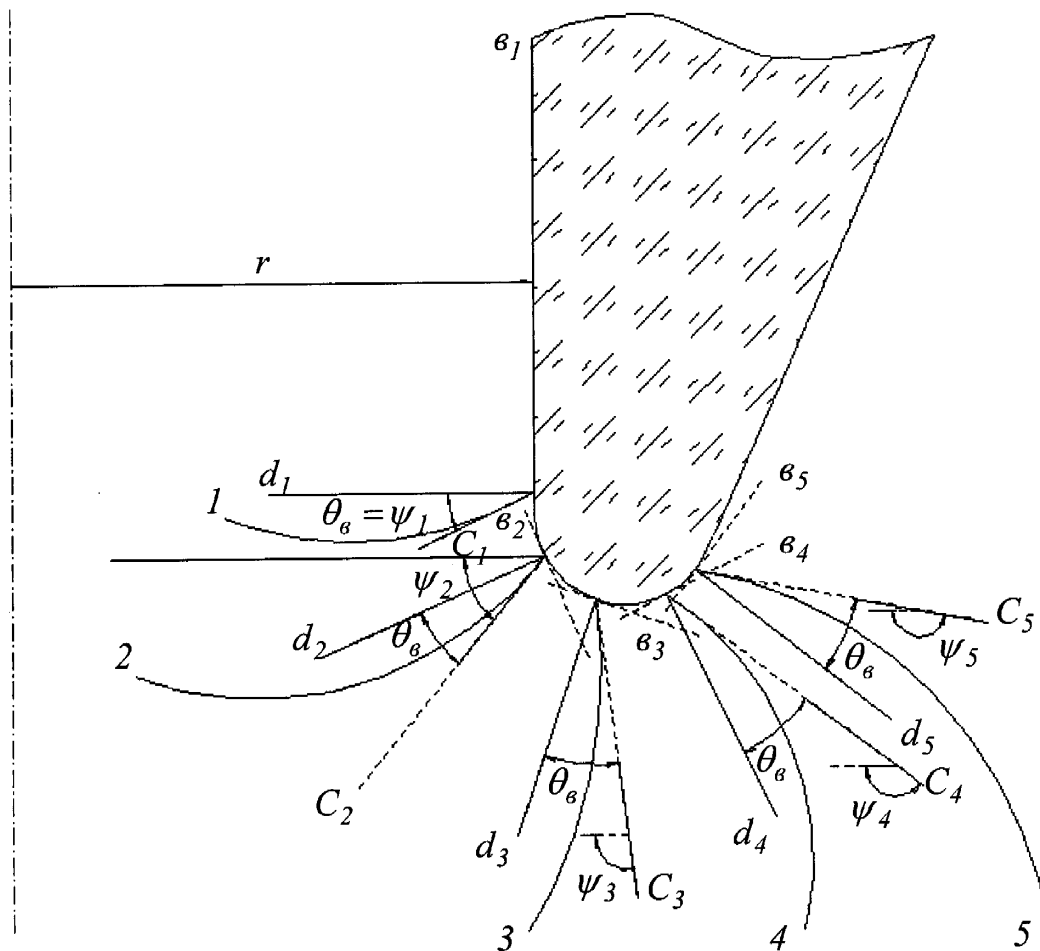


Рис. 2.5. Переміщення лінії контакту капілярної поверхні на торці ножового капіляра (1...5 – послідовні стадії утворення пухирця)

$v_i$  – дотичні до поверхні капіляра в точці контакту меніска;  $c_i$  – дотичні до поверхні меніска в точці його контакту з капіляром;  $d_i$  – нормалі до поверхні капіляра;  $\psi_i$  – кути між горизонтом та дотичною до меніска

Кут  $\psi$  при цьому зростає ( $\psi_1 < \psi_2 < \dots < \psi_5$ ) і може теоретично приймати значення в діапазоні від 0 до  $2\pi$ , та не залежить від властивостей контактуючих фаз і характеризує стан пухирця у процесі його утворення.

ККЗ  $\theta_c$  визначає величину  $\psi$  на кожній стадії формування меніска в залежності від точки її контакту на точці капіляра і впливає на форму капілярної поверхні. Тобто форма поверхні меніска визначається матеріалом капіляра, його конфігурацією та властивостями газу, рідини і матеріалу стінки капіляру.

Переміщення ліній контакту по поверхні досліджуваного твердого тіла (рис. 2.4) супроводжується зміною форми капілярного містка, тобто зміною кривизни меридіальної лінії перетину, а значить і значенням тиску всередині газового містка.

Зауважимо, що кривизна капілярної поверхні в різних точках лінії меридіонального перерізу у фіксований момент часу процесу формування є різною. Тому у подальшому оцінюватимемо кривизну в точці дотику капілярного містка до поверхні твердого тіла.

В певний момент кривизна капілярної поверхні стане максимальною, після чого вона почне зменшуватися, а об'єм газової фази – збільшуватися. Наступна поведінка капілярного містка залежить від об'єму простору над меніском, витрати газу, який поступає в цей простір і капіляр, від наявності і величини пневматичних опорів в розглядуваному просторі, від параметрів капіляра, від капілярної сталої рідини та від ряду інших факторів, вплив яких малий в порівнянні з перерахованими. При безперервній подачі газу в капіляр і відповідному тиску капілярний місток, досягнувши певного об'єму, втратить стійкість і відірветься від системи капіляр-тверде тіло. Чим більшими є об'єм простору над меніском, витрата газу, який поступає в простір над меніском, ККЗ  $\theta_c$  і величини пневматичних опорів всередині вказаного простору, тим швидше відбувається утворення газового капілярного містка і відривання його від капіляра після досягнення нестійкого стану. Після цього газова фаза трифазної системи „газ-рідина-тверде тіло” закривається і утворюється газова



бульбашка, яка піднімається в рідині на її поверхню.

Після відокремлення газового пухирця утвориться нова поверхня розділу фаз рідина-газ. Але у зв'язку з тим, що із-за пневматичних опорів системи подачі газу в капіляр не може бути миттєвого заповнення газом простору капіляру, то відбудеться падіння тиску в цьому просторі до рівня, нижчого за величину тиску, який необхідний для створення на торці капіляра нового меніска. В результаті відбудеться підняття меніска всередині капіляра до тих пір, поки тиск  $P_c$  у пневматичній системі, тиск капілярного підняття  $P_k$  і гідростатичний тиск  $P_z$  стовпчика рідини висотою від поверхні рідини до точки контакту меніска із поверхнею твердого тіла не зрівноважаться, тобто

$$P_k = P_c + P_z,$$

звідки вимірюваний тиск у капілярній системі

$$P_c = P_k - P_z = 2\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta_h - \Delta \rho g(h + z), \quad (2.22)$$

де  $\theta_h$  – крайовий кут натікання,  $\Delta \rho$  – різниця густин рідини і газу в газовому містку.

В міру наростання тиску  $P_c$  меніск в капілярі починає опускатися, доходить до торця і починається нове формування газового пухирця, який перейде в капілярний місток. Після цього процес утворення газового пухирця повториться.

У випадку використання капіляра з певною товщиною стінки процес утворення газового капілярного містка у змочуючу капіляр рідину і його закриття відбуватимуться дещо інакше, чим з ножового капіляру.

При збільшенні тиску в капілярі меніск почне опускатися і досягне внутрішнього краю нижнього торця капіляра (рис. 2.6). При цьому форма меніска і ККЗ  $\theta_e$ , будуть весь час однаковими. Наростання тиску над меніском приведе до зміни форми меніска, в результаті лінія контакту меніска з капіляром почне переміщуватися вниз. Такий процес буде мати місце до тих пір, поки тиск над меніском не досягне максимального значення [113], після

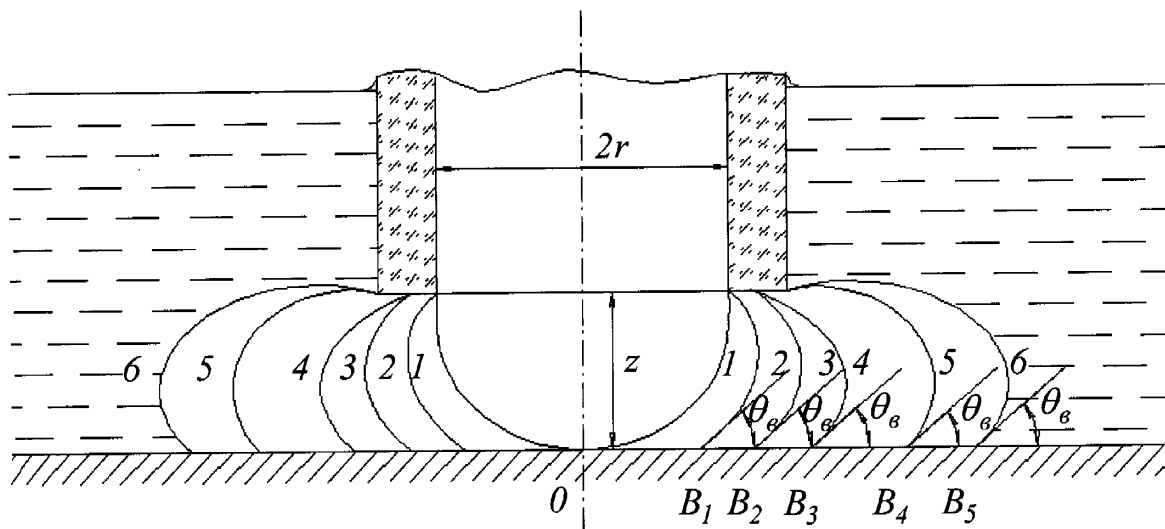


Рис. 2.6. Процес утворення газового містка з вихідного отвору товстостінного капіляра в рідину, яка змочує капіляр та поверхню твердого тіла

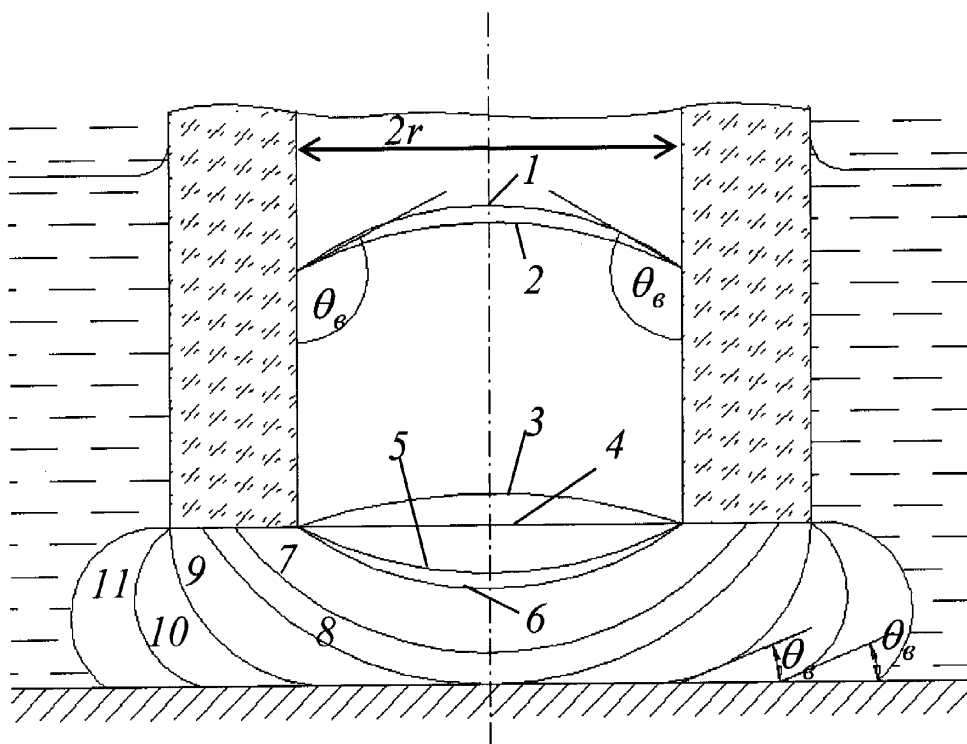


Рис. 2.7. Процес утворення газового містка із незмочуваного товстостінного капіляра із поверхнею змочуваного твердого тіла

чого тиск всередині капіляра різко зменшиться, а лінія контакту переміститься на горизонтальну поверхню нижнього торця капіляру (положення 4 на рис. 2.7). Об'єм меніска збільшиться і при наступній подачі газу у місток об'єм різко зросте, лінія контакту на горизонтальній поверхні переміститься на зовнішній край торця капіляра при одночасному переміщенні лінії контакту капілярного містка з твердим тілом по горизонтальній поверхні твердого тіла. Аналогічно вказаному вище внутрішній та зовнішній край нижнього торця капіляра будуть відігравати роль „шарнірів”, на яких будуть повертатися лінії капілярної поверхні.

При використанні вимірювальних капілярів із незмочуваних матеріалів процес утворення газового містка буде відбуватися наступним чином. При відсутності тиску в капілярі стовпчик рідини буде знаходитися нижче рівня рідини у посудині (поз. 1 на рис. 2.7) на величину, рівну висоті капілярного підняття, тобто

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta_e}{\rho g r}. \quad (2.23)$$

Для незмочуваного капіляра ( $\theta_e > 90^\circ$ ) величина капілярного підняття  $h$  стане від'ємною, що означає фізично не піднімання, а опускання стовпчика рідини в капілярі відносно рівня рідини в посудині.

При подачі газу в капіляр, меніск ККЗ відтікання  $\theta_e$  перейде у положення 2 (рис. 2.7) і буде переміщуватися вниз до внутрішнього краю нижнього торця капіляру із збереженням своєї форми та ККЗ  $\theta_e$  (пол. 3). Із збільшенням тиску  $P_k$  поверхня меніска почне змінюватися, перейде через горизонтальний стан (пол. 4), кривизна меніска змінить свій знак і почне збільшуватися. При досягненні локального максимуму кривизни (пол. 6) виникає такий стан меніска при квазістабільному тиску, де він починає переміщуватися по горизонтальній поверхні із збільшенням об'єму пухирця (пол. 7), що супроводжується зменшенням кривизни поверхні і відповідно зменшенням тиску всередині. В цей період меніск досягає поверхні твердого тіла (пол. 8, 9). При збільшенні тиску газу верхня лінія контакту переміститься на зовнішній

край нижнього торця капіляру, який стане шарніром для лінії контакту поверхні газового містка. Відбудеться досягнення абсолютного максимуму кривизни поверхні мостика, а значить і тиску (пол. 10). Після цього незначного збільшення тиску різко збільшиться об'єм, тиск різко впаде, виникне нестійкий стан газового містка, він закривається і утворюється газовий пухирець, а в капілярі утвориться нова межа розділу фаз.

Оскільки при використанні незмочуваного капіляра спостерігається два максимуми тиску, причому перший максимум тиску не зв'язаний із взаємодією з досліджуваним твердим тілом і не містить необхідної інформації, то треба щоб він був локальним, а абсолютним максимумом був другий при формуванні капілярного містка. Така ситуація можлива при виконанні умови [117]:

$$\frac{r_{\text{вн}}}{r_{\text{зовн}}} > \sin \theta_{\text{с}}, \quad (2.24)$$

де  $r_{\text{вн}}$  і  $r_{\text{зовн}}$  — відповідно внутрішній та зовнішній радіуси незмочуваного капіляра.

В цьому випадку динаміка зміни тиску  $P_{\text{к}}$  у процесі утворення газового містка і утворення газового пухирця, що підніметься на поверхню, буде якісно виглядати так, як показано на рис. 2.8.

Проведений якісний аналіз процесів утворення капілярних містків в системі „вимірювальний капіляр — досліджувана рідина — досліджувана поверхня твердого тіла” дозволяє точніше здійснити математичне моделювання процесу утворення капілярних містків, правильно вибрати початкові умови для розв'язування системи диференціальних рівнянь (2.21) і знаходження максимального значення  $P_{\text{к}}$  згідно (2.22).

Для розв'язку системи (2.21) параметри  $a^2$ ,  $r$  та  $z_{\text{с}}$  варіюємо з певними кроками, виходячи із реальних меж їх значень.

При  $\sigma = (15 \div 100) \times 10^{-3}$  Н/м,  $\rho = 700 \div 1200$  кг/м<sup>3</sup> значення  $a^2$  буде знаходитися в діапазоні  $a^2 = (1 \div 7) \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Радіус капіляра  $r$  та висоту торця капіляра над досліджуваною твердою поверхнею  $z_{\text{с}}$  необхідно встановлювати,

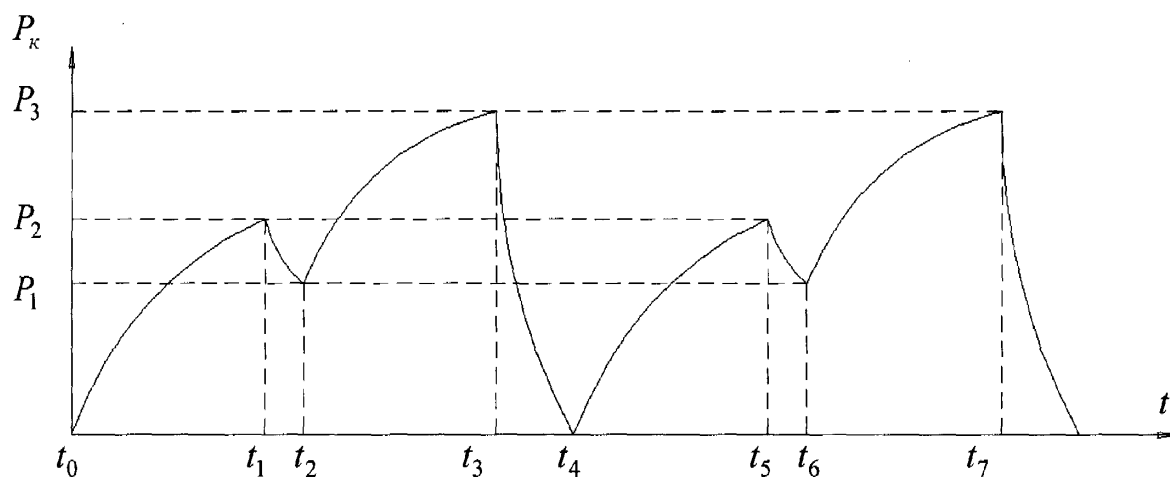


Рис. 2.8. Зміни тиску  $P_k$  у процесі утворення газового пухирця

$t_1, t_5$  — моменти локальних максимумів;  $t_2, t_6$  — моменти торкання поверхні твердого тіла (початок утворення газового містка);  $t_3, t_7$  — моменти відривання газового містка від капіляра

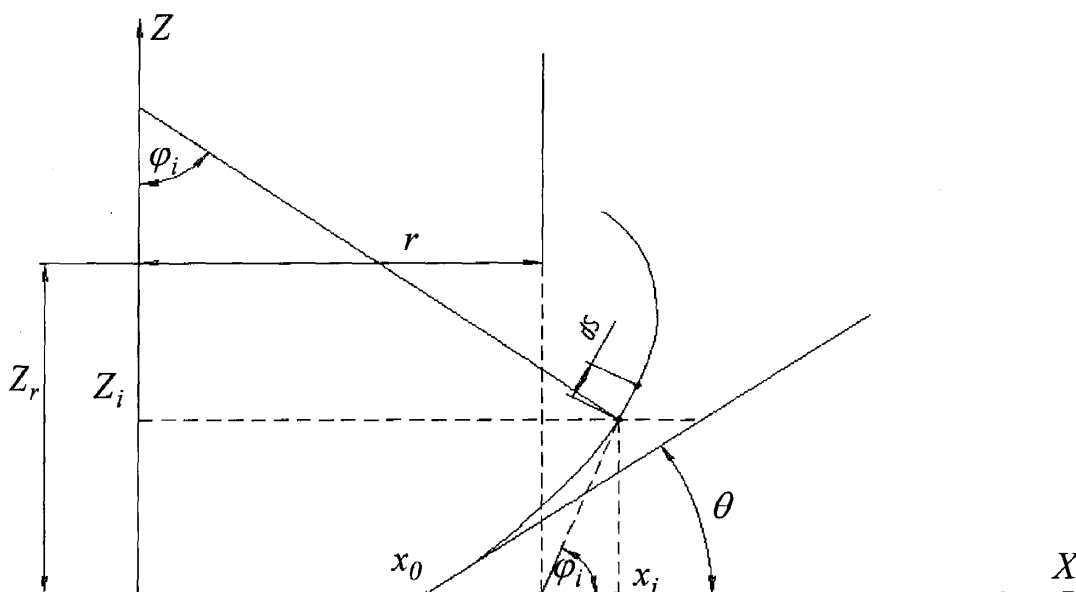


Рис. 2.9. Моделювання капілярної поверхні газового містка

виходячи з їх можливих реальних значень. На основі отриманих результатів розрахунку необхідно встановити оптимальні значення цих параметрів.

При заданих значеннях  $a^2$ ,  $r$  і  $z_\epsilon$  (рис. 2.10) для капілярного містка початкові умови для інтегрування системи (2.21) визначимо із наступних міркувань.

ККЗ задає різні форми капілярних поверхонь, тому для кожного дискретного значення  $\theta$  треба виконати розрахунок параметрів профілю газового містка в межах зміни кута  $\theta$  від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  задаючись  $\theta$  з вибраною дискретністю  $5^\circ$ .

Початкову кривизну вибираємо мінімальною, яка відповідає найбільшому ККЗ (в реальних умовах, наприклад  $\theta = 180^\circ$ ).

Початкове положення точки дотику  $x_0$  (рис. 2.10) газового мостика з поверхнею твердого тіла вибираємо в діапазоні  $0,7r \leq x_0 \leq 1,5r$ .

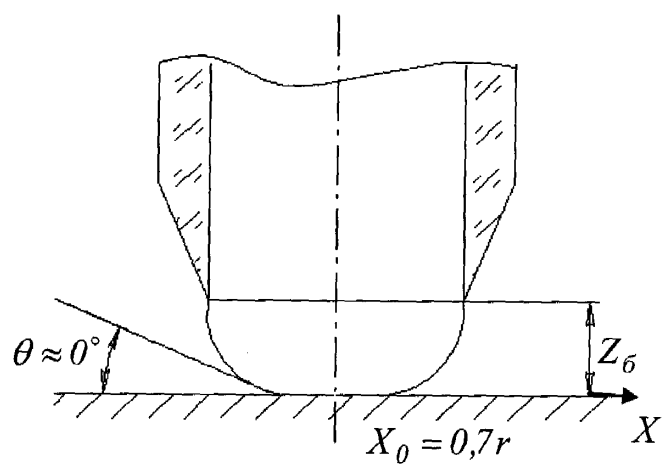
Менше значення  $x_0$  недоцільно брати тому, що значення ККЗ будуть близькими до нуля (рис. 2.10 а). При значеннях  $x_0 > 1,5r$  ККЗ буде приймати значення, що прямують до  $180^\circ$ , (рис. 2.11 б).

В цьому інтервалі значень  $x_0$  з кроком  $x_0/20$  обчислюємо кривизну поверхні меніска містка в кожній її точці аж до точки контакту з краєм капіляра.

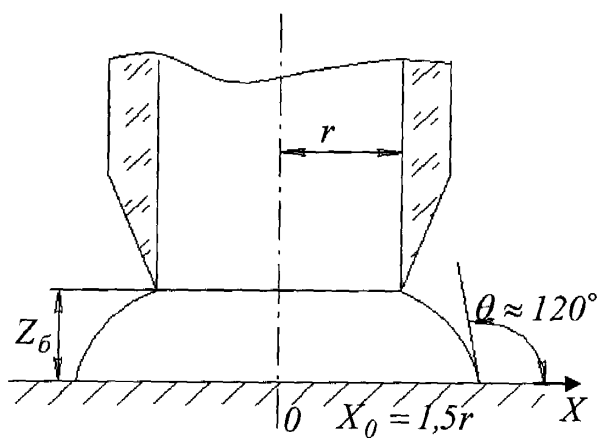
Для розв'язування системи диференціальних рівнянь (2.21) можна використати декілька наближених методів, але, проаналізувавши їх, вибрано метод Рунге-Кутта 4-го порядку.

Помилка обмеження  $\epsilon$  при використанні методу Рунге-Кутта  $p$ -го порядку дорівнює  $c \cdot h^{p+1}$ , де  $c$  – константа, величину якої можна оцінити, використовуючи екстраполяційний перехід до границі за Річардсоном [115].

Для реалізації алгоритму чисельного розв'язування системи диференціальних рівнянь (2.21) була розроблена програма на алгоритмічній мові „Паскаль”, яка приведена в додатку А. Блок-схема алгоритму програми розрахунку зображена на рис. 2.11 та рис. 2.12.



a)



б)

Рис. 2.10. До розрахунку параметрів профілю газового містка

а)  $x_0 = 0,7r$ ; б)  $x_m = 1,5r$

Процес розрахунків починають із значення ККЗ  $\theta = 0^\circ$  з кроком  $\Delta\theta = 5^\circ$  до  $\theta = 160^\circ$ , задаючись значеннями безрозмірних відношень  $z/r = 0,5 \div 1,5$  з кроком 0,25 та  $a^2/r^2 = 1 \div 10$  з кроком 1.

Початкове значення кривизни  $K_\theta$  можна вибирати довільним, оскільки в ході виконання розрахунку воно буде уточнюватися, аж поки не буде відрізнитись від попереднього розрахованого значення на задану величину.

Для наступних значень ККЗ  $\theta_{i+1} = \theta_i + 5^\circ$  вибирають початкове значення  $K_{\theta_{i+1}}$ , що дорівнює обчисленому значенню кривизни  $K_{\theta_i}$  для попереднього  $\theta_i$ .

Отже, крайові умови для системи рівнянь (2.21) можна виразити таким чином:

$$\left. \begin{aligned} x_0 = 0,7r \leq x_i \leq x_m = 1,5r; 0 \leq \theta_n \leq 180^\circ; \\ 0,5 \leq \frac{z}{r} \leq 1,5; 1 \leq \frac{a^2}{r^2} \leq 10; \\ \phi_{L=0} = x_{L=0} = z_{L=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Кожний крок обчислень супроводжується визначенням похибки. Ітерації процесу Рунге-Кутта продовжуються до тих пір, поки похибка  $\varepsilon$  обчислень кожного кроку не стане меншою  $10^{-6}$ .

В процесі обчислень в залежності від кривизни  $K_\theta$  кривої профілю капілярної поверхні, яка починається з точки  $x_i$  на поверхні твердого тіла, розрахований профіль в момент  $z = z_\theta$  може не співпасти з ножовим торцем капіляру. Різні варіанти кривої меридіанного перерізу капілярної поверхні показано на рис. 2.13.

Для визначення реального профілю меніска, запропоновано наступну методику. Умовно проводимо з початку координат пряму з кутовим коефіцієнтом  $z_\theta/r$  через кінець капіляра. На кожному кроці ітерацій визначаємо точку перетину кривої профілю з проведеною прямою.

Якщо немає перетину, або точка перетину не знаходиться в наперед заданому околі вихідного кінця капіляра, то змінюється значення кривизни  $K_\theta$  до тих пір, поки не буде мати місце перетин з заданою точністю в точці  $x = r$



(рис. 2.13, а).

Координати точки знайденої кривої меридіонального перерізу капілярного мостика і його параметри запам'ятовуються, після чого починається процес обчислення в наступній точці  $x_i$ .

Таким чином для фіксованого значення ККЗ отримують набір даних ліній профілю капілярного мостика, які починаються у точках  $(x = x_i, z = 0)$  на поверхні твердого тіла і закінчуються на торці ножового капіляру  $(x = r, z = z_6)$ . Таким чином виникає можливість дослідити динаміку зміни форми капілярного містка для фіксованого ККЗ (рис. 2.14).

Дотичні до кривих в точках дотикання містка з поверхнею твердого тіла весь час мають однаковий кут нахилу  $\theta$ , який рівний ККЗ. Таких кривих в інтервалі від т. а до т. в прийнято двадцять. Для кожної кривої визначається її кривизна, а також інші параметри в т. ч. і надлишковий тиск в середині капілярного містка (див. рис. 2.14).

Результати чисельного моделювання газового капілярного містка висотою  $z_6$ , утвореного із капіляру радіусом  $r$  для різних значень капілярної сталої  $a^2$  і фіксованих значень ККЗ приведені у додатку Б.

Отримані табличні результати чисельного інтегрування системи (2.21) приводимо до вигляду, зручного для практичного використання.

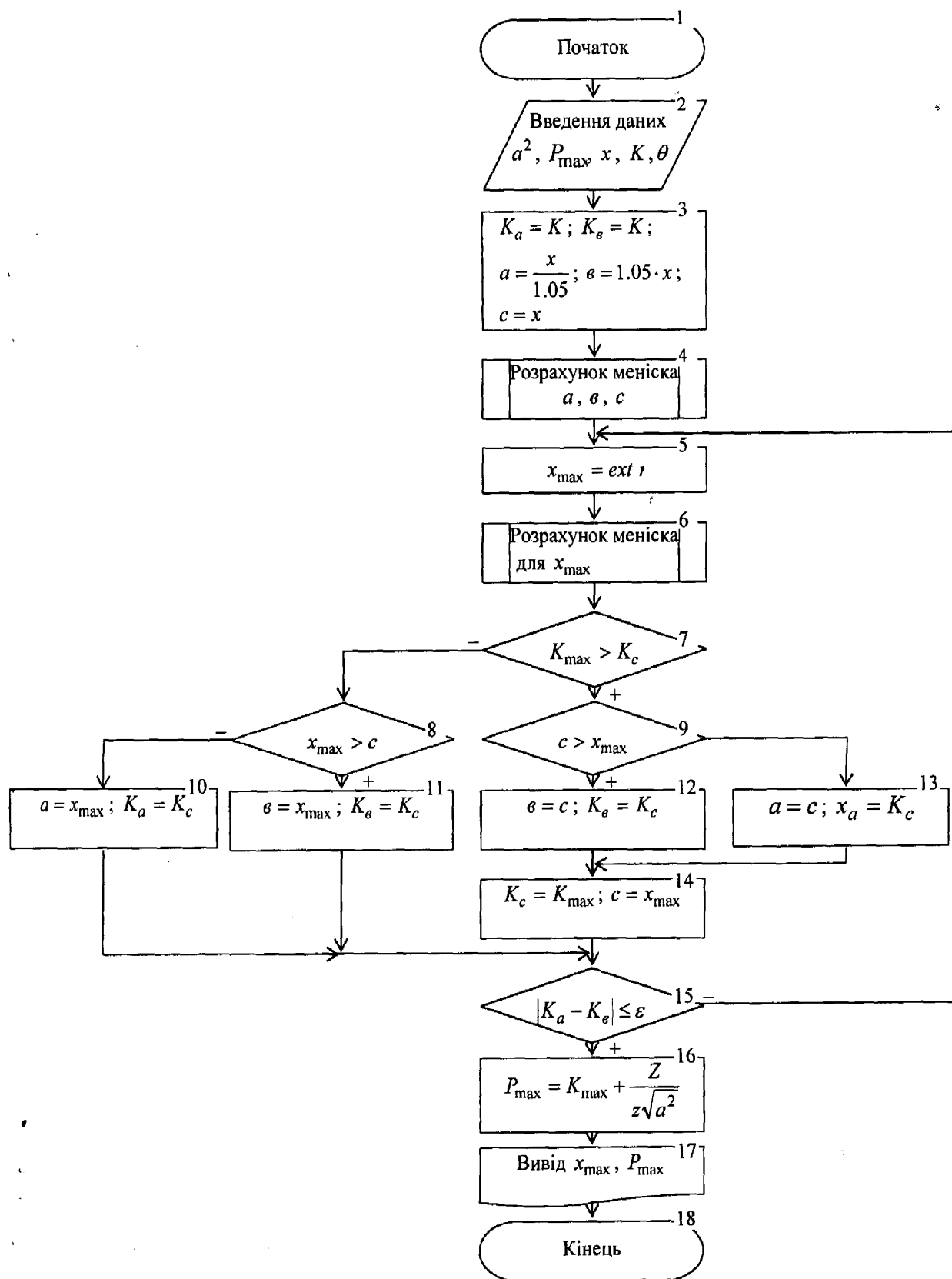


Рис 2.11. Блок-схема розрахунку параметрів капілярного містка

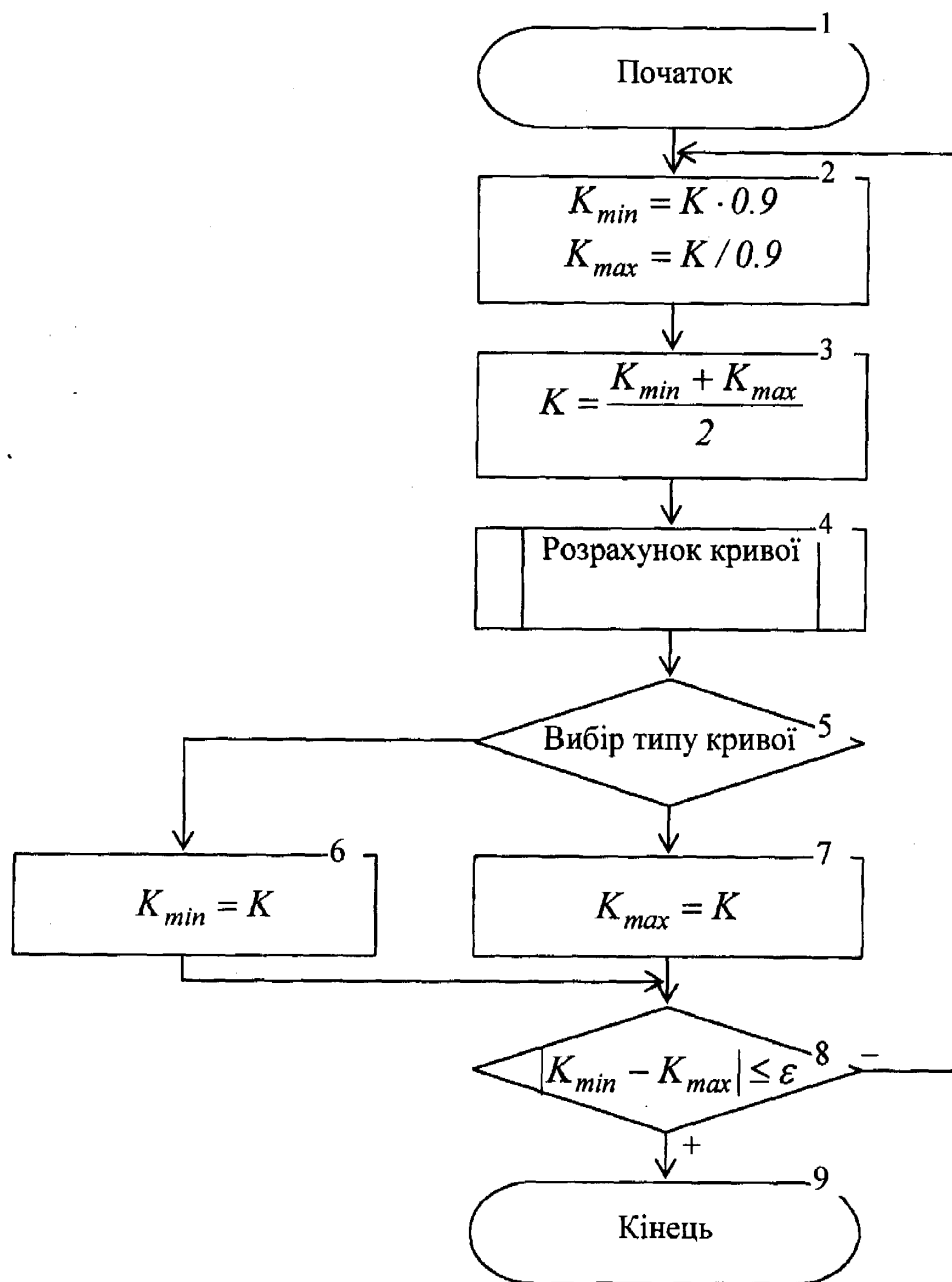


Рис. 2.12. Блок-схема підпрограми блоків 4 і 6 розрахунку параметрів меніска (рис. 2.12)

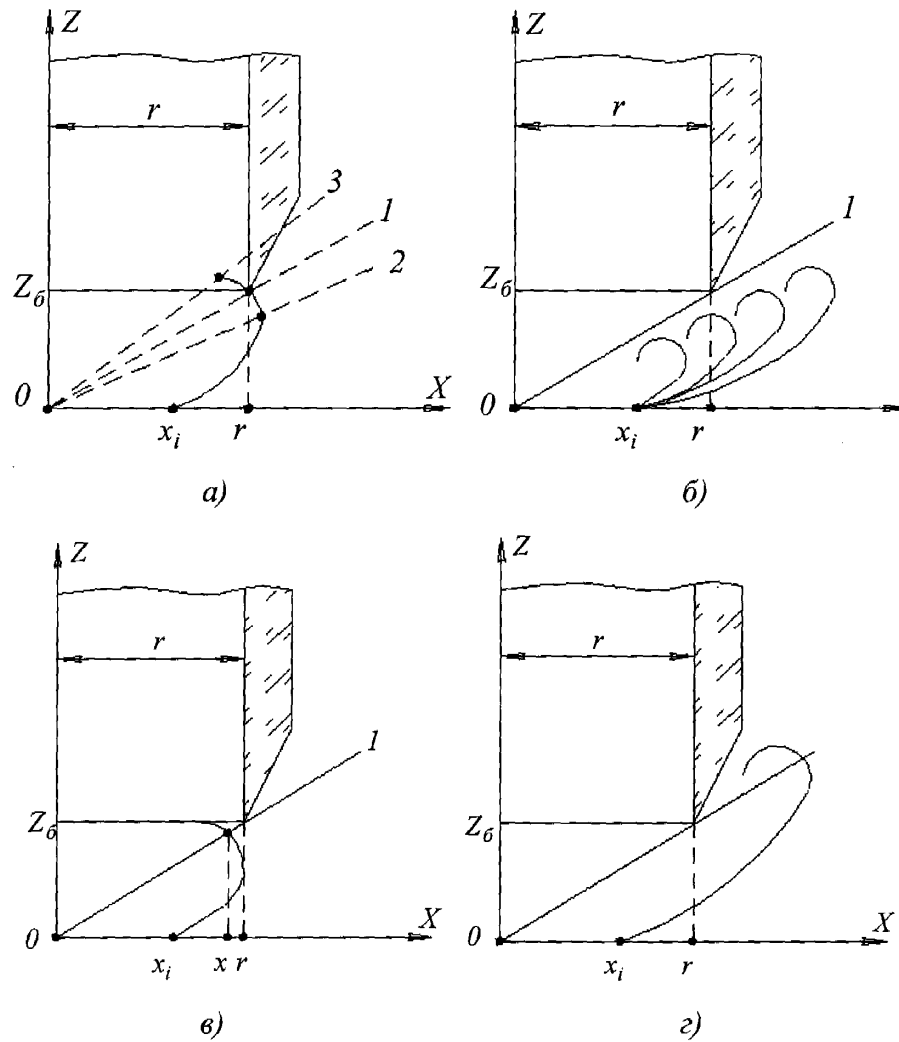


Рис. 2.13. Визначення типу кривої профілю капілярної поверхні:

1 – пряма з нахилом  $z_0/r$ , 2 – пряма попереднього кроку, 3 – пряма наступного кроку;

а) розрахована крива профілю газового містка попадає на кінець капіляра;

б) лінія профілю не доходить до прямої 1; в) розрахована лінія профілю перетинає пряму 1 при  $x < r$ ; г) лінія профілю перетинає пряму 1 при  $x > r$ ;

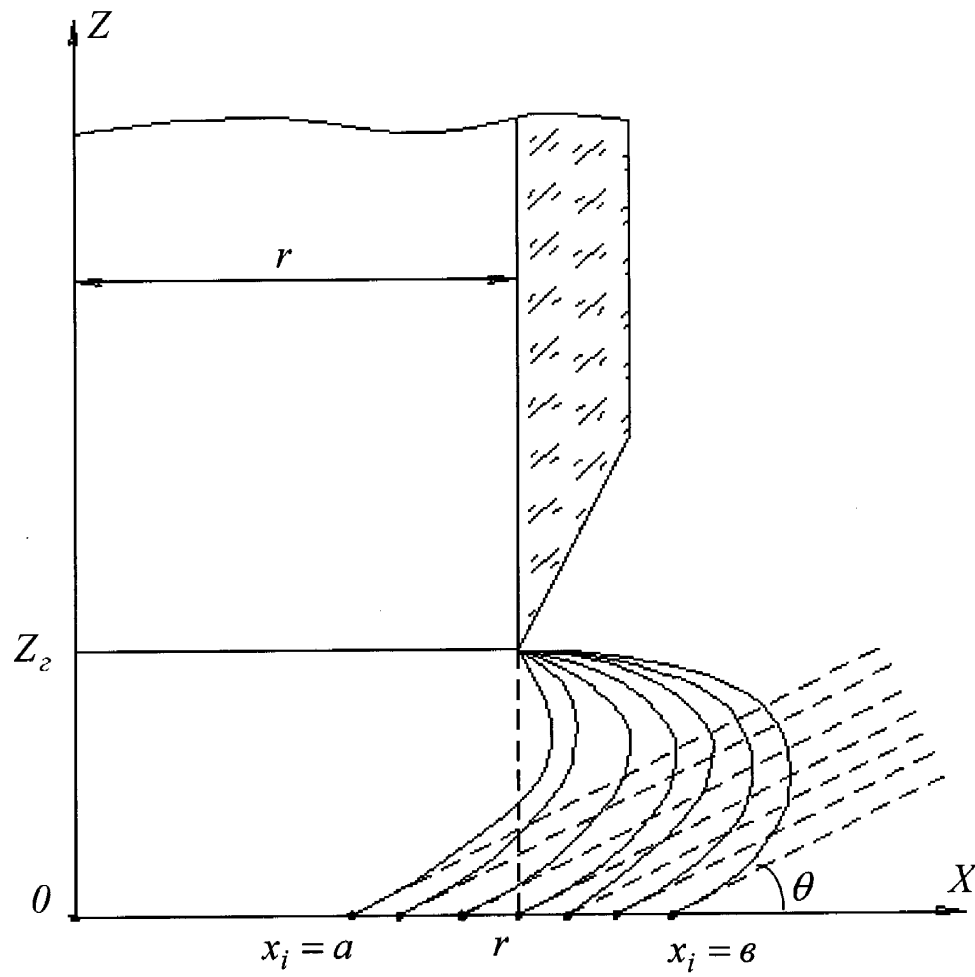


Рис. 2.14. Динаміка зміни профілю меніска в процесі утворення капілярного містка

### 2.3. Одержання залежностей ККЗ від виміряного тиску в газовому мостіку та їх аналіз

Отримані результати чисельного розв'язування системи диференціальних рівнянь (2.21) разом з крайовими умовами для  $z = 0$  (2.24) і результатами розрахунку безрозмірного тиску  $P_k$  приведені в табличному вигляді у додатку Б. Вони виражають зв'язок між величиною ККЗ та безрозмірним тиском всередині капілярного газового мостика на рівні поверхні твердого тіла при умові, що торець капіляру тільки торкається поверхні рідини. Але користуватися такими табличними даними незручно. Для практичного використання вигідно, якщо зв'язок між відповідними величинами заданий у аналітичній формі. Такий аналітичний зв'язок доцільно встановити шляхом апроксимації залежності значень ККЗ  $\theta$  від тиску  $P_k$ .

При апроксимації графік шуканої функції проходить за певним законом між парами величин, які можуть бути розсіяні чи зашумлені, не добиваючись на відміну від інтерполювання, щоб на опорних (табличних) точках значення шуканої функції співпадали із табличними.

Прив'язку шуканої функції  $f(P)$  до заданих табличних значень  $\theta$ ,  $P$  можна проводити різними методами [131]:

а) сума абсолютних різниць  $|f(P) - \theta|$  повинна наближатися до мінімуму.

Тоді абсолютна різниця мінімізується і виконується лінійна апроксимація:

$$\sum_{i=1}^N |f(P_i) - \theta_i| = \text{Min!}; \quad (2.26)$$

б) сума квадратів різниць повинна наближатися до мінімуму. Цей метод найменших квадратів Гаусса називається квадратичною апроксимацією. Тобто

$$\sum_{i=1}^N (f(P_i) - \theta_i)^2 = \text{Min!}; \quad (2.27)$$

в) максимальна різниця між згладжуваною функцією і табличними значеннями повинна залишатися у встановлених межах  $D$ . Наприклад, у

випадку апроксимації П. Чебишева має місце, що

$$\max |f(P) - \theta| \leq D!. \quad (2.28)$$

Найкраще використовувати метод найменших квадратів, який в порівнянні з мінімізацією абсолютної різниці легший для використання.

Для використання методу найменших квадратів необхідно мінімізувати перпендикулярні віддалі  $h_n$  від табличних точок  $(P, \theta)$  до шуканої кривої – функції  $f(P)$  (рис. 2.15).

Абсциси точок не мають похибок, тому мінімізувати будемо тільки вертикальні віддалі, тобто різниці ординат  $f(P) - \theta$ . Якщо згладжуюча крива знайдена, то можна вирахувати різниці ординат та їх статистичний розподіл. Згладжуюча крива тільки тоді достатньо точно відповідає характеристиці, коли стандартне відхилення розподілу різниць приблизно сходиться з точністю отриманих табличних значень величин  $\theta_n$  і  $P_n$ .

Для наглядного визначення характеру зв'язку  $\theta = f(P)$  на основі табличних результатів розв'язку системи диференціальних рівнянь (2.21) побудовано графіки залежностей ККЗ від тиску для різних відношень  $a^2/r^2$  при фіксованому значенні параметра  $z_6 = 0,5$  (рис. 2.16). Характер зв'язку між ККЗ і тиском явно нелінійний, має вигляд, який властивий трансцендентним функціям і найбільше нагадує частину тригонометричної функції косинуса. Тому доцільно апроксимацію табличних результатів здійснити у вигляді  $\cos \theta = f(P)$ , що дало б більшу лінійність шуканої залежності, а, значить, і менші похибки апроксимації. Така апроксимація тим більше доцільна, оскільки саме величина  $\cos \theta$  вважається показником змочування.

Крім того, як видно з рис. 2.16, залежності  $\theta = f(P)$  є монотонними, без екстремумів, що дозволяє використовувати для апроксимації поліноми не вище третього степеня.

В загальному вигляді апроксимуючий поліном у нашому випадку вибирається у вигляді:

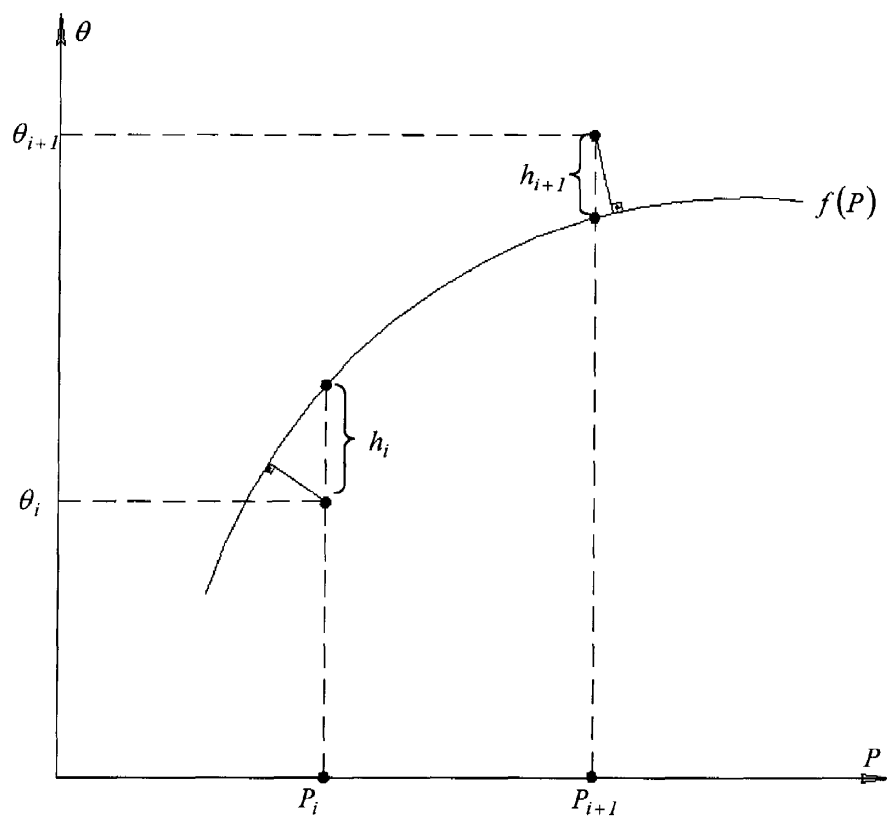


Рис. 2.15. Апроксимація значень ККЗ як функції тиску за методом найменших квадратів

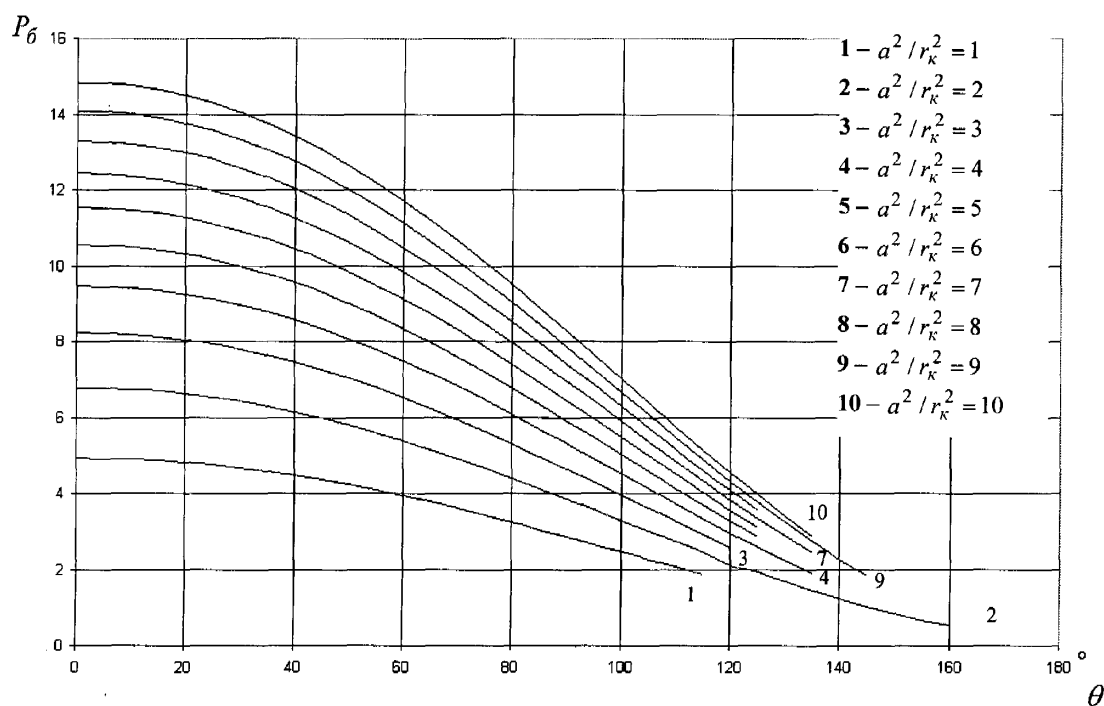


Рис. 2.16. Отримані графічні залежності зв'язку між тиском в капілярному містку та ККЗ



$$\cos \theta = C_0 + C_1 P + C_2 P^2 + C_3 P^3 \quad (2.29)$$

Для значення тиску  $P$  поліном матиме значення  $\cos \theta$ , яке в загальному випадку відрізняється від табличного значення  $\cos \theta_T$ . Різниця між ними (різниця ординат або залишок є похибкою апроксимації)

$$r_n = \cos \theta - \cos \theta_T. \quad (2.30)$$

Метод найменших квадратів Гаусса вимагає, щоб сума  $S$  квадратів цих похибок була мінімальною:

$$S = \sum_{i=1}^N W(P_i) \cdot (\cos \theta_i - \cos \theta_{iT})^2 = \text{Min!}. \quad (2.31)$$

Вагову функцію  $W(P_i)$  можна прийняти рівною 1, тому що, як видно з рис.2.16 функції зв'язку між максимальним тиском і ККЗ є гладкими і нема підстав виділяти окремі точки. Сума квадратів залишків є функцією шуканих коефіцієнтів полінома  $C_0, C_1, C_2, C_3$ . Ця сума  $S$  має екстремум в точці, де частинні похідні від коефіцієнтів дорівнюють нулю, тобто

$$\frac{\partial S}{\partial C_0} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial C_3} = 0. \quad (2.32)$$

Цей екстремум є мінімумом, оскільки в нашому випадку матриця інших похідних від коефіцієнтів завжди додатна. В результаті можна отримати наступні чотири рівняння з чотирма невідомими  $C_0, C_1, C_2, C_3$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial C_0} &= \sum_{i=1}^N 2 \cdot (C_0 + C_1 \cdot P_i + C_2 \cdot P_i^2 + C_3 \cdot P_i^3 - \cos \theta_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial C_1} &= \sum_{i=1}^N 2 \cdot (C_0 + C_1 \cdot P_i + C_2 \cdot P_i^2 + C_3 \cdot P_i^3 - \cos \theta_i) \cdot P_i = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial C_2} &= \sum_{i=1}^N 2 \cdot (C_0 + C_1 \cdot P_i + C_2 \cdot P_i^2 + C_3 \cdot P_i^3 - \cos \theta_i) \cdot P_i^2 = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial C_3} &= \sum_{i=1}^N 2 \cdot (C_0 + C_1 \cdot P_i + C_2 \cdot P_i^2 + C_3 \cdot P_i^3 - \cos \theta_i) \cdot P_i^3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Розкриваючи дужки і переносячи табличні значення  $\cos \theta_{iT}$  в праві

частини, одержимо систему канонічних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} C_0 \cdot N + C_1 \cdot \sum_{i=1}^N P_i + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2 + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^3 &= \sum_{i=1}^N \cos \theta_{iT}; \\ C_0 \cdot \sum_{i=1}^N P_i + C_1 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2 + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^3 + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^4 &= \sum_{i=1}^N P_i \cdot \cos \theta_{iT}; \\ C_0 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2 + C_1 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^3 + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^4 + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^5 &= \sum_{i=1}^N P_i^2 \cdot \cos \theta_{iT}; \\ C_0 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^3 + C_1 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^4 + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^5 + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^6 &= \sum_{i=1}^N P_i^3 \cdot \cos \theta_{iT}. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Знаходження суми в кожному випадку проводиться від  $i=1$  до  $N$ . Суму можна обчислити із заданої пари табличних значень  $P_i$  і  $\cos \theta_{iT}$ . Із системи лінійних рівнянь (2.34) за правилом Крамера знаходять невідомі коефіцієнти  $C_0, C_1, C_2$  і  $C_3$  при заданому табличному значенні  $P_i$ .

Результати визначення коефіцієнтів апроксимуючого полінома (2.29) для різних значень відношення  $\xi = a^2 / r_k^2 = 1, 2, \dots, 10$  та для  $z_0 = 0,5$  приведено в додатку В.

Результати в додатку В приведені для випадку, коли відношення внутрішнього радіусу вимірювального капіляра до висоти торця капіляру над горизонтальною поверхнею досліджуваного твердого тіла  $r_k / z = 2$ . Середнє квадратичне відхилення отриманих значень поліноміальних коефіцієнтів не перевищує  $1,91 \cdot 10^{-5}$ .

Користування такою таблицею є не дуже зручним, оскільки поліноміальні коефіцієнти визначені тільки для дискретних значень відношення  $\xi = a^2 / r_k^2$ . Тому методом інтерполяції сплайнами [ 132 ] була виконана апроксимація для поліноміальних коефіцієнтів  $C_0, C_1, C_2, C_3$  у вигляді  $C_j = f(\xi)$ , де  $j = 0, 1, 2, 3$ . Апроксимуючий поліном третього порядку не достатньо точно передає характеристику кривої на всьому діапазоні значень  $1 \leq \xi \leq 10$ , використання апроксимуючих поліномів вищих порядків є недоцільним, оскільки вони схильні до пульсацій і при деяких обставинах пульсують навколо кривої між

опорними точками. Тому використання сплайнової функції, яка складається з кількох окремих поліномів для окремих діапазонів значень дає краще наближення [ 131 ]. Для цього використано кубічні параболи, які проходять точно через дві опорні точки відповідного діапазону  $\xi$ . При десяти опорних точках сплайнова функція складається з дев'яти окремих поліномів. В точках стикування діапазонів отримуються поліноми, які співпадають із табличними значеннями коефіцієнтів  $C_0, C_1, C_2, C_3$ . Похідні коефіцієнтів першого та другого порядку теж співпадають, що забезпечує неперервність сплайнових функцій.

В результаті проведених апроксимацій були визначені апроксимуючі сплайнові поліноми для коефіцієнтів  $C_0, C_1, C_2, C_3$ . Графічні зображення коефіцієнтів  $C_j$ , які визначені за допомогою цих поліномів, приведені на рис. 2.17.

Одержані залежності  $C_j = f_j(\xi)$  дозволяють швидко і просто обраховувати значення крайового кута змочування  $\theta$  на основі вимірюного максимального безрозмірного тиску  $P$  у газовому пухирці для конкретного значення параметра  $\xi$ , описати і проаналізувати одержані результати, а також здійснити аналіз точності даного методу визначення ККЗ і визначити оптимальний діапазон зміни відношень  $r_k$  і  $\xi$ .

З метою оптимального вибору параметрів  $r$  і  $\xi$  при вимірюванні ККЗ необхідно знати вплив цих параметрів на точність визначення ККЗ згідно виразу (1). Для цього було проведено диференціювання залежностей  $C_i = f_i(\xi)$  за параметром  $\xi$ . Графіки одержаних похідних  $\frac{dC_i}{d\xi}$  функцій поліноміальних коефіцієнтів приведені на рис. 2.18.

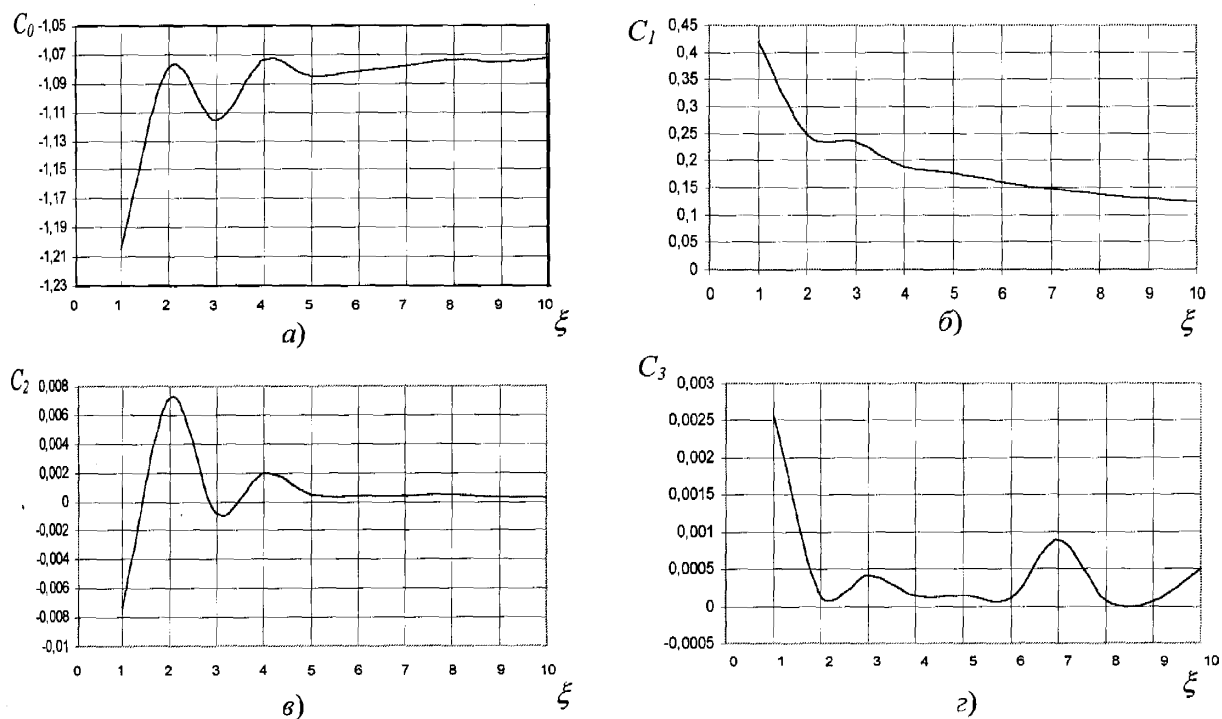


Рис. 2.17. Поліноміальні коефіцієнти  $C_j = f(\xi)$

а)  $C_0 = f(\xi)$ ; б)  $C_1 = f(\xi)$ ; в)  $C_2 = f(\xi)$ ; г)  $C_3 = f(\xi)$

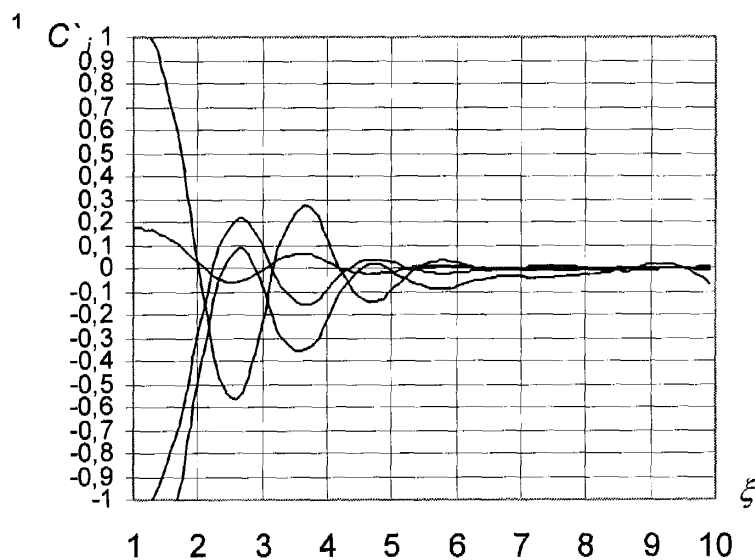


Рис.2.18. Графічне зображення похідних  $\frac{dC_j}{d\xi}$

1 - графік  $\frac{dC_0}{d\xi}$  (масштабуючий коефіцієнт  $k=1$ ), 2 - графік  $\frac{dC_1}{d\xi}$  ( $k=0.2$ ),

3 - графік  $\frac{dC_2}{d\xi}$  ( $k=0.02$ ), 4 - графік  $\frac{dC_3}{d\xi}$  ( $k=0.002$ ).

Знаючи чисельні величини похідних поліноміальних коефіцієнтів можна оцінити вплив вказаних параметрів на точність визначення ККЗ (1). Як видно з рис.2 графіки похідних поліноміальних коефіцієнтів є затухаючими функціями, причому при  $\xi \geq 6$  абсолютні значення похідних не перевищують таких значень:  $\frac{dC_0}{d\xi} \leq 0,0125$ ,  $\frac{dC_1}{d\xi} \leq 0,020$ ,  $\frac{dC_2}{d\xi} \leq 0,0015$ ,  $\frac{dC_3}{d\xi} \leq 0,0003$ . Це означає, що при величині параметра  $\xi \geq 6$  похибка визначення ККЗ за виразом (1) при максимальному можливому значенні тиску  $P_m = 14,83$ , яке одержане із чисельного розв'язку вищевказаних диференціальних рівнянь, становитиме  $\Delta(\cos\Theta) \leq 0,0035$ ; або відносна похибка  $\gamma \leq 0,35\%$ . Для дотримання одержаної похибки потрібно, виходячи з отриманого критерію  $\xi \geq 6$  щоб величина внутрішнього радіуса вимірювального капіляра становила  $r \leq \sqrt{\frac{a^2}{6}} = \sqrt{\frac{\sigma}{6\Delta\rho g}}$ . Враховуючи, що для використовуваних на практиці рідин величина коефіцієнта поверхневого натягу є більшою від значення  $\sigma = 15 \cdot 10^{-3} \frac{H}{M}$ , а густина більшою від  $\rho = 750 \frac{KZ}{M^3}$ , то для дотримання одержаної похибки, величина внутрішнього радіуса капіляра не повинна перевищувати 0,58 мм.

## 2.4. Визначення крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл шляхом вимірювання геометричних розмірів лежачої краплі

Аналізуючи лежачу на досліджуваній поверхні твердого тіла краплю система безрозмірних рівнянь, що описуватиме певні параметри цієї поверхні з урахуванням раніше приведеної системи рівнянь (2.21) буде наступною:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dL_6} = 2 \cdot K_6 - \frac{\sin \varphi}{x_6} + \frac{z_6}{a_6^2}; \\ \frac{dx_6}{dL_6} = \cos \varphi; \\ \frac{dz_6}{dL_6} = \sin \varphi; \\ \frac{dA_6}{dL_6} = x_6 \cdot \sin \varphi, \end{cases} \quad (2.35)$$

де  $A_6 = A/r^2$  – безрозмірна площа меридіанного перерізу лежачої краплі.

Перше із рівнянь капілярності системи (2.35) дає можливість описати реальний профіль лежачої краплі у безрозмірних координатах ще наступним рівнянням:

$$\frac{d\varphi}{dL_6} + \frac{\sin \varphi}{x_6} = \frac{2}{\sqrt{\beta}} + \frac{z_6}{a_6^2}, \quad (2.36)$$

де  $\beta = R_0^2 / a^2$  – параметр, що визначає форму краплі;  $R_0$  – розмірний радіус кривизни краплі у її вершині.

Коефіцієнт  $\beta$  можна оцінити, виходячи із реально можливих значень  $a^2$  та  $R_0$ . Він буде змінюватися в діапазоні від 0,1 до 10.

Розв'язок системи рівнянь (2.35) з урахуванням (2.36) – це набір значень  $\varphi_i, L_{6i}, x_{6i}, z_{6i}$  та  $A_{6i}$  для певного значення  $\beta$ .

Таким чином існує можливість розрахунку геометричних параметрів лежачої краплі шляхом розв'язку основного рівняння капілярності з одного

боку і визначення їх за допомогою відеотехніки на реальній краплі з іншого боку, що дозволяє запропонувати методику визначення крайового кута змочування рідинами поверхонь твердих тіл, яка базується на вимірюванні вказаних параметрів краплі.

Пропонується за параметри, що однозначно характеризують меридіанний переріз лежачої краплі рідини, використати значення площі цього перерізу  $A_6$ , висоту лежачої краплі  $z_6$  та ширину профілю у місці контакту із поверхнею твердого тіла.

Пропонується також за відповідними співвідношеннями цих параметрів лежачої краплі ( $A/z^2$  і  $x/z$ ) визначати значення крайового кута змочування рідиною матеріалу підкладки, на якій сформована ця крапля.

На рис.2.19 наведено блок-схему алгоритму розрахунку, який пов'язує вказані параметри краплі із крайовим кутом змочування.

Значення коефіцієнта форми  $\beta$  змінюється від 0,1 до 1 з кроком 0,1; а від 1 до 10 – з кроком 1. На кожному кроці циклу знаходяться розв'язки основного рівняння капілярності (2.36) (блок 3). Далі проводять вибірку тих розв'язків, що відповідають значенням кута  $\varphi = 1 \div 180^\circ$  з  $\Delta\varphi = 1^\circ$ . Отримані дані зберігаються у оперативній пам'яті ПЕОМ. Наступний етап – це обчислення значень  $A/z^2$  та  $x/z$  (блок 6), які відповідають цим значенням кутів  $\varphi$ .

Отримані значення теж запам'ятовуються. Далі з кожної збереженої групи розв'язків, отриманої при зміні коефіцієнта форми  $\beta$ , здійснюють вибірку значень  $A/z^2$  та  $x/z$ , що відповідають кожному із значень  $\varphi = 1 \div 180^\circ$  (блок 9).

Програма, що реалізує алгоритм рис. 2.18, приведена у додатку Д. Конкретні рівняння 1-го та 2-го порядку для різних значень  $\varphi = 1 \div 180$  і  $\Delta\varphi = 1^\circ$  приведені у додатку Е, де  $y = A/z^2$ ,  $x = x/z$ .

Таким чином спочатку отримують залежності параметра  $A/z^2$  від  $x/z$  у табличному вигляді, після чого ці залежності замінюють поліноміальними.

Так, для кута  $\varphi = 59^\circ$  вказана залежність має вигляд

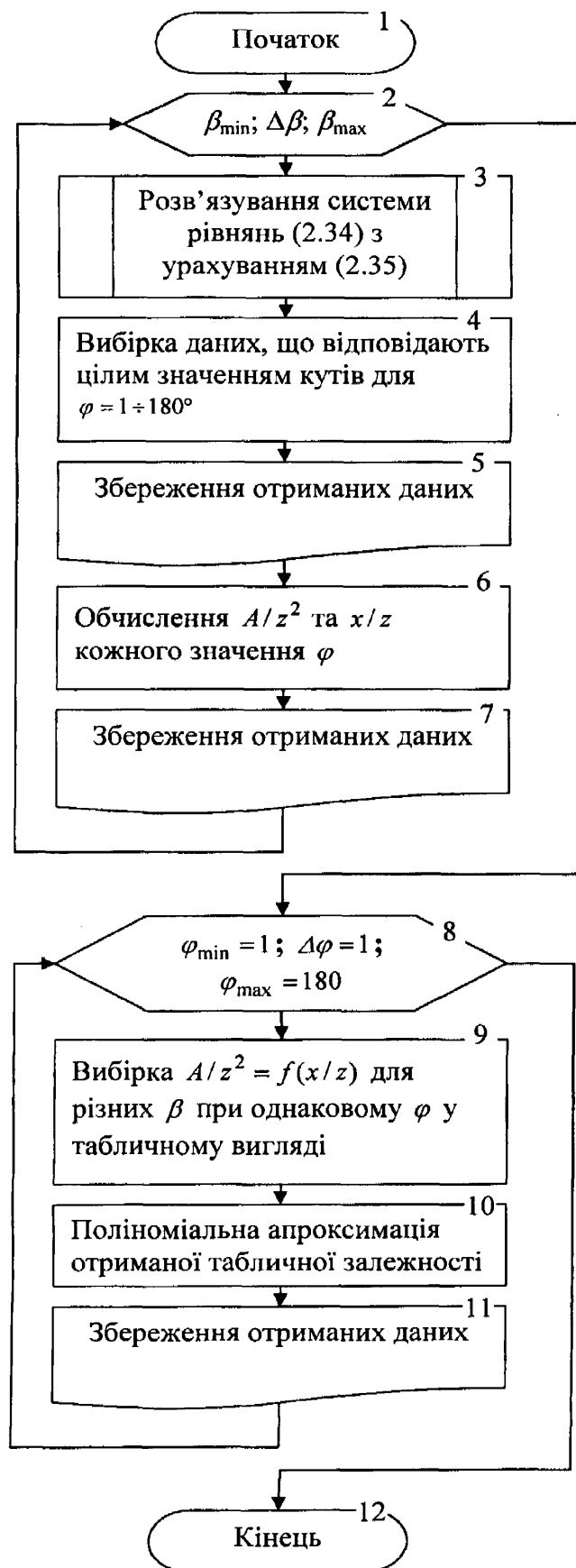


Рис. 2.19. Блок-схема алгоритму отримання залежностей  $A/z^2 = f(x/z)$

для  $\varphi = 1 \div 180^\circ$



$$A/z^2 = -0,0003(x/z)^2 + 0,0361(x/z) + 2,5031, \quad \text{а для кута } \varphi = 149^\circ -$$

$$A/z^2 = -0,0004(x/z)^2 + 0,0377(x/z) + 1,0374.$$

На рис. 2.20 показано результати розрахунку вказаної залежності для  $\varphi = 59^\circ$  (рис.2.20, б) та  $\varphi = 149^\circ$ ,

На рис. 2.21 наведено блок-схему алгоритму знаходження значення крайового кута змочування рідиною підкладки з твердого тіла на основі вказаних вище результатів. За допомогою спеціальної відеокамери визначаються параметри  $A/z^2$  та  $x/z$  лежачої краплі рідини (блок 2). Далі знаходять залежності, для яких значення  $d/z$  є реальними. Для кожної залежності обчислюється відхилення  $\Delta$  розрахованого значення  $A/z^2$  від знайденого у ході дослідження (блоки 4, 5). Після цього з усіх знайдених відхилень  $\Delta$  знаходять мінімальне. Значення  $\varphi$ , що відповідатиме мінімальному відхиленню, буде шуканим крайовим кутом змочування  $\theta$ .

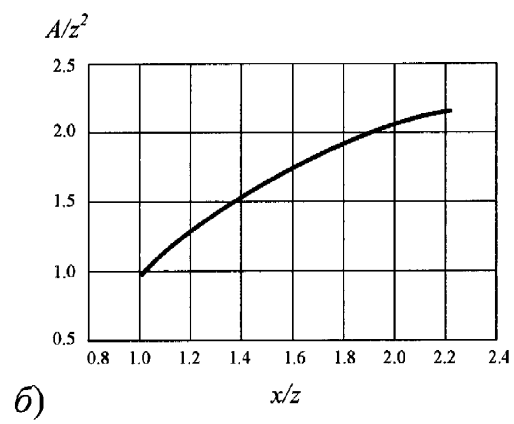
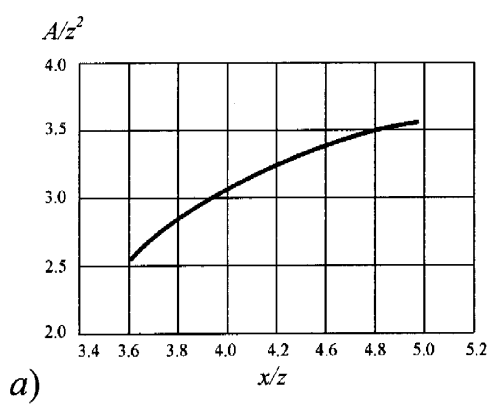


Рис. 2.20. Залежності  $A/z^2$  від  $x/z$  для  $\varphi = 59^\circ$  (а) та  $\varphi = 149^\circ$  (б)

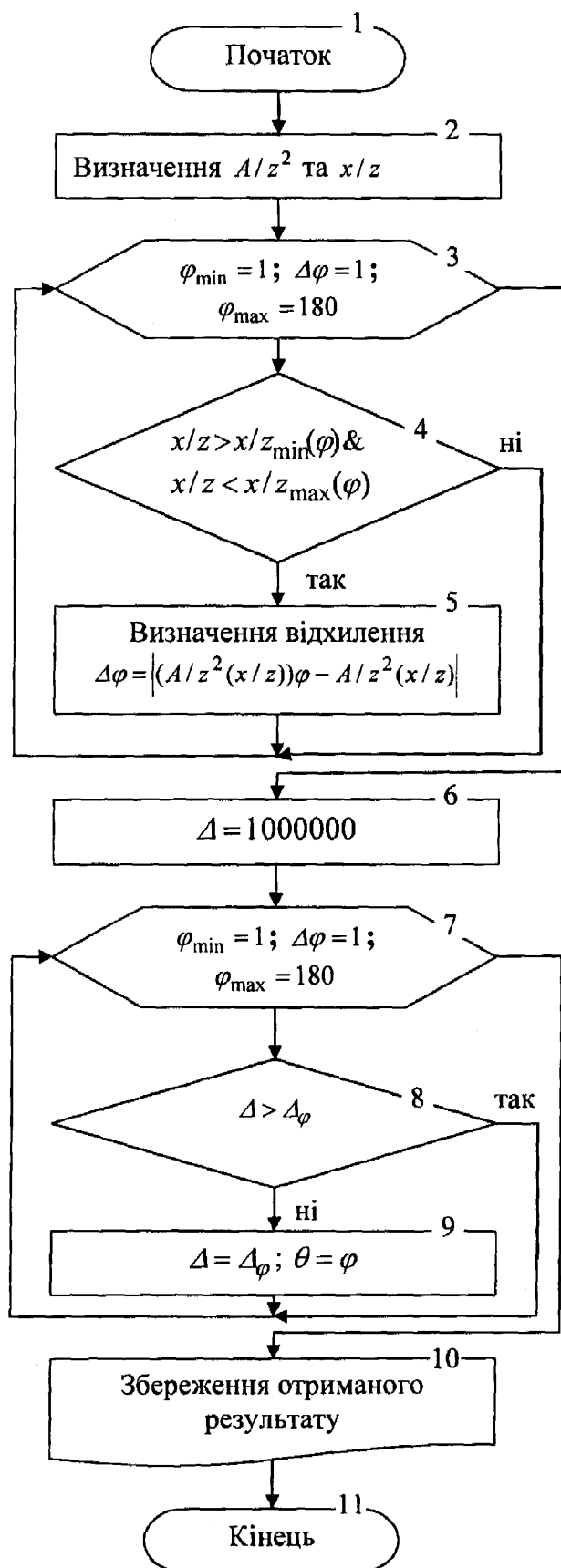


Рис. 2.21. Блок-схема алгоритму визначення крайового кута змочування з використанням поліноміальних залежностей  $A/z^2 = f(x/z)$

## 2.5. Метод оперативного визначення крайового кута змочування шляхом розрахунку значення похідної в точці контакту рідини з поверхнею твердого тіла

Поверхня лежачих крапель не описується простими аналітичними виразами. Для аналітичного опису лінії профілю такої поверхні можна скористатися апроксимаційним поліномом виду

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3, \quad (2.37)$$

де  $x$ ,  $y$  – відповідно вертикальна і горизонтальна координати точки поверхні лежачої краплі;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  і  $a_3$  – коефіцієнти поліному.

Значення ККЗ  $\theta$  в такому випадку можна знайти, визначивши значення похідної в точці трифазного контакту, тобто

$$y' = \operatorname{tg} \theta = a_1 + 2a_2 \cdot x + 3a_3 \cdot x^2. \quad (2.38)$$

Для крапель, які не змочують поверхню ( $\theta > 90^\circ$ ), необхідно використовувати формулу:

$$\theta_{z,c} = 180 \pm \operatorname{arctg}(a_1 + 2a_2 \cdot x + 3a_3 \cdot x^2), \quad (2.39)$$

де знак "+" використовується при обчисленні кута в правій, а "-" в лівій точці контакту трьох фаз.

Для крапель, які змочують поверхню ( $\theta < 90^\circ$ ), пропонується використовувати формулу

$$\theta_{z,c} = \left| \operatorname{arctg}(a_1 + 2a_2 \cdot x + 3a_3 \cdot x^2) \right|. \quad (2.40)$$

Індекс "з" відповідає значенню кута на профілю краплі зліва, а індекс "с" – права.

Тоді результуюче значення ККЗ знаходять за формулою

$$\cos \theta = (\cos \theta_z + \cos \theta_c) / 2. \quad (2.41)$$

Коефіцієнти полінома (2.38) можна отримати методом найменших квадратів [141], розв'язавши систему рівнянь

$$\begin{cases} a_0 N + a_1 \sum_{i=1}^N x_i + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^N x_i^3 = \sum_{i=1}^N y_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^N x_i^4 = \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^N x_i^5 = \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i^2; \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^5 + a_3 \sum_{i=1}^N x_i^6 = \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i^3. \end{cases} \quad (2.43)$$

Координати точок  $x_i$  та  $y_i$  можна знайти, обробляючи отримане зображення краплі за допомогою комп'ютера. Типовий вигляд такого зображення на екрані монітора приведений на рис. 2.22. Обробку зображення здійснюють в декілька етапів, а саме:

1) визначають кут нахилу  $\alpha$  лінії основи краплі на зображенні:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}, \quad (2.44)$$

де  $x_A, y_A, x_B, y_B$  – координати точок А і В (рис. 2.22);

2) визначають координати середини основи зображення краплі (т.С):

$$X_C = \frac{X_A + X_B}{2}; Y_C = \frac{Y_A + Y_B}{2}, \quad (2.45)$$

де  $X_C, Y_C$  – координати середини основи зображення краплі;

3) здійснюють повертання всього зображення на кут  $\alpha$  так, щоб основа краплі стала горизонтальною, після чого зкориговані координати поточних точок лінії профілю краплі визначають наступним чином:

$$X_{Pi} = R_i \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + X_C; Y_{Pi} = R_i \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + Y_C, \quad (2.46)$$

де  $\varphi_i = \arctg\left(\frac{\tilde{Y}_i}{\tilde{X}_i}\right)$ ,  $R_i = \sqrt{\tilde{X}_i^2 + \tilde{Y}_i^2}$  – координати поточних точок в полярній

системі координат з центром в точці С;  $\tilde{X}_i = X_i - X_C$ ;  $\tilde{Y}_i = Y_i - Y_C$  – координати поточної точки в локальній системі координат  $\tilde{X}_i$  С  $\tilde{Y}_i$ .

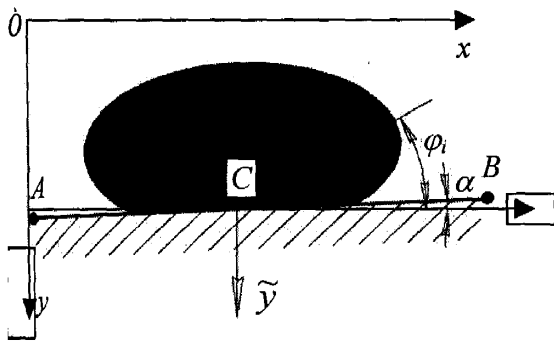


Рис. 2.22. Зображення краплі на екрані монітора

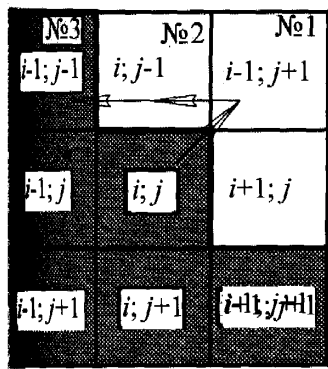


Рис. 2.23. Визначення точок контуру краплі

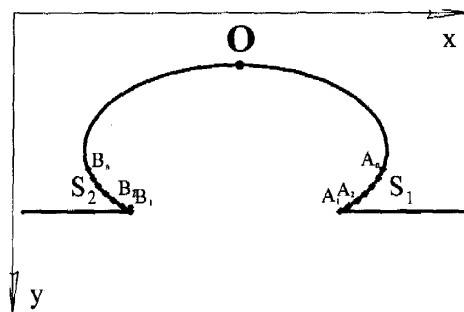


Рис. 2.24. Виділений контур краплі

$A, B$  – точки, що позначають краї підкладки;  $C$  – точка, відносно якої здійснюється поворот зображення;  $\alpha$  – необхідний кут повороту.

Координати точок  $x_i$  та  $y_i$  знаходять шляхом сканування зображення краплі та виділення її контуру. Зображення краплі є чорно-білим – крапля виглядає чорною на сірому фоні (див. рис. 2.22). Алгоритм виділення контуру полягає в наступному. Нехай змінні  $i$  та  $j$  містять координати точки, що належить контуру краплі, частину якого в дискретизованому вигляді зображено на рис. 2.23. Почергово перевіряючи сусідні точки на належність до контуру краплі можна знайти наступну точку контуру. Це здійснюється наступним чином. Перевіряється точка з координатами  $(i+1; j-1)$  (точка №1). Якщо ця точка не належить краплі, то тоді перевіряється точка з координатами  $(i; j-1)$  (точка №2). Якщо і ця точка не належить краплі, то тоді згідно з рис. 2.23 перевіряється точка №3. Значення координат сусідніх точок відносно точки з координатами  $(i; j)$  показано на рис. 2.3. Умовою належності точки краплі є те, що точка, порівняно з фоном, має на певну величину темніше забарвлення. Виділивши крайні точки, перевірені на належність до краплі та зафарбувавши їх в заданий колір, отримаємо контур краплі, який показано на рис. 2.24.

Для знаходження координат точок  $x_i$  та  $y_i$ , які необхідно підставляти в систему (2.42), потрібно просканувати зображення. Сканування відбувається в декілька кроків наступним чином:

1) сканування зображення по стовпцях знизу вгору, внаслідок чого можна знайти координати вершини краплі т.  $O$ , як максимальне значення висот стовпців;

2) сканування зображення по рядках відносно вертикалі через т.  $O$ .

В результаті другого кроку отримують дві множини точок  $S_1 (A_1, A_2, \dots, A_n)$   $S_2 (B_1, B_2, \dots, B_n)$  (рис. 2.24), кількість яких  $N = 20 \div 50$ . При цьому для визначення коефіцієнтів  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  і  $a_3$  до уваги будуть координати тієї ділянки профілю краплі, яка знаходиться біля точки контакту рідини з твердою поверхнею.

У випадках, коли значення  $\theta$  наближається до  $90^\circ$ , збільшується похибка даних  $\theta$  за формулами (2.40) – (2.42). Позбутися цієї похибки можна наступним

ином. Отримані координати точок необхідно повернути на кут  $45^\circ$  відносно точок  $A_i$  або  $B_i$  за формулою:

$$x'_i = R_i \cdot \cos(\varphi_i - 45^\circ), y'_i = R_i \cdot \sin(\varphi_i - 45^\circ), \quad (2.47)$$

$$\text{де } \varphi_i = \arctg\left(\frac{y_i}{x_i}\right), R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}.$$

Значення кута змочування отримують шляхом додавання до результату обчислення знайденого за формулами (2.39) або (2.40) значення  $45^\circ$ .

### Висновки до розділу

Теоретичні дослідження, які приведені у 2-му розділі, зводяться до висновків:

1) здійснена характеристика різної форми капілярних поверхонь, які можуть утворюватися при витискуванні газу (повітря) із отвору каліброваного капіляру у рідину при направленні цього отвору як вертикально вгору, так і вертикально вниз. Причому також як окремий випадок розглянуто утворення газового мостика між нижнім торцем капіляру і горизонтальною поверхнею твердого монолітного тіла. Показано різні стадії цього процесу, які можна використати для визначення крайового кута змочування поверхонь твердих тіл рідинами. Особлива увага приділена різним стадіям утворення газового мостика, що пов'язана з тим, що саме вимірювання максимального тиску у такому мостіку рекомендується використовувати для визначення крайового кута змочування;

2) значна увага приділена математичному моделюванню процесу утворення газового мостика, в результаті чого отримана система диференціальних рівнянь у безрозмірній формі, розв'язок яких дозволить визначати як відповідні геометричні розміри газового мостика в момент максимального тиску в ньому, так і безпосередньо цей тиск, значення якого є функцією крайового кута змочування рідиною поверхні твердого тіла;

3) на основі результатів розв'язку вказаної вище системи диференціальних



рівнянь у безрозмірній формі отримані апроксимаційні поліноміальні залежності, які дозволяють на основі виміряного максимального тиску у газовому мостику при утворенні газового пухирця з урахуванням розміру отвору капіляра, віддалі від його торця до досліджуваної поверхні твердого тіла, властивостей рідини і газу розрахувати крайовий кут змочування;

4) теоретично обґрунтований метод визначення крайового кута змочування на основі аналізу профілю лежачої краплі на поверхні твердого монолітного тіла. В результаті обробки результатів розв'язку диференційних рівнянь, що описують профіль лежачої краплі для різних кутів контакту краплі з поверхнею твердого тіла від  $1^\circ$  до  $180^\circ$ , отримані залежності відношення площі меридіанного перерізу лежачої краплі до квадрату її висоти від відношення діаметру основи краплі до її висоти. Розроблена методика і відповідний алгоритм її реалізації, які дозволяють на основі отриманих результатів розрахунків і вимірювань реального профілю краплі визначати крайовий кут змочування;

5) значна увага приділена теоретичному обґрунтуванню визначення крайового кута змочування шляхом розрахунку значення похідної в точці контакту рідини з поверхнею твердого тіла. Причому похідну розраховують на основі апроксимаційних залежностей висоти краплі від її горизонтальних розмірів на ділянці профілю краплі біля поверхні твердого тіла. Значення розрахованої похідної представляє собою крайовий кут змочування рідиною в краплі поверхні твердого тіла, на якій знаходиться ця крапля.

### Розділ 3

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ПОРИСТИХ ТІЛ МЕТОДОМ КАПІЛЯРНОГО ТИСКУ

### 3.1. Фізичні аспекти змочування пористих тіл рідинами

Змочування пористих тіл є одним з показників, що визначають процес витіснення нафти з реальних нафтогазоносних пластів, ще обумовлює необхідність оцінки змочування пористих тіл. Така оцінка можлива шляхом вимірювання значень параметрів, які характеризують процес змочування (непрямі вимірювання), або шляхом безпосереднього визначення кількісної характеристики змочування – крайового кута змочування  $\theta$ . В останньому випадку необхідно вносити поправки, що характеризують тверду поверхню.

Непрямі вимірювання базуються на вимірюваннях параметрів, які характеризують процес змочування, наприклад: швидкість, з якою рідина всмоктується в пористе тіло, тиск на межі розділу рідина-газ у пористому тілі, що протидіє подальшому проникненню рідини, висота підйому рідини у пористому тілі, тощо.

Існує декілька варіантів схем приладів для визначення змочуваності пористих тіл. В одному випадку досліджуване пористе тіло розміщують в горизонтальній скляній трубці і визначають швидкість руху по ній фронту рідини. В другому випадку пористе тіло розміщують у вертикальній трубці, а висота підйому рідини в ній є мірою величини перепаду тиску.

Швидкість  $v$  і висоту підйому рідини в трубці  $h$ , заповненій досліджуваним пористим тілом, можна визначити з наступних міркувань.

Швидкість руху рідини по осі циліндричної трубки для ньютонівської рідини визначається формулою [119]:

$$v = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu \cdot h}, \quad (3.1)$$

де  $r$  – радіус трубки,  $\Delta P$  – різниця тисків на початку та кінці трубки,  $\mu$  – динамічна в'язкість,  $h$  – довжина трубки.

У випадку вертикальної трубки в різниці тисків слід враховувати гідростатичний тиск стовпчика рідини. Враховуючи, що швидкість  $v = h/t$ , із (3.1) знаходимо, що

$$h^2 = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu} \cdot t. \quad (3.2)$$

Величина  $\Delta P$  показує, який тиск необхідно прикласти для підйому рідини на висоту  $h$ . Цей тиск визначається сумою тиску  $P_{зм}$ , обумовленого змочуванням стінок трубки[40]

$$\Delta P_{зм} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (3.3)$$

гідростатичного тиску  $\Delta \bar{P}$ .

Враховуючи вищевказане, отримуємо:

$$h^2 = \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} + \Delta \bar{P} \right) \cdot t. \quad (3.3)$$

Отримані вирази можна використовувати для визначення  $\cos \theta$  пористих тіл. Якщо рідина рухається в пористому тілі в горизонтальному напрямку, величиною  $\Delta \bar{P}$  необхідно знехтувати. Тоді (3.2) можна представити наступним чином:

$$\frac{h^2}{t} = \frac{r\sigma \cdot \cos \theta}{2\mu} \quad \text{або} \quad v = \frac{r\sigma}{2h\mu} \cos \theta. \quad (3.4)$$

В даному випадку замість  $h$  необхідно приймати шлях, пройдений рідиною в пористому тілі за час  $t$ .

Так як в'язкість  $\mu$  та поверхневий натяг рідини  $\sigma$  є величинами наперед відомими, то, знаючи час руху рідини  $t$  і величину  $h$  згідно (3.4), можна визначити косинус ККЗ:

$$\cos \theta = \frac{2\mu h^2}{r\sigma t}. \quad (3.5)$$

Вирази (3.4), (3.5) строго описують рух рідини в капілярах, однак величина тут вимагає певних уточнень. Якщо при русі в окремому капілярі  $r$  – це радіус капіляру, то при русі в пористому тілі  $r$  – еквівалентний радіус порового простору. Значення цього параметра важко точно визначити, так як воно залежить від упаковки, розмірів та форми частинок в пористому тілі та деяких інших факторів [120]. Тому для конкретних випадків змочування пористих тіл при розрахунках за величину параметра  $r$  необхідно брати еквівалентний радіус.

При визначенні ККЗ пористих тіл різними рідинами слід враховувати топологію капілярної системи тіла. Дослідники використовують різні моделі капілярної системи, які з певним ступенем імовірності відтворюють реальні пористі тіла.

В реальних пористих тілах, наприклад, таких як гірські породи, нафтоносні пласти, найпридатнішою можна вважати хаотичну модель пористих тіл [121]. У хаотичній моделі вузли, знаходяться не в певних строго визначених вузлах ґратки, а у випадкових місцях. Відповідно напрям зв'язків між вузлами також має випадковий характер. Така модель пористого тіла має перевагу в її повній ізотропності, якщо середня довжина капілярів між вузлами є значно меншою від розмірів пористого тіла.

В хаотичній моделі пористого тіла капіляри мають різні поперечні розміри. Форма їх поперечного перерізу не є круглою, але при великій кількості капілярів з високою достовірністю приймають, що всі капіляри мають круглий переріз з еквівалентним радіусом. Для отримання розподілу капілярів за радіусами, близького до реального розподілу пористого тіла, використовують результати експериментальної порометрії.

При прямих вимірюваннях ККЗ на поверхню пористого тіла, попередньо насиченого досліджуваною рідиною, наносять краплю. Однак таке безпосереднє вимірювання ККЗ пористого тіла, на відміну від монолітної

твердої поверхні, не може дати достовірних результатів. Тому кут  $\theta$  в таких випадках може бути визначений за наступними формулами [16]

$$\cos \theta = 1 - \sqrt{\frac{1}{3(1-\varepsilon)\left(\frac{a}{h^2} - \frac{1}{2}\right)}} \text{ при } 0^\circ < \theta < 90^\circ, \quad (3.6)$$

$$\cos \theta = 1 - \sqrt{\frac{1}{3(1-\varepsilon)\left(\frac{2a^2}{h^2} - 1\right)}} \text{ при } \theta > 90^\circ, \quad (3.7)$$

де  $\varepsilon$  – пористість системи,  $a^2$  – капілярна стала рідини,  $h$  — висота краплі.

Очевидно, що для визначення ККЗ згідно з (3.6) і (3.7) потрібно знати пористість системи і висоту краплі.

Відомий спосіб визначення змочуваності пористих тіл шляхом їх насичення спочатку еталонною рідиною, а потім досліджуваною [122]. Швидкість підняття рідини визначають шляхом попереднього вимірювання висоти підняття рідини або за зміною маси зразка. Значення ККЗ розраховують за формулою:

$$\cos \theta' = \frac{V' \mu' \sigma'}{V \mu \sigma} \cos \theta, \quad (3.8)$$

де  $\theta, \theta'$  – відповідно крайові кути змочування пористого тіла еталонною (відомою) та досліджуваною рідиною;  $V, V'$  – відповідно швидкості капілярного підняття еталонної і досліджуваної рідин у пористому тілі;  $\mu, \mu'$  – відповідно динамічна в'язкість еталонної і досліджуваної рідин;  $\sigma, \sigma'$  – відповідно поверхневий натяг еталонної та досліджуваної рідин.

Метод має суттєвий недолік – це складність визначення ККЗ для еталонної рідини. Існують також різні модифікації цього методу, але вони або суттєво ускладнюють метод, або не дозволяють досягти необхідної точності.

Можна також відмітити методи, які базуються на штучній гідрофілізації

зразка з використанням води як еталонної рідини [123]. При цьому гідрофілізація зразків здійснюється за допомогою його екстракції або прожарювання. Однак при цьому також виникає проблема визначення ККЗ пористого тіла еталонною рідиною.

Змочуваність пористих тіл також може бути визначена шляхом підведення пухирця газу до досліджуваного зразка, фіксуванням його контуру, наприклад, фотографуванням та вимірювання кута між основою пухирця та дотичною до його контуру [124]. При цьому порошок, виготовлений з пористого тіла, рівномірним шаром наносять на підкладку з органічного скла, попередньо сказану синтетичним клеєм, і підсушують. Надлишок сухого порошку зсипають, залишаючи при цьому на підкладці моношар його товщиною 40-60 мкм. Пластину занурюють в скляну кювету на глибину 0,5-1 см і за допомогою скляної мікропіпетки на нижню частину підкладки підводять 10-12 пухирців повітря. Після цього через 20-30 хвилин необхідних для встановлення рівноважного гістерезисного кута пухирці повітря проєктують на екран і фотографують їх контури. На фотографії з двох боків основи пухирців в точках дотику трьох фаз проводять дотичні і визначають ККЗ. Цей метод є дуже простим і не потребує складного устаткування. Але в результаті вимірювання ККЗ, як правило, вноситься похибка дослідника. Окрім того, досліджувана рідина має бути прозорою.

### **3.2. Аналіз впливу крайового кута змочування нафтоносних порід на процес витіснення з них нафти**

Ефективність витіснення нафти з пористих блоків різних типів колекторів в значній мірі визначається взаємодією води та вуглеводнів з поверхнею нафтоносних порід та їх властивостями на межах контактуючих фаз.

Властивості поверхні пористої нафтогазоносної породи і, насамперед, її змочуваність відіграють важливу роль в процесах капілярного заміщення флюїдів у пласті.

Рідини всередині пор, які можна формально представити як циліндричні

канали різних радіусів, мають граничні поверхні, тому змочуваність може бути пов'язана з напрямом діючих капілярних сил. В капілярі, частково заповненому водою, а частково нафтою, діє тиск, що залежить від радіуса, коефіцієнта міжфазного натягу на межі вода-нафта і ККЗ на межі розділу фаз «рідина – рідина – тверде тіло.»

Значення ККЗ може знаходитись в межах  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ . Причому, це означає що при  $\theta = 0^\circ$  вся стінка пористої породи змочується водою, при  $\theta \leq 90^\circ$  – переважна змочуваність породи водою, а при  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  — переважна змочуваність породи нафтою,[16].

Змочуваність породи-колектора визначається матеріалом, з якого складається порода, але вона може змінюватися і під впливом рідин, які містяться в порах, тобто також залежить від поверхневих властивостей нафти і води. Відомо, що в пластовій нафті присутні поверхнево-активні і полярні речовини, які можуть адсорбуватися породою. Тому інтегральна змочуваність порід-колекторів є складною функцією властивостей породи і рідин, які насичують поровий простір.

Витіснення нафти водою ускладнюється рядом факторів, до яких можна віднести:

- властивості та форма поверхні породи,
- гідростатичний тиск,
- наявність поверхнево-активних та інших речовин у рідких фазах.

Нафтоносний пласт є складною мозаїчною структурою, у якій гідрофільні плянки можуть чергуватися з гідрофобними. Крім того, нафта гідрофобізує поверхню породи, змінюючи умови змочування. Виходячи з цього можна виділити наступні варіанти процесу витіснення нафти:

- нафта може повністю заповнювати поровий простір пласта;
- дещо ідеалізований випадок, коли в процесі витіснення поряд з межею розділу фаз «нафта-тверде тіло» має місце межа розділу фаз «нафта-вода»;
- пласт змочується водою, тому між породою та нафтою існує прошарок води;

– в процесі витіснення нафта адсорбується на твердій поверхні породи, створюючи між водою і породою граничний шар.

Динаміку процесу витіснення нафти водою з пористого середовища з точки зору термодинамічних уявлень можна представити наступним чином.

Спочатку, при заповненні пласта нафтою, вільна енергія системи  $W$  поч. рівна: [125]

$$W_{\text{поч.}} = S_{nn} \cdot \sigma_{nn} , \quad (3.9)$$

де  $S_{nn}, \sigma_{nn}$  – площа і поверхневий натяг на межі розділу «нафта-порода».

В кінці процесу вільна поверхнева енергія  $W$  кінц. буде такою:

$$W_{\text{кінц.}} = S'_{nn} \cdot \sigma_{nn} + S'_{nv} \cdot \sigma_{nv} + S'_{nw} \cdot \sigma_{nw} , \quad (3.10)$$

де  $S'_{nn}, S'_{nv}$  і  $S'_{nw}$  – площі поверхонь розділу фаз «тверде тіло-нафта», «тверде тіло-вода», «вода-нафта»;  $\sigma_{nn}, \sigma_{nv}$  і  $\sigma_{nw}$  – поверхневі натяги, що відповідають цим поверхням розділу фаз.

Різниця вільної енергії системи дорівнює

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \sigma_{nn}(S_{nn} - S'_{nn}) - \sigma_{nv} \cdot S'_{nv} - \sigma_{nw} \cdot S'_{nw} . \quad (3.11)$$

Враховуючи, що  $S_{nn} - S'_{nn} = S'_{nv}$ , можна отримати:

$$\Delta W = (\sigma_{nn} - \sigma_{nv})S'_{nv} - \sigma_{nw} \cdot S'_{nw} . \quad (3.12)$$

Зменшення вільної енергії системи і процес витіснення можливі, коли  $\Delta W > 0$ . В свою чергу умова  $\Delta W > 0$  у відповідності з (3.12) реалізується з урахуванням наступних нерівностей:



$$\sigma_{nn} > \sigma_{nv}, (\sigma_{nn} - \sigma_{nv})S'_{nv} > \sigma_{nv} \cdot S'_{nv}. \quad (3.13)$$

При проведенні подальших перетворень необхідно враховувати можливість контакту нафти з породою в оточенні води. Тому розрізняють два ККЗ (рис. 3.1): ККЗ нафти по відношенню до твердої поверхні  $\theta_{nn}$  і ККЗ водою цієї ж поверхні  $\theta_{nv}$ .

Виходячи з рис. 3.1 можна написати

$$\sigma_{nn} - \sigma_{nv} = \sigma_{nv} \cdot \cos \theta, \quad (3.14)$$

що виконується при  $\theta < 90^\circ$ . Тобто вільна поверхнева енергія системи нафта-вода-порода буде зменшуватись у процесі витіснення нафти при  $\theta < 90^\circ$ .

Після підстановки  $\sigma_{nn} - \sigma_{nv}$  згідно з (3.14) у (3.12) отримаємо:

$$\Delta W = \sigma_{nv} (S'_{nv} \cos \theta - S'_{nv}), \quad (3.15)$$

звідки випливає, що зменшення вільної поверхневої енергії в кінці процесу має місце при виконанні умов:  $\theta < 90^\circ$  і  $S'_{nv} \cos \theta > S'_{nv}$ .

Рівність вільної поверхневої енергії на початку і в кінці процесу ( $\Delta W = 0$ ) виконується при умові

$$\sigma_{nv} (S'_{nv} \cos \theta - S'_{nv}) = 0, \quad (3.16)$$

звідки

$$\cos \theta = S'_{nv} / S'_{nv}. \quad (3.17)$$

У відповідності з (3.17)  $\Delta W$  зростає із збільшенням значень  $\sigma_{nv}$ ,  $S'_{nv}$  і  $\cos \theta$ . Якщо в процесі витіснення нафти значення  $\sigma_{nv}$ ,  $S'_{nv}$  і  $\cos \theta$  не змінюються, то  $\Delta W$  буде визначатися площами  $S'_{nv}$ ,  $S'_{nv}$ .

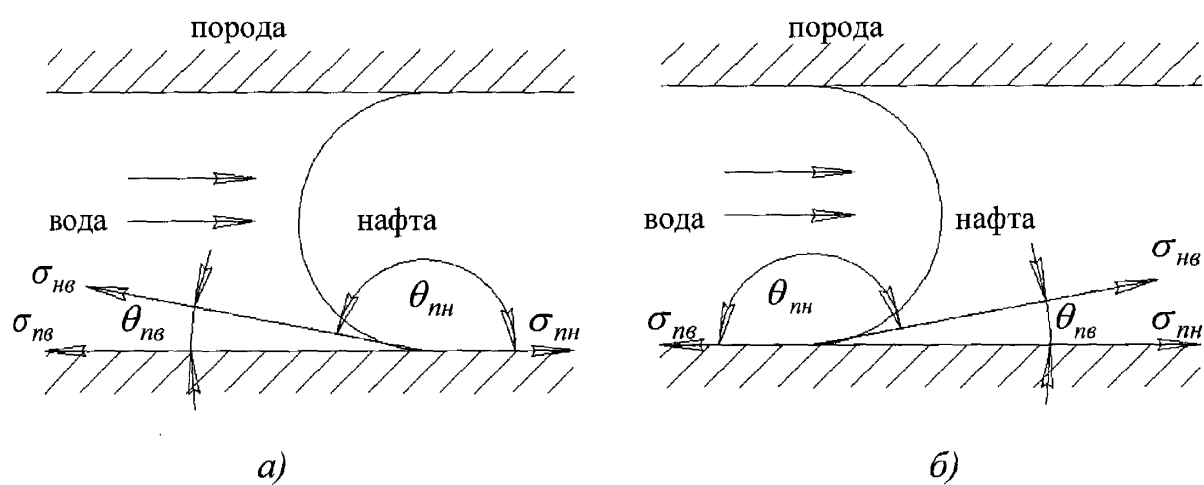


Рис. 3.1. Схема процесів витіснення нафти водою з гідрофільної (а) і гідрофобної (б) порід

Для проведення подальших перетворень доцільно прийняти деякі допущення, а саме: при витісненні нафти водою границя розділу двох рідких фаз (вода-нафта) буде переміщуватись паралельно сама собі, значення  $\Delta S'_{nv}$  і  $\Delta S'_{nv}$  і їх відношення залишатимуться постійними, тобто

$$S'_{nv} / S'_{nv} = a = const. \quad (3.18)$$

Розділивши ліву і праву частини (3.15) на  $S'_{nv}$ , отримаємо:

$$\frac{\Delta W}{S'_{nv}} = \sigma_{nv} \left( \frac{S'_{nv}}{S'_{nv}} \cos \theta - 1 \right), \quad (3.19)$$

або

$$\Delta W = \sigma_{nv} S'_{nv} (d \cos \theta - 1), \quad (3.20)$$

де  $d = S_{nv} / S'_{nv}$ .

Із (3.20) випливає, що величина поверхневої енергії системи «нафта-вода-порода», яка визначає хід процесу витіснення, може спадати тільки при виконанні умови

$$a \cos \theta < 1. \quad (3.21)$$

Отже, спад вільної поверхневої енергії визначається не тільки умовою  $\theta < 90^\circ$ , але і залежить від значення величини  $d$ .

Якщо витіснення відбувається без зміни вільної поверхневої енергії, то у відповідності з (3.20) повинна виконуватись рівність

$$\cos \theta = 1/d. \quad (3.22)$$

З умови зменшення поверхневої енергії з формули (3.20) також випливає,

що при  $\cos\theta > 1/d$  має місце процес витіснення, а при  $\cos\theta < 1/d$  він відсутній.

Таким чином, якщо умови  $\theta < 90^\circ$  і  $\Delta W < 0$  виконуються, то процес витіснення нафти за схемою може мати місце, коли поряд із межею розділу «нафта – порода є і межа нафта» – вода.

Схема процесу витіснення нафти з урахуванням можливого утворення граничного шару рідини приведена на рис.3.2,а, б.

Вільна поверхнева енергія в кінці процесу витіснення (рис. 3.2,а) буде наступною:

$$W_{\text{кінц.}} = S_{\text{нв}} \sigma_{\text{нв}} + S'_{\text{нв}} \sigma'_{\text{нв}}, \quad (3.23)$$

де  $S_{\text{нв}}$  – площа межі розділу «тверде тіло-вода»,  $\sigma_{\text{нв}}$  – міжфазний натяг на межі «вода – поверхня твердого тіла».

Різниця вільної енергії системи до і після процесу витіснення при умові  $S_{\text{нн}} = S_{\text{нв}}$  рівна

$$\Delta W = S_{\text{нв}} (\sigma_{\text{нн}} - \sigma_{\text{нв}}) - S'_{\text{нв}} \sigma'_{\text{нв}}. \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) подібне рівнянню (3.12). Відмінність полягає в тому, що замість  $S_{\text{нв}}$  в рівняння (3.24) входить величина  $S'_{\text{нв}}$ . Тобто у випадку, що розглядається на рис.3.2, а межа розділу «вода-тверде тіло» не порушується у порівнянні з випадком, що представлений на рис. 3.1, б.

Враховуючи (3.14), вираз (3.24) можна подати у вигляді:

$$\Delta W = \sigma_{\text{нв}} (S_{\text{нв}} \cos\theta - S'_{\text{нв}}). \quad (3.25)$$

Таким чином, термодинамічне трактування двох випадків витіснення нафти, схеми яких приведені на рис.3.2, а, б, мало чим відрізняється одне від одного. В той же час, випадок, наведений на рис. 3.2, б, з точки зору термодинамічних уявлень не відповідає раніше розглянутим. Вільна енергія системи в кінці процесу витіснення для випадку, що показаний на рис.3.2, б, буде наступною:

$$W_2 = S_{\text{нн}} \sigma_{\text{нн}} + S'_{\text{нв}} \sigma'_{\text{нв}}. \quad (3.26)$$

Різниця вільної поверхневої енергії буде такою:

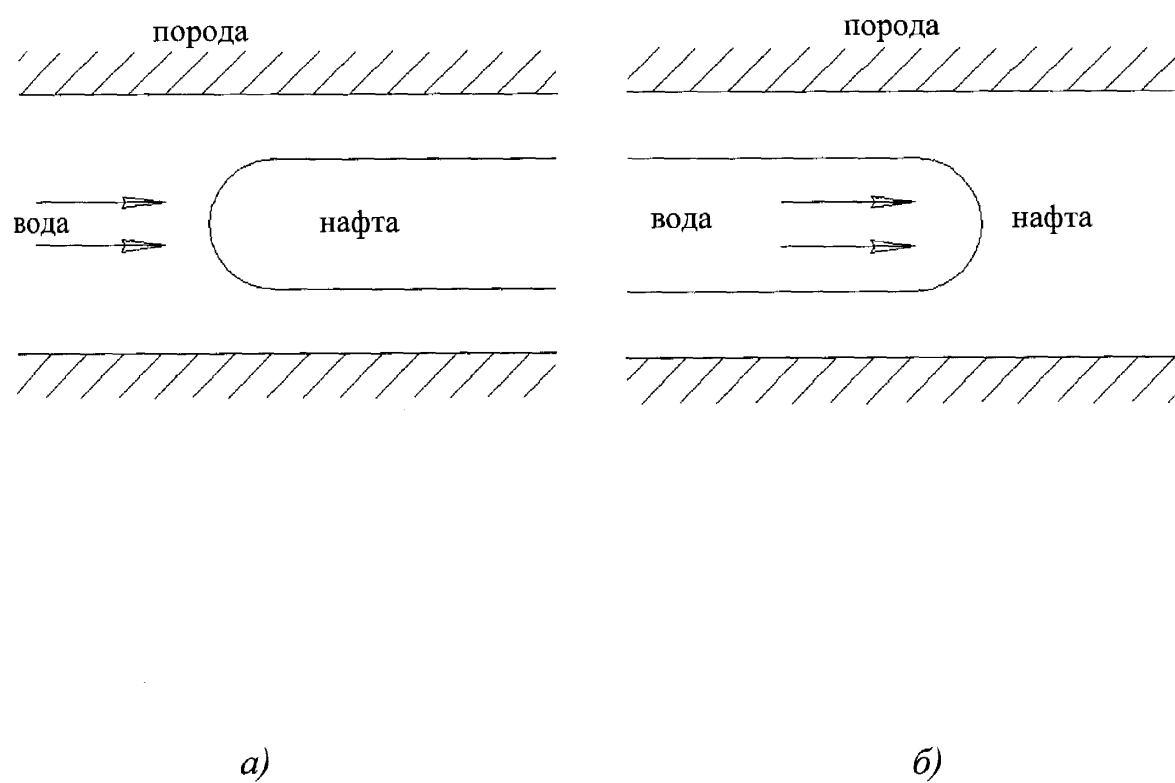


Рис. 3.2. Витіснення водою нафти з утворенням граничних шарів з води (а) або нафти (б)

$$\Delta W = W_1 - W_2 = -S'_{нв} \sigma_{нв}. \quad (3.27)$$

Значення величин  $S'_{нв}$  і  $\sigma_{нв}$  є додатними, тому з умови (3.27) випливає, що спад вільної поверхневої енергії не може прийняти додатного значення, тобто процес витіснення нафти не може відбуватися.

Однак механізм витіснення нафти все таки може мати місце. Це обумовлено тим, що термодинамічний опис загалом не є повним, так як не враховує впливу деяких факторів, що обумовлюють процес витіснення. До таких факторів можна віднести, наприклад, гідростатичний тиск і реологічні властивості граничних шарів рідини. Для підвищення нафтовіддачі необхідно виключити можливість зворотного процесу-витіснення води нафтою.

Розглянуті вище термодинамічні явища не враховують капілярну структуру нафтоносної породи. Однак порода має капілярну структуру, де радіус капілярів може досягати 5-25 мкм, а капілярні тиски можуть набувати значень  $(1...5) \cdot 10^3$  Па. Тому під дією капілярного тиску може відбуватися капілярне витіснення нафти. Найсприятливіші умови для капілярного витіснення нафти з породи спостерігаються при вмісті води в порах в кількості 20-25% від їх об'єму пор.

Поверхневі властивості мінералів пласта (змочування породи нафтою та водою), та поверхневі властивості нафти та води визначають. Окрім того процес капілярного витіснення нафти водою.

Отже, крім капілярного тиску процес витіснення однієї рідини іншою характеризується адгезійним напруженням, тобто енергією змочування  $W_e = \sigma_{pг} \cos \theta$ . Витіснення нафти водою можливе, коли адгезійне напруження води буде більшим, за адгезійне напруження нафти, тобто

$$W_e^{нв} > W_e^{нн}. \quad (3.28)$$

Умові (3.28) відповідає умова

$$\cos \theta_{ne} > \cos \theta_{nn}, \quad (3.29)$$

звідки витікає, що адгезійне напруження залежить від ККЗ  $\theta_{ne}$  і співвідношення між ККЗ води  $\theta_{ne}$  та нафти  $\theta_{nn}$  і породи пласта.

Значення ККЗ визначають швидкість руху межі розділу рідких фаз «вода-нафта». Цю межу розділу деколи називають водонафтовим контактом. Швидкість руху водонафтового контакту визначається гідростатичним тиском в порах.

Виходячи з цього, слід детальніше розглянути умови витіснення нафти при русі водонафтового контакту і наявності капілярного тиску.

Схема руху водонафтового контакту в капілярі при  $\theta < 90^\circ$  наведена на рис. 3.1,а. Якщо швидкість руху є такою, що вода змочує стінки капіляру і  $\theta < 90^\circ$ , то надлишковий капілярний тиск  $2\sigma \cos \theta / r$  буде сприяти руху рідини. Випадок, зображений на рис. 3.1,а має місце при відносно невеликих швидкостях витіснення і характеризує повне витіснення нафти з гідрофільних стінок породи.

При витісненні нафти з гідрофобної породи (рис.3.1,б) капілярний тиск спрямований проти напрямку руху водонафтового контакту і протидіє процесу витіснення. Для витіснення нафти в таких умовах потрібна підвищена швидкість руху водонафтового контакту. Одночасно з зростанням швидкості, внаслідок динамічного гістерезису можливе збільшення ККЗ. Якщо значення ККЗ стане більшим  $90^\circ$ , то капілярні сили почнуть протидіяти процесу витіснення нафти (рис. 3.1,б).

При наступному підвищенні швидкості може відбутися витискування нафти з центральної частини капіляру з утворенням граничного шару нафти біля стінок породи (рис.3.2,б). Збільшення нафтовіддачі в таких умовах досягається шляхом зниження товщини граничного шару, що може відбутися при значній швидкості водяного потоку, який омиває граничний шар нафти.

В процесі витіснення нафти великого значення можуть набувати адсорбційні процеси. Активні компоненти нафти, адсорбуючись на твердій

поверхні, створюють граничний шар. Цей шар має підвищену в'язкість у порівнянні з нафтою, що знаходиться в об'ємі. При витісненні нафти водою проривання такого шару водою практично неможливе. Збільшення нафтовіддачі в цих умовах відбувається в результаті зменшення товщини граничного шару під дією гідростатичного тиску.

Швидкість руху водонафтового контакту за рахунок гідростатичного тиску піддається регулюванню. Окрім того, до числа факторів, що піддаються регулюванню і визначають ефективність процесу витіснення нафти, також відносять в'язкість і поверхневий натяг рідини, що нагнітається для витіснення нафти, та деякі інші.

З наведеного вище випливає, що для підвищення нафтовіддачі пластів потрібна гідрофілізація і олеофобізація поверхні пор твердої породи. Це можна здійснювати шляхом регулювання ККЗ при введенні поверхнево-активних речовин у пластову воду, або додаванням цих речовин і воду що нагнітається для підтримування пластового тиску.

Регулювання змочуваності може здійснюватися на основі результатів визначення ККЗ на реальних зразках породи нафтоносних пластів, тобто кернів породи нафтоносного пласта, які отримані при бурінні свердловин. Для цього необхідно розробити відповідний метод визначення ККЗ зразків гірської породи (кернів) рідинами.

### **3.3. Розробка математичної моделі визначення крайового кута змочування пористих тіл шляхом вимірювання капілярного тиску**

Для визначення ККЗ пористих тіл використовуються метод капілярного насичення, тобто витіснення газу із пор рідиною та метод капілярного витіснення рідини рідиною[126]. При цьому вимірюють швидкість насичення керна змочуючою рідиною або об'єм ввібраної керном рідини, що дозволяє визначити відносне значення ККЗ. Такі методики вимагають тривалих підготовчих операцій, а саме: промивання, сушіння керна, його вакуумування



тощо.

Залежність (3.5) дозволяє визначити абсолютне значення ККЗ, але в ній фігурує такий параметр, як висота підйому рідини в капілярах пористого тіла, яку важко точно визначити.

Тому для визначення надлишкового капілярного тиску, який рекомендується покласти в основу запропонованого методу визначення ККЗ пористих тіл доцільно використати вираз (3.3).

Суть методу полягає у визначенні надлишкового тиску, необхідного для припинення проникнення рідини в пористе тіло. Причому немає принципової різниці між рідинами, що змочують та не змочують пори твердого тіла. У першому випадку надлишковий тиск необхідно прикласти з боку твердого тіла, а у другому – з боку рідини.

Якщо пористе тіло було попередньо насичене певною рідиною, то у зв'язку з тим, що поверхневі шари різних фаз мають різні властивості, в різних фазах створюється різний тиск. Різниця тисків у фазах представляє собою капілярний тиск у меніску і цей тиск спрямований в сторону фази, яка менше змочує поверхню. Результируючий перепад тиску можна виразити залежністю:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{en} \cos \theta}{r_{екв}}, \quad (3.30)$$

де  $\sigma_{en}$  – міжфазний натяг на межі контакту двох рідин; індекси "е", "н" – відповідно вода і нафта, що приймають участь у процесі, причому фаза "е" краще змочує поверхню пористого тіла, ніж фаза "н";  $r_{екв}$  – еквівалентний радіус пор породи.

Виходячи з (3.30), величина змочування рівна:

$$\cos \theta = \frac{\Delta P \cdot r_{екв}}{2\sigma_{en}}. \quad (3.31)$$

Недоліком вказаного вище є необхідність попереднього визначення значення  $r_{екв}$ , що викликає певні затруднення. Еквівалентний радіус  $r_{екв}$  капілярів пор пористого тіла можна визначати інші через величини, наприклад, пористість за формулою [16]:

$$r_{екв} = \frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_{ск} \bar{A}}, \quad (3.32)$$

де  $\varepsilon$  – пористість досліджуваної породи;  $\rho_{ск}$  – густина скелету пористого тіла;  $\bar{A}$  – питома поверхня пористого тіла.

Порівнюючи (3.31) і (3.32), видно, що замість однієї невідомої величини в (3.31) введено три інші (3.32). Однак всі ці величини можна визначити.

Пористість породи можна визначити як відношення об'єму пор до об'єму всього тіла. Вона легко піддається визначенню з достатньою точністю. Визначення густини скелету пористого тіла також не є складною задачею. Вона може бути визначена через масу тіла у сухому вигляді, геометричні розміри зразка та значення пористості. Одним із методів визначення питомої поверхні пористого тіла є метод БЕТ (Бернауера - Еммета - Теллера ) [40], що використовує явище низькотемпературної конденсації азоту на поверхні пористого тіла. Цей метод реалізується за допомогою складної апаратури, тому є досить дорогим і не завжди прийнятним для практичних задач. Ще однією реалізацією визначення питомої поверхні є метод адсорбції барвників з розчинів [127]. Популярність даного методу зумовлена простотою колориметричного визначення концентрації барвника у розчині. Звичайно адсорбція барвників описується рівнянням Ленгмюра, але вона може бути і полімолекулярною. Однак на поверхні крім процесу адсорбції можуть проходити процеси хемосорбції барвника. В загальному слід відмітити, що методи визначення питомої поверхні за адсорбцією з розчинів, хоч зручні експериментально, але результати визначення включають систематичні похибки. Тому використання методу БЕТ є неприйнятним через складність та

відсутність відповідної апаратури, а метод адсорбції барвників—через неточність визначення питомої поверхні.

Виходячи з цього виникає необхідність розробки такого методу, який би дозволив уникнути вимірювання величин, значення яких визначаються або складно, або недостатньо точно.

Серед методів вимірювання ККЗ пористих тіл також є відомим метод, що базується на визначенні контактного кута через швидкість змочування пористого тіла рідиною [128]. Інтерпретуючи вираз (3.5) можна вивести залежність між ККЗ та швидкістю змочування:

$$\cos \theta = \frac{2h\mu}{\sigma \cdot r_{екв}} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (3.33)$$

де  $\frac{dh}{dt}$  – швидкість проникнення рідини на висоту  $h$ .

Визначивши  $r_{екв}$  з (3.30), і підставивши отриманий вираз у (3.33) можна позбавитись параметра  $dh/dt$ . Тоді одержимо:

$$\cos^2 \theta = \frac{2h\mu\Delta P}{\sigma^2} \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (3.34)$$

Кінцева формула визначення шуканого параметра  $\cos \theta$  має вигляд:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{2h\mu\Delta P}{\sigma^2} \cdot \frac{dh}{dt}}. \quad (3.35)$$

Під висотою підняття  $h$  тут треба розуміти деякий інтегральний показник. Слід відмітити складність візуального визначення цього параметру для непрозорих тіл, оскільки тут присутній вплив пристінного ефекту і майже неможливо чітко визначити границю розділу двох фаз. Тому доцільно замінити її величиною, яка б легше піддавалась визначенню.

Якщо простір над твердою фазою є герметичним і поступлення рідини в пори пористого тіла відбувається тільки через межу контакту тіла із рідиною, то можна використати рівняння ідеального газу для ізотермічного процесу. Тоді

$$V_0 P_0 = V P, \quad (3.36)$$

де  $V_0$ ,  $P_0$  – відповідно об'єм газової фази у керні та тиск у ній перед контактуванням керна з досліджуваною рідиною;  $V$ ,  $P$  – теж після насичення рідиною.

Виконавши ряд перетворень, можна отримати залежність між інтегральною висотою підняття та тиском, що створюється в камері над зразком.

При піднятті рідини по капілярах керна об'єм газової фази зменшується на величину об'єму заповнення пор рідиною, отже:

$$V = V_0 - h \cdot S \cdot \varepsilon, \quad (3.37)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу керна.

З врахуванням (3.37) вираз (3.36) отримає вигляд:

$$V_0 P_0 = P(V_0 - h S \varepsilon). \quad (3.38)$$

З рівняння (3.38) отримуємо:

$$h = \frac{(P - P_0)V_0}{P \cdot S \cdot \varepsilon} = \frac{V_0}{S \cdot \varepsilon} \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right). \quad (3.39)$$

Продиференціювавши вираз (3.39), отримаємо вираз для швидкості підйому рідини на висоту  $h$ :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V_0}{S \cdot \varepsilon} \left( \frac{P_0}{P^2} \right) \frac{dP}{dt}. \quad (3.40)$$

Отримані вирази (3.40) та (3.39) підставимо у формулу (3.35) і отримаємо:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sqrt{\frac{2V_0 \cdot \left(1 - \frac{P_0}{P}\right) \cdot \mu \cdot P}{S \cdot \varepsilon \cdot \sigma^2} \cdot \frac{V_0}{S \cdot \varepsilon} \left( \frac{P_0}{P^2} \right) \frac{dP}{dt}} = \\ &= \frac{V_0}{S \cdot \varepsilon \cdot \sigma} \cdot \sqrt{2\mu \cdot \frac{P_0}{P} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right) \frac{dP}{dt}}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

В отриману залежність (3.41) для визначення змочуваності кернів входять величини, вимірювання яких з необхідною точністю не є проблематичним, включаючи і  $\varepsilon$ , зважаючи на технічно реалізовані прилади для вимірювання в'язкості, пористості, поверхневого натягу та тиску.

### Висновки до розділу

Проведені дослідження стосовно розроблення нового методу визначення ККЗ пористих тіл зводяться у загальному до наступного:

1) детально розглянуті фізичні аспекти змочування рідинами пористих тіл. Показано, що величина  $\cos \theta$  при цьому може бути визначеною через висоту підняття рідини у пористому тілі, поверхневий натяг на межі контакту «рідина – газ», динамічну в'язкість рідини, висоту підняття рідини у пористому тілі за певний час внаслідок дії капілярних явищ на трифазній межі контакту «тверде тіло – газ – рідина», а також пористість пористого твердого тіла. Отримані при цьому залежності дають можливість дослідити процес змочування пористих тіл і можуть бути використаними для розрахунку величини  $\cos \theta$ ;

2) проаналізований вплив ККЗ нафтоносних порід на процес витіснення нафти із пористого середовища нафтогазоносної породи. Показано, що на цей процес суттєво впливають поверхневі натяги на межі контакту «вода – нафта»,

«нафта – газ», «вода – газ», а також гідрофільність та гідрофобність матеріалу скелету породи по відношенню до витисного агента (води чи газу). При чому в залежності від крайового кута змочування поверхні скелета породи водою чи нафтою процес руху нафти при витісненні буде відбуватися по різному. Найбільш сприятливою для витіснення нафти є ситуація, коли поверхня твердого пористого тіла змочується водою, що дозволяє оптимально керувати процесом витіснення нафти водою з відповідною поверхнево-активною речовиною;

3) запропонований і теоретично обґрунтований метод визначення ККЗ пористих тіл шляхом вимірювання капілярного тиску на кернах породи певних розмірів, для реалізації якого методично необхідно знати динамічну в'язкість рідини, поверхневий натяг на межі контакту «рідина – газ», пористість пористого керна, тиск в ньому до і після досягнення рівноважного стану, а також швидкість зміни тиску при капілярному піднятті рідини у пористому тілі. Вказані параметри можуть бути виміряними у процесі проведення відповідних досліджень.

## Розділ 4

### ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Для визначення ККЗ твердих тіл рідинами на основі теоретичних досліджень та математичного моделювання процесів утворення газового пухирця в рідині в контакті з поверхнею твердого тіла, утворення лежачої краплі на поверхні твердого тіла і зміни капілярного тиску у пористому тілі у даному розділі розроблені структурні схеми приладів для реалізації кожного із запропонованих методів визначення ККЗ, описані методики і особливості їх реалізації конкретними технічними засобами.

#### 4.1. Розроблення структурної схеми і методики контролю ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску в газовому містку

Прилад для контролю ККЗ повинен давати можливість ведення процесу з використанням сучасної обчислювальної техніки, проводити обробку результатів вимірювання, за заданим алгоритмом, визначати ті характеристики процесу змочування, які раніше практично не визначалися, забезпечувати необхідну точність визначення ККЗ як в статичному, так і в динамічному режимах, мати не складну конструкцію.

Одержані в попередньому розділі результати дають методологічну основу для реалізації приладу на принципі вимірювання максимального тиску в газовому капілярному містку, який утворюється в рідині між нижнім торцем капіляру і поверхнею досліджуваного твердого тіла.

У такому приладі газовий капілярний місток повинен мати пневматичний зв'язок через капіляр з пневматичною частиною приладу, яка буде забезпечувати процес утворення пухирців із нижнього торця капіляра. Газові пухирці в процесі росту досягатимуть поверхні твердого тіла, після чого будуть перетворюватися в газовий капілярний місток, який буде змінювати свою конфігурацію. Кривизна поверхні цього містка буде залежати від тиску всередині нього максимальне значення  $P_{\max 2}$ , якого в свою чергу, буде функцією крайового кута змочування, глибини положення

торця капіляра і фізико-хімічних властивостей рідини. Після досягнення максимального значення тиску  $P_{\text{макс.2}}$  (див. рис. 4.1) всередині і відповідно максимальної кривизни поверхні капілярного містка останній втратить стійкість, перетвориться у газовий пухирець, який відірветься від капіляра і поверхні твердого тіла у вигляді бульбашки. У цей момент відбувається падіння тиску в капілярі, після чого процес утворення містка почнеться спочатку.

Таким чином, виходячи з вищесказаного, прилад повинен складатись з: пневматичної частини, яка має забезпечувати процес утворення газових містків в рідині між каліброваним капіляром та поверхнею досліджуваного зразка твердого тіла; механізмів, які забезпечуватимуть стабілізацію механічних блоків приладів під час утворення повітряного містка, тобто протягом часу проведення вимірювань; давача тиску для перетворення тиску всередині газового містка в електричний сигнал; електричної частини для забезпечення підсилення та попередньої обробки електричного сигналу від давача тиску до відповідної форми, в якому він може оброблятися цифровими електронними засобами; персональний комп'ютер, який забезпечуватиме контроль процесу вимірювання згідно розробленого алгоритму, проводитиме необхідні розрахунки і буде представляти отримані результати оператору.

Структурна схема приладу, який реалізує визначення ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску у газовому пухирці, що утворюється між вихідним отвором каліброваного капіляру і поверхнею твердого досліджуваного тіла (прилад ВКЗ-1), представлена на рис. 4.2.

Принцип роботи приладу ВКЗ-1 (рис. 4.2) полягає у наступному.

На вихід пневматичного блоку 1 поступає газ (повітря) з наростаючим в часі тиском. Газ одночасно поступає у калібрований по внутрішньому радіусу  $r_{\text{вн}}$  капіляр 2 і на вхід давача тиску 6. Капіляр 2 опущений суворо вертикально у досліджувану рідину 3 на певну глибину  $h_{\text{зан.}}$  і його нижній



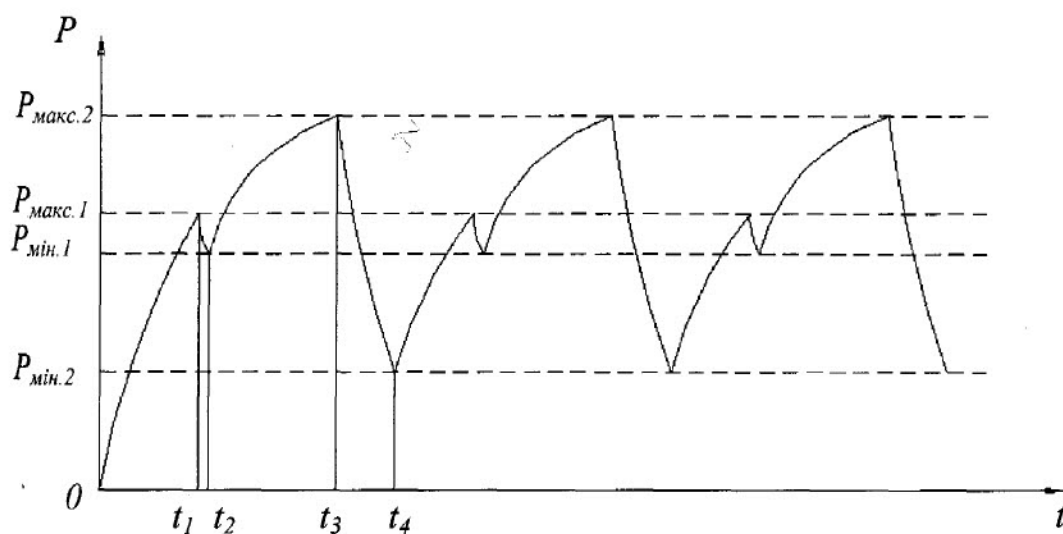


Рис. 4.1. Зміни тиску у газовому пухирці при його утворенні між нижнім торцем капіляру і поверхнею досліджуваного твердого тіла

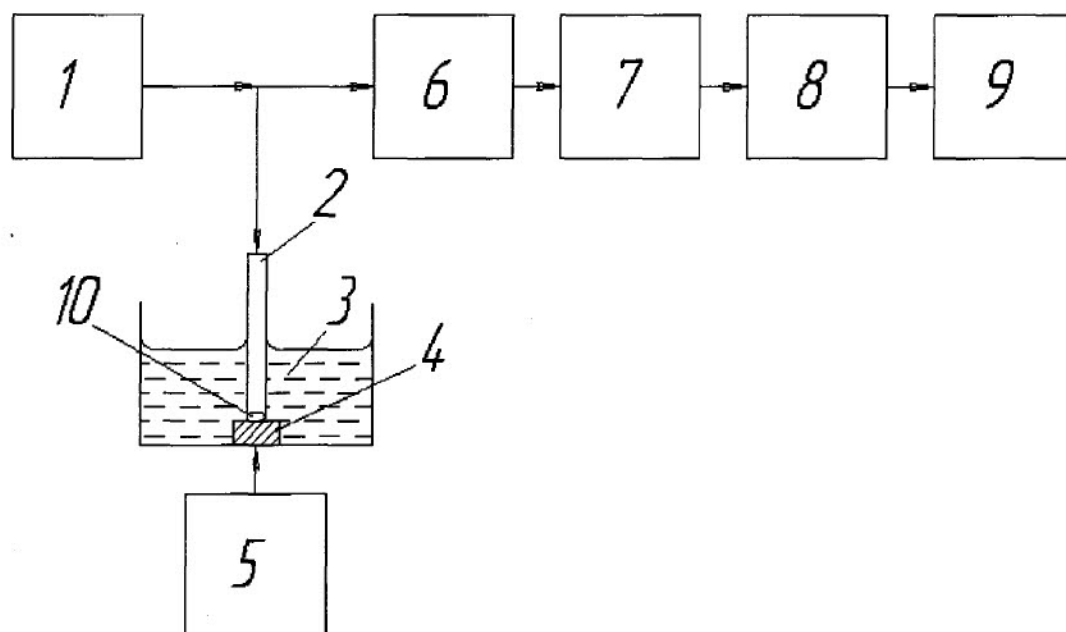


Рис. 4.2. Структурна схема приладу ВКЗ-1 для визначення ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску у газовому пухирці

1 – пневматичний блок; 2 – калібрований капіляр; 3 – досліджувана рідина; 4 – досліджуване тверде тіло; 5 – механізм переміщення; 6 – давач тиску; 7 – електронний блок; 8 – комп'ютер; 9 – монітор; 10 – газовий місток

торець знаходиться над горизонтальною поверхнею досліджуваного твердого тіла 4 на висоті  $0.5r_{\text{вн}}$ . В процесі наростання тиск змінюватиметься згідно графіка на рис. 4.1. В момент часу  $t_1$  цей тиск досягне свого першого максимального значення  $P_{\text{макс.1}}$ . Що відповідатиме моменту торкання вершини меніска пухирця поверхні твердого тіла. В результаті тиск різко зменшиться і в момент часу  $t_2$  досягне свого першого мінімального значення  $P_{\text{мін.1}}$ . При подальшому наростанні тиску лінія контакту «газ-рідина-тверде тіло» буде переміщуватися по поверхні твердого тіла, тиск у газовому містку буде зростати і в момент часу  $t_3$  досягне свого другого максимального значення  $P_{\text{макс.2}}$ . В цей момент наступить нестійкий стан газового містка, в результаті чого утвориться газовий пухирець, який вплине на поверхню рідини 3, а тиск над меніском рідини у капілярі різко зменшиться до свого другого мінімального значення  $P_{\text{мін.2}}$ . Після цього процес утворення наступних газових пухирців буде повторятися.

Величини тисків  $P_{\text{макс.1}}$ ,  $P_{\text{макс.2}}$ ,  $P_{\text{мін.1}}$  і  $P_{\text{мін.2}}$  є функціями глибини  $h_{\text{зан.}}$ , поверхневого натягу межі розділу «рідина-газ»  $\sigma_{\text{pg}}$ , внутрішнього радіуса капілярів  $r_{\text{вн}}$ , ККЗ тіла рідиною занурення капіляра, різниці густин рідини газу  $\Delta\rho$  і ємності пневматичної схеми (вихід пневмоблока 1, капіляра 2 і давача б). Однак найбільш інформативним, як це було показано у другому розділі, є тиск  $P_{\text{макс.2}}$ , на основі виміряного значення якого можна розрахувати значення ККЗ досліджуваного твердого тіла рідиною.

Значення тиску  $P_{\text{макс.2}}$  вимірюється давачем тиску б, вихідний електричний сигнал якого поступає на вхід електронного блоку 7, де цей сигнал перетворюється відповідним чином в цифровий сигнал, що поступає на вхід комп'ютера 8, в якому обробляється і у вигляді значення розрахованого ККЗ представляється на моніторі 9.

Занурення капіляру 2 у рідину 3 здійснюється наступним чином.

За допомогою механізму переміщення 5 посудину з досліджуваною

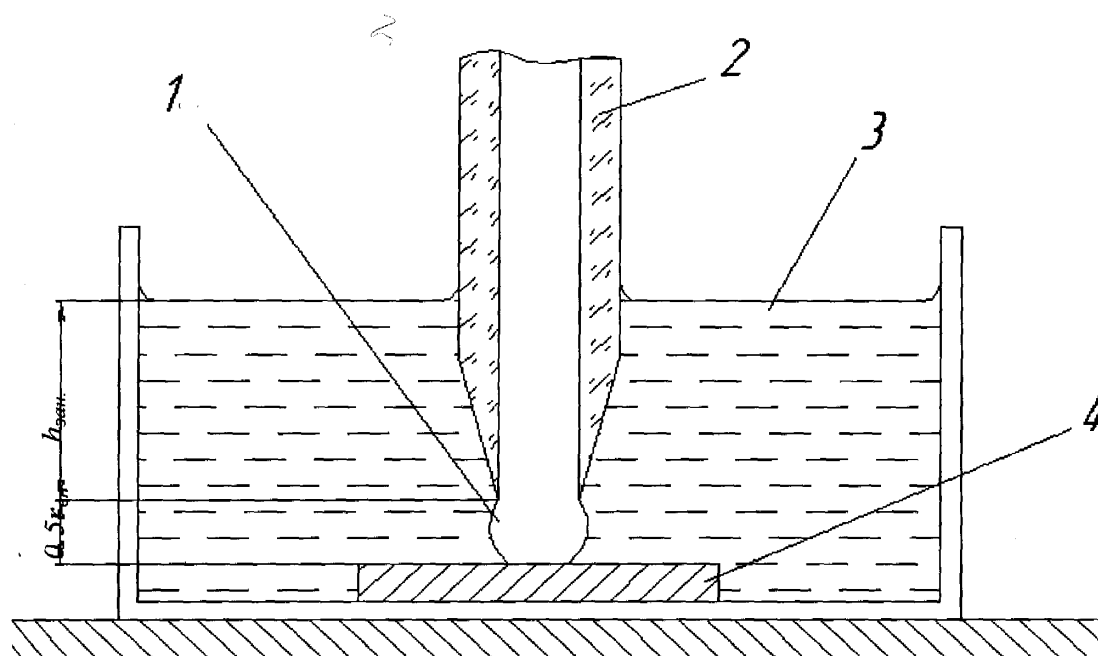


Рис. 4.3. Схематична конструкція вимірювального блоку приладу ВКЗ-1  
1 – газовий місток; 2 – калібрований капіляр; 3 – досліджувана рідина;  
4 – досліджуване тверде тіло;

рідиною піднімають вгору до моменту торкання нижнього торця капіляра 2 поверхні рідини 3. Після цього посудину далі піднімають вгору до торкання нижнього торця капіляра 2 поверхні твердого досліджуваного тіла 4. Після цього посудину опускають на величину  $0.5r_{\text{ен}}$ . В результаті такої спуско-підйомної процедури визначають глибину занурення нижнього торця вимірювального капіляра  $h_{\text{зан.}}$ , значення якої разом із значенням густини рідини і газу вводять в комп'ютер 8 для розрахунку ККЗ.

#### **4.2 Розроблення структурної схеми приладу і методики контролю крайового кута змочування поверхонь твердих монолітних тіл оптичним методом**

При розробленні приладу для контролю ККЗ поверхні твердого монолітного тіла оптичним методом слід використати сучасні засоби оптоелектронної техніки та засоби обчислювальної техніки з метою значного зменшення до мінімуму долі ручних операцій в процесі визначення ККЗ.

З урахуванням цього, а також вимог щодо забезпечення вимірювання параметрів, визначених у п. п. 2.4 і 2.5, прилад для контролю ККЗ твердих тіл рідинами повинен містити вузли, які забезпечують стримання збільшеного контрастного зображення краплі досліджуваної рідини на плоскій горизонтальній досліджуваній поверхні зразка твердого тіла. Профіль зображення краплі на поверхні твердого тіла повинен за допомогою засобів телевізійної техніки передаватися для обробки зображення на персональний комп'ютер, який, в свою чергу, повинен обробляти зображення згідно розробленого алгоритму ККЗ

З врахуванням вищесказаного розроблена структурна схема приладу ВКЗО-1 (рис. 4.4), яка реалізує запропоновані методи контролю ККЗ (п.п. 2.4, 2.5) оптичним методом

Розроблена схема приладу ВКЗО-1 для контролю змочуваності дозволяє визначати ККЗ на основі результатів вимірювання відповідних геометричних

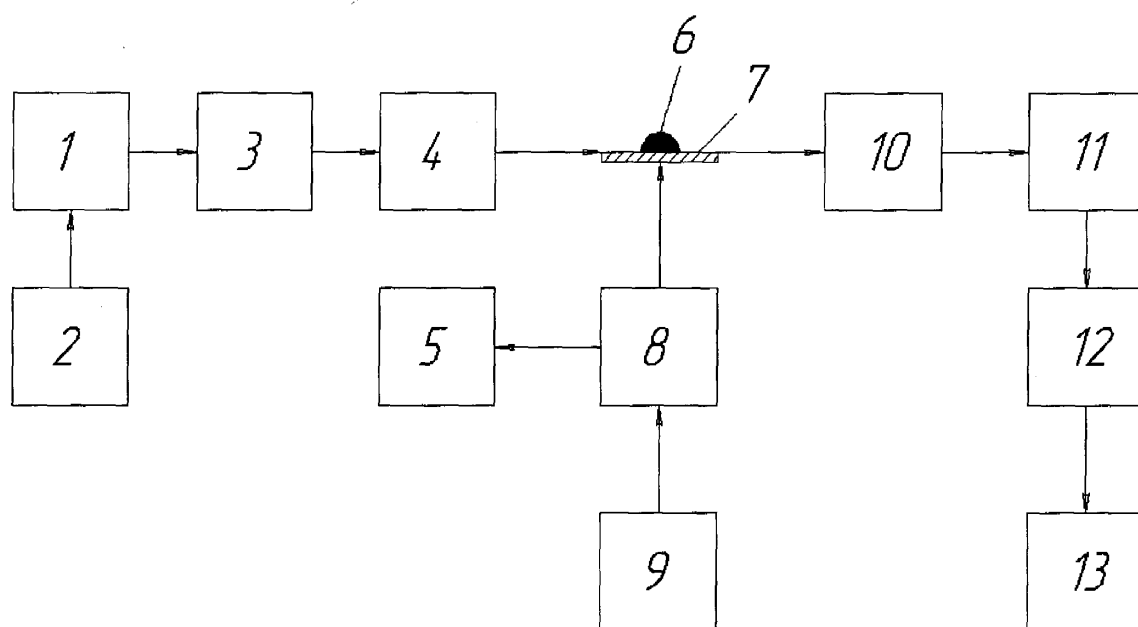


Рис. 4.4 Структурна схема приладу ВКЗО-1

1 – освітлювач; 2 – блок живлення; 3 – світлофільтр; 4 – матовий екран; 5 – індикатор горизонтальності; 6 – крапля рідини; 7 – досліджуваний зразок твердого тіла; 8 – столик; 9 – механізм переміщення столика; 10 – об’єктив; 11 – телекамера; 12 – комп’ютер; 13 – дисплей

параметрів лежачої краплі досліджуваної рідини, що знаходиться на поверхні досліджуваного твердого тіла.

В одному випадку (п. 2.4) це будуть результати вимірювання площі меридіанного вертикального перерізу краплі через її вершину, висоти і діаметра краплі згідно цього перерізу.

У даному випадку (п. 2.5) це будуть результати вимірювання параметрів точок контуру нижньої частини краплі при її знаходженні на поверхні твердого досліджуваного монолітного тіла. Причому кількість таких точок не повинна бути меншою 10 на віддалі від основи краплі до її найбільшого діаметра (у випадку гідрофобних твердих поверхонь), або на нижній половині краплі (у випадку гідрофільних твердих поверхонь) з обов'язковим визначенням параметрів краплі у її основі.

Причому вказані параметри лежачої краплі слід вимірювати як мінімум в чотирьох її положеннях шляхом обертання столика 8 на кожні  $90^\circ$  відносно вертикальної осі краплі Z, яка проходить через вершину лежачої краплі.

Методика проведення контролю ККЗ згідно рис. 4.4 оптичним методом з використанням телекамери, з'єднаної з комп'ютером, полягає в наступному.

Перед початком процесу контролю запускають в комп'ютері 12 програму обробки відеозображень. На предметний столик 8 встановлюють зразок досліджуваного твердого тіла 7 і горизонтують установку, контролюючи горизонтальність за рівнем, встановленим на основі приладу. Якщо досліджуваний зразок 7 не є плоскопаралельним, то тоді на його досліджувану поверхню встановлюють додатковий рівень.

За допомогою механізму піднімання столик 9 встановлюють на таку висоту, щоби лінія поверхні зразка 7 була розміщена в нижній частині екрану монітора 13 на висоті 5-10% висоти екрану 4.

На поверхні столика 8 нанесено перехрестя, яке дозволяє наносити краплю 6 на зразок 7 орієнтовно в центрі столика.

Краплю 6 досліджуваної рідини на поверхню досліджуваного тіла наносять за допомогою дозаторів таким чином, щоб об'єм краплі був завжди

приблизно однаковим, що забезпечує спів розмірність її поперечних розмірів для різних рідин. Цим усувається вихід зображення краплі за межі екрану 4, а також дозволяє використовувати об'єктив 10 з постійним коефіцієнтом збільшення.

Після цього шляхом переміщення об'єктива 10 уточнюють чіткість зображення профілю краплі 6 на екрані монітора 13.

Якщо зображення краплі 6 виходить за межі екрану монітора, то механізмом горизонтального переміщення столика встановлюють середину зображення краплі на екрані так, щоб її було видно всю одночасно.

Після цього профіль краплі в оцифрованому вигляді заносять у пам'ять комп'ютера 12.

Процес нанесення краплі на зразок, уточнення чіткого зображення краплі, уточнення розміщення зображення краплі на екрані та запам'ятовування зображення триває не більше 10 с, що дозволяє проводити контроль змочування тіл легко випаровуваними рідинами.

Після запам'ятовування зображення краплі здійснюється обробка зображення згідно однієї або іншої методик, описаних в п.п. 2.4 і п. 2.5.

Після цього процес визначення ККЗ на основі профілю лежачої краплі, повернутої за допомогою столика 8 на  $90^\circ$  навколо вертикальної осі повторюють.

Оскільки розроблено два методи визначення ККЗ на основі профілю лежачої краплі і відповідно дві програми обробки оптичного зображення та обчислення ККЗ, то їх використовують наступним чином.

Якщо потрібно контролювати змочуваність твердих тіл рідинами що швидко випаровуються, чи досліджувати динаміку процесу змочування, то слід застосовувати метод і відповідну програму обробки зображення та обчислення ККЗ, описані в п.п. 2.5. При дослідженні квазістатичних процесів змочування доцільно використовувати точніший, але повільніший метод, описаний в п.п. 2.4.

### 4.3. Розроблення структурної схеми приладу і методики контролю крайового кута змочування твердих пористих тіл

Приведені в третьому розділі результати теоретичних досліджень змочуваності пористих тіл дозволяють розробити прилад для визначення ККЗ зразків цих тіл, наприклад, зразків породи нафтоносних пластів (кернів).

Із аналізу отриманого виразу (3.41) для визначення ККЗ пористих тіл видно, що для отримання значення ККЗ потрібно попередньо визначити ряд параметрів, а саме:  $v_0$ ,  $S$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $P_0$  та отримати залежність тиску у вимірювальній камері  $P$  в часі.

Пористість кернів  $\varepsilon$  можна визначити різними методами, але для кернів циліндричної форми найкраще підходить прилад „Експресс-пор” російського виробництва. Знаючи пористість  $\varepsilon$  та геометричні розміри керну (висоту  $h$  та площу поперечного перерізу  $S$  - з виразу (3.37) можна визначити об'єм порового простору керна  $v_0$ .

Динамічну в'язкість  $\mu$  можна визначити відомими віскозиметрами промислового виробництва.

Отже, для визначення значення ККЗ  $\cos\theta$  керна потрібно тільки вимірювати тиск  $P_0$  перед насиченням керна змочуваною рідиною, тиск  $P$  в кінці насичення та швидкість зміни тиску від початкового значення  $P_0$  до значенням  $P$ . Вимірювання тиску не є складною технічною задачею, тому для визначення  $\cos\theta$  кернів слід розробити технічні засоби для забезпечення умов вимірювання зміни тиску над керном при капілярному піднятті досліджуваної рідини по порах керна. Керн повинен бути герметизований стосовно бокових його стінок так, щоб тільки нижня основа керна була в контакті зі змочуючою досліджуваною рідиною, а верхня основа повинна вільно виходити в камеру, де вимірюється тиск  $P$ .

Виходячи з цього, прилад для контролю змочуваності кернів повинен



містити наступні основні складові частини: вимірювальну камеру, в яку поміщують kern; вимірювач тиску, з'єднаний із верхньою частиною камери; систему забезпечення герметичності бічної стінки керна для усунення виходу через неї повітря при капілярному підніманні рідини; систему подачі досліджуваної рідини до нижньої основи керна; електронний блок для підсилення сигналу від давача тиску та перетворення його у цифровий код, який оброблятиметься персональним комп'ютером; персональний комп'ютер для обробки і представлення результатів контролю ККЗ пористих тіл.

Функціональна схема приладу для контролю змочуваності пористих тіл (кernів) зображена на рис. 4.5

Процес визначення змочуваності пористого тіла (керн) за допомогою вказаного приладу відбувається наступним чином. У вимірювальну камеру 6 вставляють досліджуване пористе тверде тіло (керн) 7 і камеру знизу закривають днищем-пробкою 11. В цей час вимірюють початковий тиск  $P_0$  у камері. Далі насосом 1 в порожнину вимірювальної камери нагнітають рідину. Навколо бічної поверхні керна розміщена еластична гумова манжета 9, яка під тиском рідини щільно її облягає та ізолює від рідини. При досягненні потрібного тиску, контрольованого манометром 2, канал подачі обтискуючої рідини перекривають краном 4. Після цього відкривають кран 5 подачі досліджуваної рідини із резервуара 3 у нижній відсік вимірювальної камери 6 до торкання рідини із нижньою основою керна 7. Стабільний рівень досліджуваної рідини регулюється трубкою стоку 10.

Досліджувана рідина, піднімаючись знизу по порах керна 7 витискує повітря у верхній відсік вимірювальної камери 6, де вимірюється тиск за допомогою давача тиску 8. Сигнал із останнього підсилюється підсилювачем 12, після чого перетворюється у цифровий код за допомогою аналого-цифрового перетворювача 16, і подається на вхідний порт персонального комп'ютера 18 для обробки результатів вимірювання.

В момент відкривання крана 5 піднімається рівень досліджуваної рідини до основи керна, змочує його і над керном зростає тиск, що приведе до

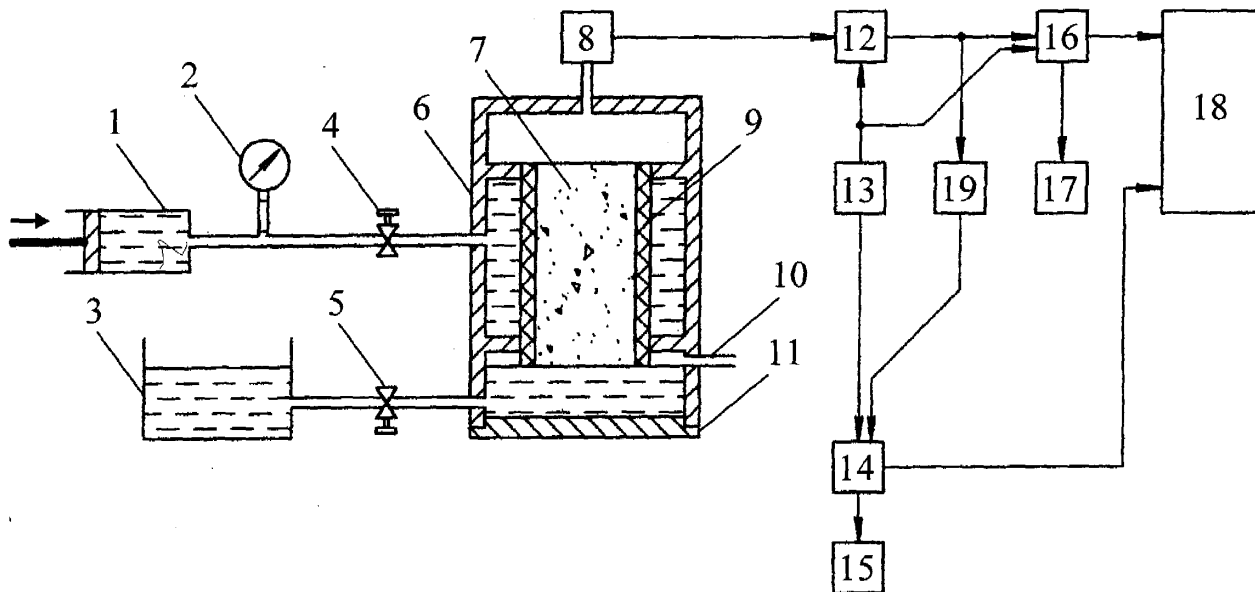


Рис. 4.5. Структурна схема приладу для контролю змочуваності пористих тіл

1 – насос; 2 – манометр; 3 – резервуар; 4 – кран подачі обтискууючої рідини; 5 – кран подачі досліджуваної рідини; 6 – вимірювальна камера; 7 – пористе тіло (кern); 8 – давач тиску; 9 – гумова манжета; 10 – трубка стоку; 11 – пробка; 12 – підсилювач; 13 – блок живлення; 14 – вимірювач часу; 15 – табло часу; 16 – аналого-цифровий перетворювач; 17 – табло тиску; 18 – ПЕОМ; 19 – компаратор

спрацювання компаратора 19, який запускає блок вимірювання часу 14. Біжучі значення тиску над керном та часу висвічуються на табло відповідних тиску 17 і часу 15, що створює додаткові зручності для оператора в процесі контролю.

В процесі контролю комп'ютер згідно розробленого відповідного програмного забезпечення через визначені проміжки часу запам'ятовує біжучі значення тиску  $P$ , визначає різницю значень тисків між вказаними термінами часу, тобто визначає швидкість зміни тиску і постійно підраховує величину змочування за виразом (3.41).

Процес контролю припиняється при закінченні підйому рідини в керні, тобто при досягненні усталеного значення тиску  $P$ .

~

#### **4.4. Особливості технічної реалізації розроблених засобів запропонованих методів контролю крайового кута змочування**

##### **4.4.1. Розроблення пневматичної схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування і її характерні особливості**

Пневматична схема приладу ВКЗ-1 повинна забезпечувати стабільний процес утворення газових капілярних містків між нижнім торцем вимірювального каліброваного капіляру та поверхнею досліджуваного твердого тіла незалежно як від матеріалу останнього, так і від виду досліджуваної рідини. Причому пневматична система повинна давати можливість регулювати динаміку процесу утворення капілярних містків та контролювати зміну параметрів вимірювального тракту в процесі вимірювання.

Пневматична схема приладу ВКЗ-1 також повинна забезпечувати необхідну витрату газу, яким може бути атмосферне повітря, для утворення газових містків у рідині між капіляром і поверхнею зразка. Подача повітря у вимірювальний калібрований капіляр повинна здійснюватись під заданим тиском без пульсацій, причому величина цього тиску повинна регулюватись

у потрібних межах, оскільки залежно від параметрів досліджуваних систем «рідина-тверде тіло-газ» та геометричних параметрів каліброваного капіляру максимальний тиск всередині газового мостика може змінюватися в широких межах. Крім того пневматична схема повинна давати можливість оперативно контролювати величину тиску у каліброваному капілярі в процесі вимірювання, в зв'язку з можливою необхідністю враховувати невідповідність аналогового електричного сигналу вимірюваному тиску із-за зміщення нуля та зміни коефіцієнта перетворення давача тиску і коефіцієнта підсилення підсилювача постійного струму в процесі роботи.

Складові частини пневматичної схеми приладу ВКЗ-1 повинні бути малогабаритні, оскільки вони входять у прилад для настільного розміщення. Виходячи із вищесказаного, пневматична схема повинна мати наступні основні вузли (рис. 4.6): джерело подачі повітря 1, стабілізатор тиску 2, регулятор вихідного тиску 3, пневматичний комутатор 4, призначений для переведення приладу з режиму підготовки та контролю в робочий режим і навпаки, вимірювальний капіляр 5 і давач тиску 6.

Вимоги до кожного із вказаних вузлів визначаються, виходячи із величини максимального тиску, який повинен досягатись при утворенні газових містків з каліброваного капіляра. Як було визначено в розділі 2 максимальний тиск залежить від внутрішнього радіуса капіляра, віддалі від нижнього торця капіляра до поверхні досліджуваного зразка і від капілярної сталої досліджуваної рідини.

Детальніше функціональна схема пневматичної схеми приладу ВКЗ-1 показана на рис. 4.6.

Джерелом подачі повітря служить вібраційний мікрокомпресор типу АЄН-4, характеристики та габарити якого цілком задовільняють умови його використання у приладі ВКЗ-1. Обидва канали мікрокомпресора з'єднані між собою паралельно.

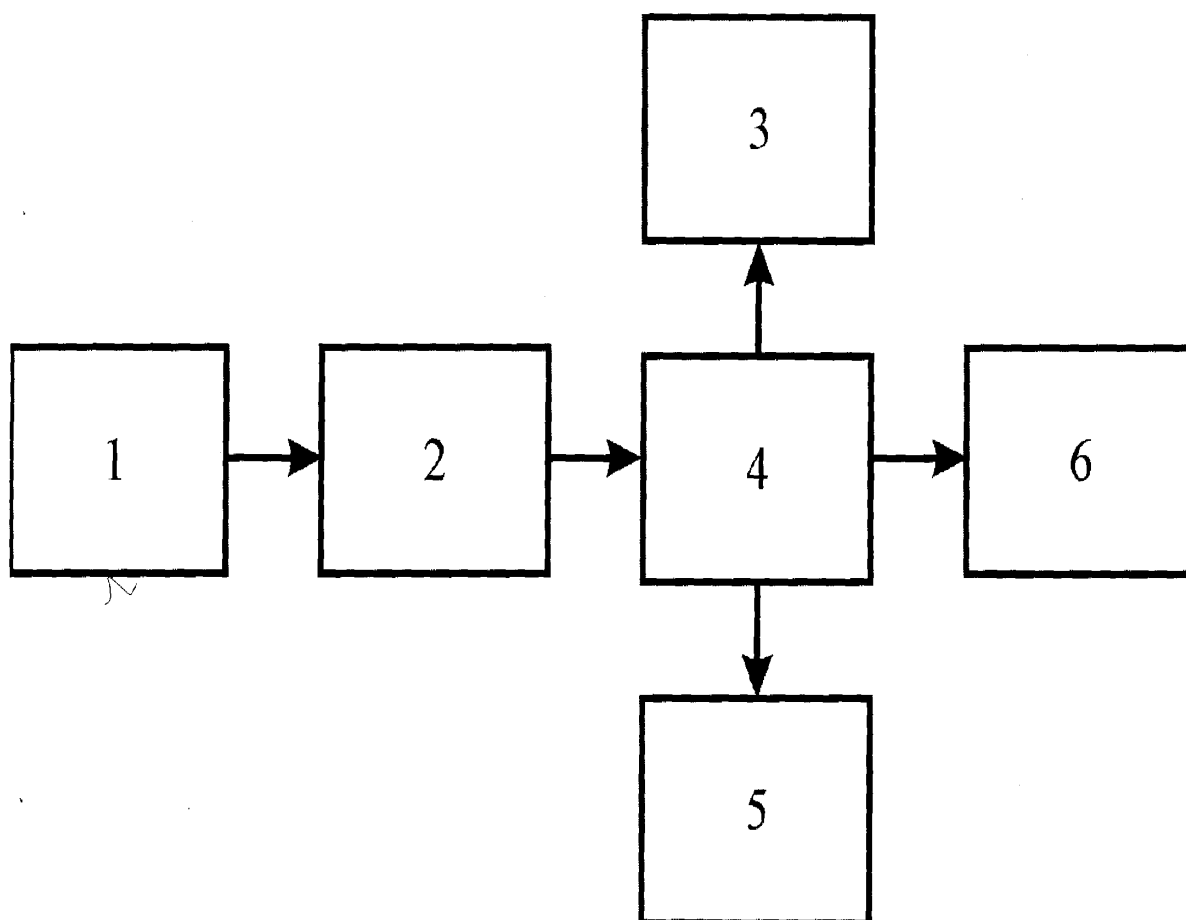


Рис 4.6. – Структурна схема пневматичної частини приладу ВКЗ-1

*1 – джерело подачі повітря; 2 – стабілізатор тиску; 3 – регулятор вхідного тиску; 4 – пневматичний комутатор; 5 – вимірювальний капіляр; 6 – давач тиску*

Для усунення впливу вібрацій мікрокомпресора в процесі роботи він підвищується всередині корпусу приладу на амортизаторах.

Для згладжування пульсацій тиску використовуються Г-подібні фільтри з постійним пневмодроселем та пневмоємності Др1-V1 і Т-подібні фільтри Др-2-V2-Др3 на вході і на виході пневмостабілізатора 5 відповідно. В приладі використовуються серійні постійні пневмодроселі типу П 1001 системи УСЕППА. Серійні пневмоємності не задовольняють вимог щодо згладжування пульсацій тиску, тому були розроблені спеціальні пневмоємності з пружною гумовою мембраною товщиною стінки 0,1 мм, які надійно виконують свої функції.

Як показали експериментальні дослідження, для створення необхідного стабілізованого робочого тиску, який подається у калібрований капіляр та у давач тиску в режимі перевірки контрольної точки по тиску у приладі ВКЗ-1 використовується спеціально розроблений пневматичний стабілізатор тиску без системи автоматичної стабілізації, який має два основні елементи: постійний пневмодросель П1001 системи УСЕППА, який відіграє роль баластного пневматичного опору та поплавковий задавач тиску. Вихідний потік повітря з стабілізованим тиском знімається з точки з'єднання баластного дроселя та задавача тиску.

Баластним дроселем служить пневмодросель П1001 системи УСЕППА.

Конструктивно поплашковий стабілізатор складається із дюралієвого корпусу 1 з вхідним і вихідним отворами у днищі, зверху якого щільно посаджено сталеву втулку 2 з обробленими з високим класом точності і чистоти верхньою та внутрішньою поверхнями таким чином, щоб кромка верхнього краю отвору не була овальною і не мала шорсткості (рис. 4.8). Поплавок 3 повинен мати високу точність і чистоту конічної поверхні, яка сідає на втулку. Вага поплавка і площа вихідного отвору, на якому він знаходиться, визначає величину тиску стабілізації, яка здійснюється за рахунок виходу частини потоку повітря через кільцевий зазор між краєм втулки 2 і конічною поверхнею поплавка 3, коли поплавок піднімається силою тиску поступаючого потоку повітря над краєм втулки. Вагу поплавка

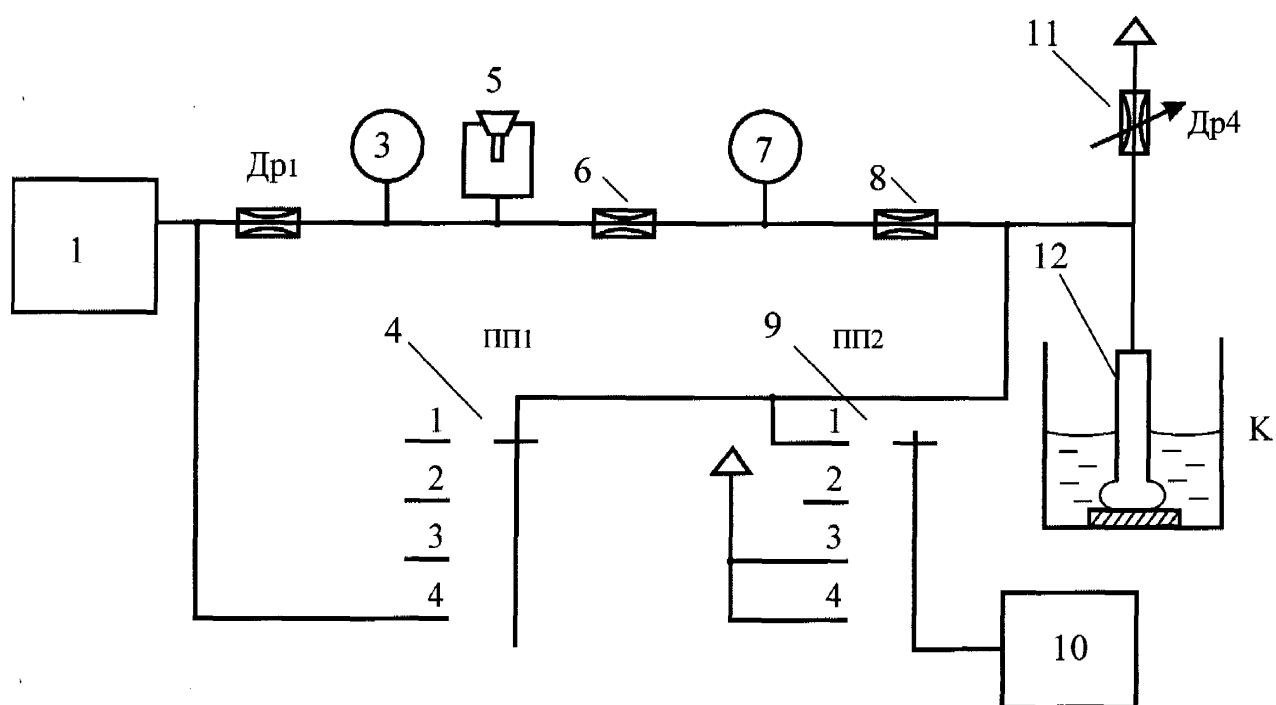


Рис. 4.7. Функціональна схема пневматичної схеми приладу ВКЗ-1

1 – джерело пневматичного живлення; 2, 6, 8 – постійні пневмодроселі;  
 3, 7 – пневмоємності; 4, 9 – спарені пневмоперемикачі; 10 – давач тиску;  
 11 – регульований пневмодросель; 12 – калібрований капіляр

можна змінювати, заповнюючи свинцевим дробом, його внутрішню порожнину, яка закривається гвинтом 5. Таким чином можна регулювати величину стабілізованого тиску. Хомут 4 служить для попередження випадання поплавка при транспортуванні і роботі приладу ВКЗ-1. Режим стабілізації підтримується у великому діапазоні зміни витрати повітря на виході стабілізатора (0,2-0,5 л/с) і зміни вихідного тиску ( $2 \div 5$  кПа). Середню точку діапазону встановлюється величиною пневматичного опору баластного дроселя для забезпечення потрібної величини стабілізованого тиску. Це можна зробити один раз експериментально з використанням ротаметра, який буде вказувати межі діапазону зміни витрати повітря, при якому має місце режим стабілізації і таким чином визначити величину пневматичного опору баластного дроселя для середини діапазону стабілізації.

Вихід Т-фільтру з'єднаний з пневмоперемикачем ГПП1.1 (поз. 4, рис. 4.6), пневмоперемикачем ГПП 1.2 (поз. 9) та напівпровідниковим датчиком тиску ДТ (поз. 10), із змінним дроселем Др4 (поз. 11) та робочим вимірювальним капіляром К (поз. 12, рис. 4.6), який занурений в рідину на визначену глибину. Вихід дроселя Др4 з'єднаний з атмосферою. Регулюючи його перекриття, тобто його пневматичний опір, змінюють величину тиску всередині капіляра, а, значить, і в пухирцях необхідно видути, в рідину з капіляра К. Елементом ДРУ служить модифікований багатообертовий дросель, виготовлений на основі серійного змінного дроселя П-1016 М.

Пневмокомутатори ГПП 1.1 і ГПП 1.2 служать для комутації давача тиску ДТ з капіляром К в робочому режимі видування пухирців, тобто в режимі вимірювання тиску в газовому містку, а також для подачі контрольних тисків і, таким чином, перевірки приладу ВКЗ-1 і коригування його статичної характеристики. Характерною особливістю пневмоперемикача є те, що він повинен мати малий перехідний пневмоопір між комутованими елементами, щоб не вносити спотворення при вимірюванні тиску. В положенні 1 комутатора ГПП 1.2 подається тиск з схеми, яка створюється з'єднанням вихідного дроселя Др3 згладжуючого пневмофільтра, змінного дроселя Др4



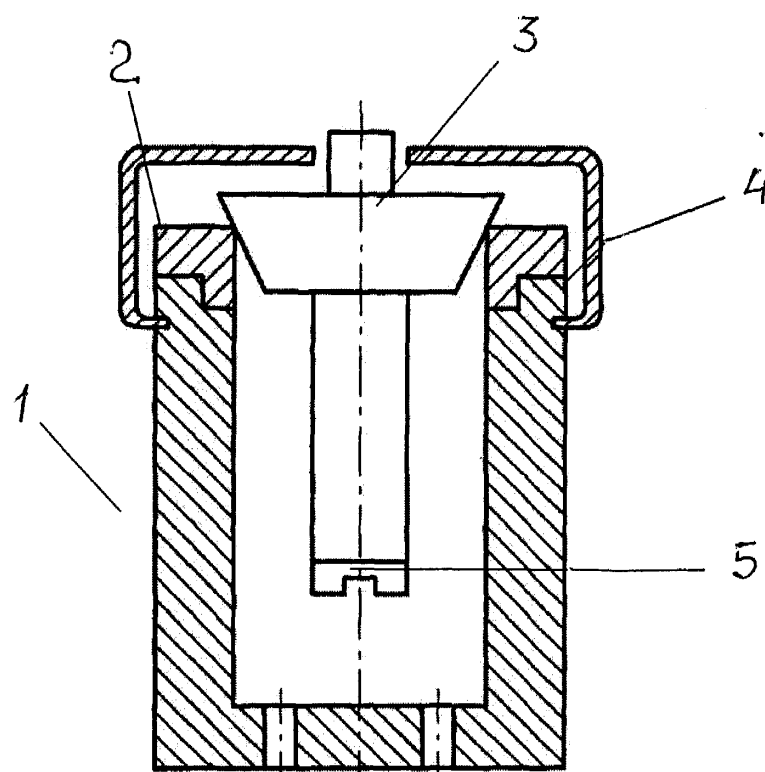


Рис.4.8. Поплавковый пневмостабилизатор

1 — корпус; 2 — втулка; 3 — поплавок; 4 — хомут; 5 — гвинт

регулювання тиску в капілярі та порожнини каналу вимірювального капіляра К разом з утворюваним капілярним газовим містком. В цьому випадку буде мати місце режим вимірювання ККЗ.

В положенні 2 пневмоперемикача ПП1.2 на давач тиску ДТ подається стабілізований тиск з пневмостабілізатора ПС-1 для контролю роботи електричної схеми приладу ВКЗ-1.

Для контролю термостабільності давача тиску і підсилювача електричного сигналу давач тиску в положенні 3 і 4 з'єднується з атмосферою.

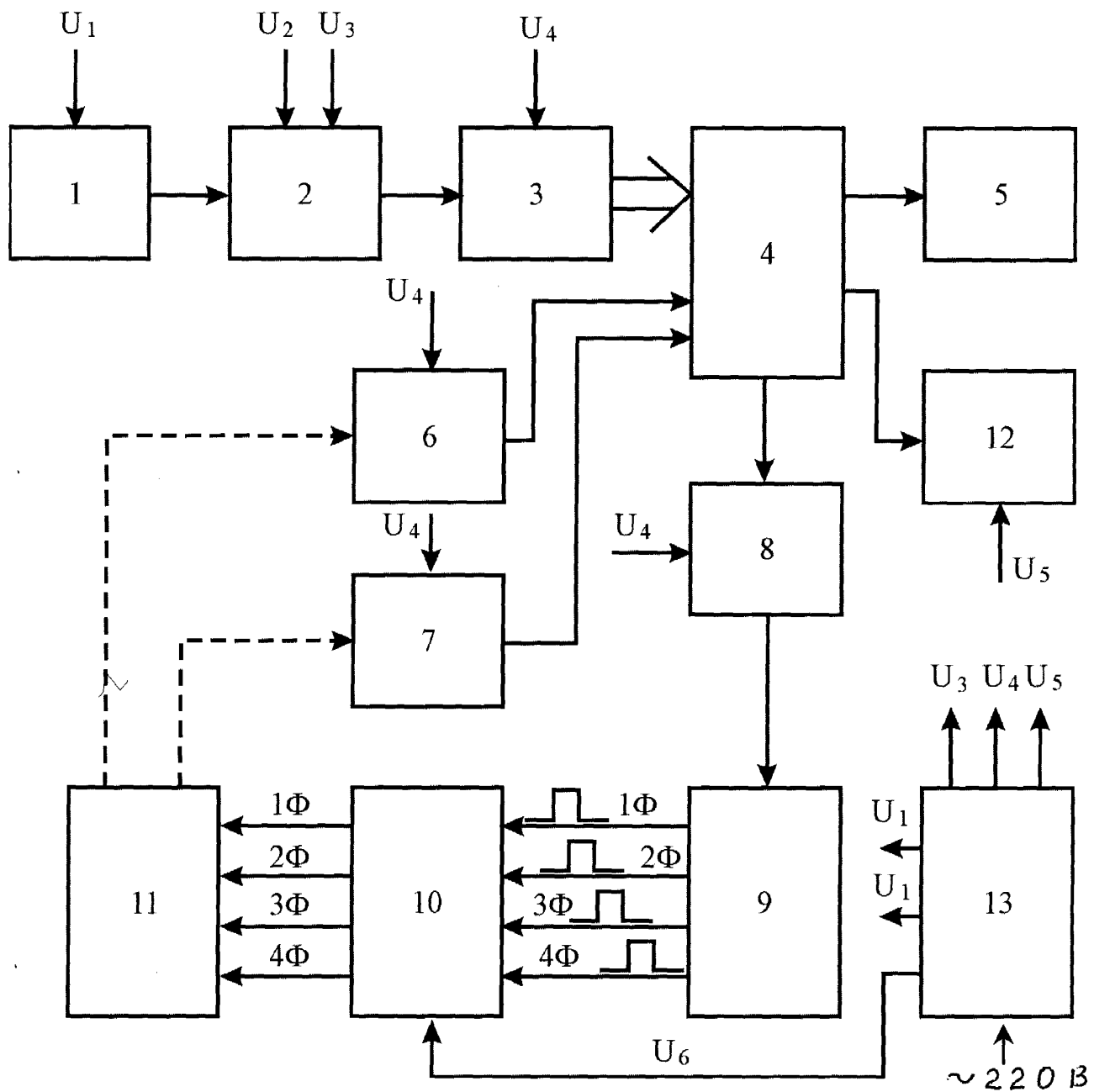
В положенні 4 капіляр К безпосередньо, з'єднується з виходом мікрокомпресора, що необхідно для видування залишків рідини з вимірювального капіляра в режимі підготовки до вимірювання ККЗ.

Конструктивно елементи пневмосхеми Др1, V1, Др2, ПС-1, Др2, V2, Др3 розміщені на пневмоплаті, виготовленій з органічного скла, яка має канали для з'єднання цих елементів між собою згідно пневматичної схеми (рис.4.6). Інші елементи пневмосхеми приладу ВКЗ-1 з'єднані між собою хлорвініловими трубками.

#### 4.4.2. Розроблення електричної схеми приладу ВКЗ-1 для вимірювання крайового кута змочування і її характерні особливості

Функціональна схема електричної схеми приладу ВКЗ-1 приведена на рис. 4.9.

Електрична схема приладу ВКЗ-1 повинна забезпечувати отримання електричного сигналу, пропорційного величині тиску в робочому об'ємі вимірювального капіляра, перетворення цього сигналу у цифровий код для подачі його на вхід персональному комп'ютеру з метою подальшої математичної обробки і для підсилення керуючих сигналів від комп'ютера у блоці переміщення, який приводить в дію механізм підймання столика, на якому встановлюється посудина з досліджуваною системою «рідина-тверде тіло-газ».



1 – давач тиску; 2 – підсилювач МДМ; 3 – АЦП; 4 – ПЕОМ; 5 – дисплей;  
 6, 7 – кінцеві вимикачі; 8 – узгоджуючий блок; 9 – чотирифазовий комутатор; 10 – блок силових ключів; 11 – кроковий двигун;  
 12 – пневмокомутатор; 13 – блок живлення

Рис. 4.9 Функціональна схема електричної частини приладу ВК3-1

Для цього в електричній схемі приладу ВКЗ-1 повинен бути підсилювач постійного струму 2, для підсилення сигналу від напівпровідникового тензорезисторного давача тиску 1 до величини, необхідної для надійної роботи аналого-цифрового перетворювача 3.

Підсилювач 2 повинен мати незначний тепловий дрейф нульового сигналу і стабільний коефіцієнт підсилення. Для цієї мети було вибрано підсилювач постійного струму на операційних інтегральних підсилювачах, побудований за схемою “модуляції-демодуляції” (МДМ).

У такому підсилювачі електричний сигнал від давача тиску 1 у першому каскаді на базі мікросхеми 140УД13 модулюється у змінний струм. Другий каскад підсилювача 2 побудовано за схемою підсилювача змінного струму і виконує роль демодулятора підсиленого сигналу та згладження його на активному інтеграторі.

Аналого-цифровий перетворювач 4 перетворює підсилений електричний сигнал у паралельний код, який подається на вхідний порт ПЕОМ, 4.

З вихідного порту ПЕОМ, 4 сигнали керування подаються у блок узгодження 8, де вони підсилюються і подаються на вхід чотирифазового комутатора 9, який послідовно в часі розподіляє вхідні імпульси на 4 виходи (фази). Ці чотири фази керують силовими ключами 10, які у свою чергу по чергові під'єднують до блока живлення 10 обмотки крокового двигуна 11. Зміна напрямку обертання крокового двигуна 11 здійснюється за допомогою ПЕОМ шляхом зміни черговості подачі імпульсів із чотирифазового комутатора 9 (“1-2-3-4” або “4-3-2-1”).

Для уникнення поломки механізму переміщення, капіляра і виходу з ладу електронних блоків передбачено кінцеві вимикачі 6 і 7 для крайніх верхнього та нижнього положень підйомного столика відповідно.

4.4.3. Опис конструкції і методики визначення крайового кута змочування за допомогою приладу ВКЗ-1 методом максимального тиску в газовому пухирці

З урахуванням вищенаведених в п. 4.4.1 і п. 4.4.2 розроблених пневматичної і електричної схем розроблена конструкція і виготовлений прилад ВКЗ-1 для контролю ККЗ рідинами поверхонь твердих монолітних тіл (рис. 4.10), який складається безпосередньо із приладу ВКЗ-1, (поз. 1) і персонального комп'ютера, монітора і клавіатури для введення необхідних даних і керування процесом вимірювання.

На передній панелі приладу ВКЗ-1 (рис. 4.11) встановлені необхідні кнопки та комутаційні елементи, а саме: тумблер для включення приладу ВКЗ-1 взагалі; тумблер для включення мікрокомпресора для живлення пневматичної схеми приладу ВКЗ-1; цифрове табло для представлення результатів вимірювання поверхневого натягу досліджуваної рідини і максимального тиску при визначенні ККЗ; цифрове табло для реєстрації часу між двома послідовними утвореннями газових (повітряних) пухирців; кнопка для оновлення показів на обидвох цифрових табло приладу ВКЗ-1; індикатор для індикації утворення газового пухирця; табличка із значеннями контрольних точок початку і кінця шкали приладу; пневмоперемикач для вибору режиму роботи приладу ВКЗ-1, ручка режиму утворення газових пухирців із каліброваного капіляра у досліджуваній рідині.

Крім цього прилад ВКЗ-1 ще додатково в інших місцях має індикатор горизонтального положення, ручки для підйому столика із досліджуваною рідиною і для підйому нижнього торця капіляру на задану висоту над досліджуваною поверхнею твердого тіла, яке попередньо повинно бути розміщеним на дні посудини із досліджуваною рідиною, яка повинна бути у свою чергу встановлена у термостатуючу оболонку, вузол каліброваного по внутрішньому радіусу ножового капіляра. Вказаний вузол повинен жорстко механічно бути з'єднаним із відповідною вищевказаною ручкою на лівій боковій стінці приладу ВКЗ-1. Прилад ВКЗ-1 повинен мати можливість встановлення строго горизонтального положення за допомогою регульованих

по висоті ніжок і індикатора горизонтального положення.

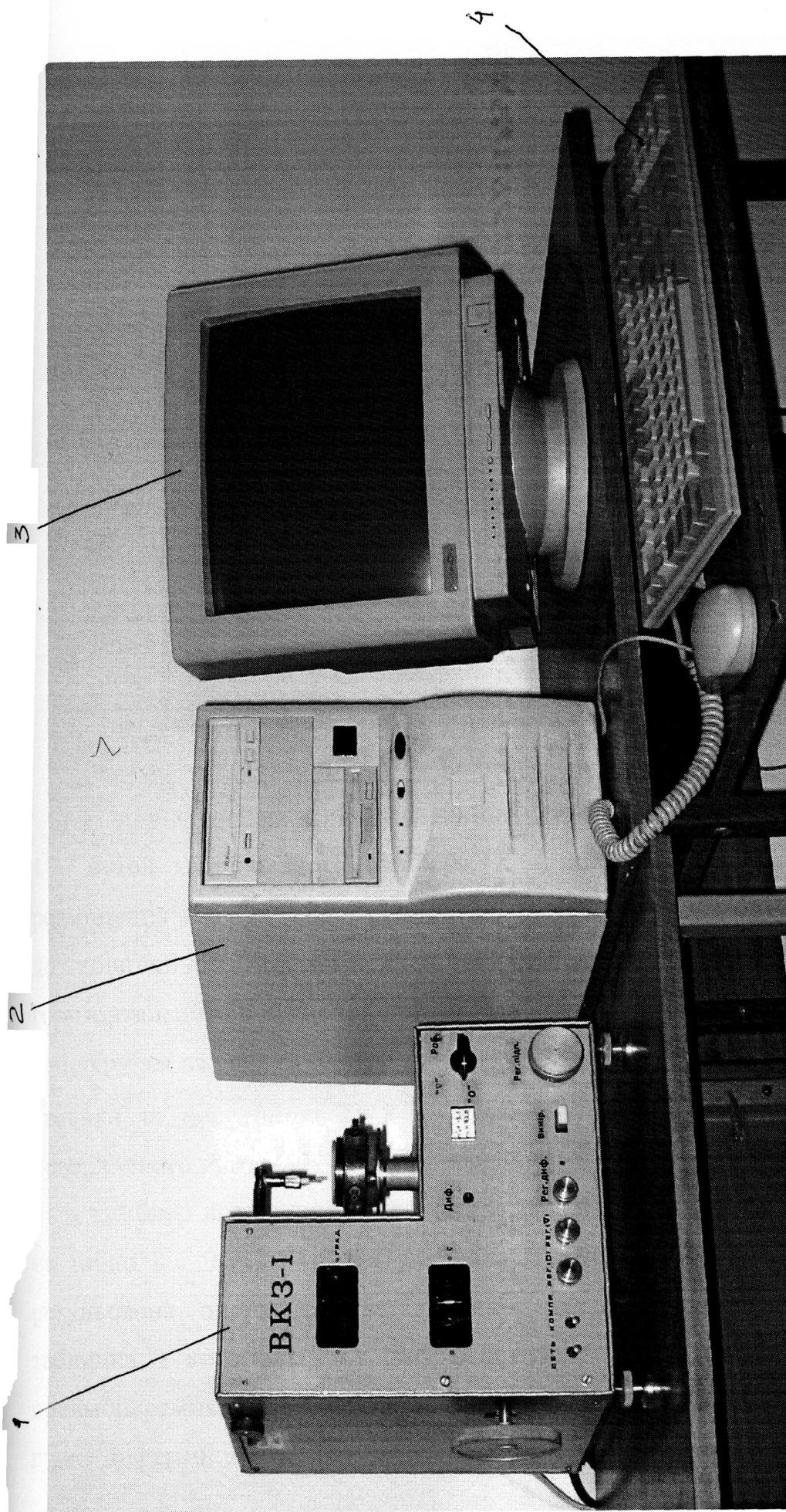
На задній стінці приладу ВКЗ-1 повинні бути розміщені роз'єми для з'єднання із персональним комп'ютером, в якому розміщений відповідний АЦП, пневматичні штуцери для проведення калібрування і повірки приладу, а також штуцер для подачі у пневматичну схему іншого газу (крім повітря) у випадку необхідності визначення ККЗ у іншому газовому середовищі.

Процес визначення значення ККЗ приладом ВКЗ-1 полягає у наступному.

У персональний комп'ютер 2 (рис. 4.10) вводять спеціально розроблене програмне забезпечення для розрахунку значення ККЗ методом максимального тиску у газовому пухирці, включають прилад ВКЗ-1 для прогрівання протягом 20-ти хвилин. При цьому попередньо очищений ножовий капіляр повинен бути встановлений у вузол 1, у посудину 2 повинна бути встановлена чашка із досліджуваним твердим тілом і досліджуваною рідиною, наливою до певної мітки. Після цього посудина 2 встановлюється на підйомному столику 4, який повинен бути опущений за допомогою ручки 7 у крайнє нижнє положення. За допомогою ручки 6 вузол каліброваного капіляру 1 разом із встановленим капіляром повинен бути піднятий у крайнє верхнє положення. Слід відмітити, що за допомогою ручки 6 можна встановити тільки два положення нижнього торця каліброваного капіляру, а саме: верхнє, при якому торець на  $0,5r_{\text{вн}}$  буде вище від нижнього крайнього положення.

За допомогою двох регульованих ніжок 14 і індикатора 5 встановлюють строге горизонтальне положення приладу ВКЗ-1, а до штуцерів 3 під'єднують зовнішній термостат (на рис. 4.10 і 4.11 зовнішній термостат не показаний), який призначений для проведення досліджень при різних температурах досліджуваної рідини, що змочує монолітне тверде досліджуване тіло. Прилад ВКЗ-1 повинен бути через відповідний електричний кабель під'єднаний до персонального комп'ютера.

Протягом часу прогрівання приладу ВКЗ-1 кнопки і інші комутаційні



ис. 4.10 Загальний вигляд приладу ВКЗ-1 в комплекті із персональним комп'ютером для проведення контролю ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску у газовому пухирці

1 – прилад ВКЗ-1; 2 – персональний комп'ютер; 3 – монітор; 4 – клавіатура





Рис. 4.11. Загальний вигляд приладу ВКЗ-1

1 – вузол каліброваного капіляра; 2 – посудина для термостатування і розміщення досліджуваної рідини; 3 – штуцери для під'єднання посудини 2 до зовнішнього термостата; 4 – підйомний столик; 5 – індикатор горизонтального положення приладу; 6 – ручка для підняття нижнього торця капіляру на задану глибину ( $z = 0,5r_{\text{вн}}$ ); 7 – ручка для підняття підйомного столика із посудиною 2; 8 – цифрове табло результатів вимірювання поверхневого натягу; 9 – таймер цифровий; 10 – тумблер включення приладу; 11 – тумблер включення мікрокомпресора; 16 – кнопка оновлення показів на табло 8 і 9; 12 – ручка для налаштування нуля шкали приладу; 17 – регульована опора для встановлення горизонтальності приладу; 19 – табличка з контрольними цифрами нуля і кінця шкали приладу; 20 – пневмоперемикач; 18 – ручка для налаштування кінця шкали приладу; 15 – ручка диференціатора; 18 – ручка режиму утворення газових пухирців.



органи на передній панелі повинні бути у таких положеннях: тумблер 10 включеним, тумблер 11 виключеним, кнопка 12 у положенні настроювання нуля і кінця шкали приладу. При цьому таймер 9 (покази від 1 с до 9999 с) не повинен бути запущеним, а пневмоперемикач 16 повинен бути у положенні 1, яке відповідає режиму підстроювання нуля шкали приладу. Індикатор 13 шляхом підстроювання ручкою диференціатора 19 не повинен бути включеним.

Після 20-ти хвилинного прогрівання приладу ВКЗ-1, що необхідно для прогріву електронної схеми приладу і його напівпровідникового давача тиску, за допомогою ручки 17, табло 8 і вказаної інформації на табличці 15 налаштовують початок шкали приладу ВКЗ-1 (наприклад:  $-4,7$  мН/м). Після цього пневмоперемикач 16 переводять у положення 2, яке відповідає режиму підстроювання кінця шкали приладу (наприклад:  $107,5$  мН/м), включають за допомогою тумблера 11 мікрокомпресор приладу і за допомогою ручки 18, табло 8 і показів на табличці 15 налаштовують кінець шкали приладу. Після цього тумблером 11 виникають мікрокомпресор, а пневмоперемикач 16 переводять у положення 3, яке відповідає робочому режимові приладу ВКЗ-1.

Вимірювання поверхневого натягу приладом ВКЗ-1 проводять таким чином. За допомогою ручки 7 посудину 2 до торкання нижнього торця капіляру із поверхнею досліджуваної рідини. Момент торкання фіксують візуально вручну. Після цього опускають капіляр у рідину на 2 мм (відлік здійснюється за допомогою лімба на ручці 7), кнопку 12 переводять у режим вимірювання поверхневого натягу, включають тумблером 11 мікрокомпресор і за допомогою ручки 20 встановлюють режим утворення газових пухирців із каліброваного капіляра. При цьому на табло 8 буде вказано значення поверхневого натягу (наприклад:  $72,5$  мН/м), таймер 9 буде реєструвати час між двома послідовно утвореними газовими пухирцями (наприклад: 0005 с), а на вхід комп'ютера будуть подані відповідні електричні сигнали для подальшої обробки. При цьому слід зауважити, що кожне оновлення отриманих результатів вимірювання поверхневого натягу здійснюють за

допомогою кнопки 12. Після цього переходять до визначення значення ККЗ приладом ВКЗ-1. Для цього тумблером 11 виключають мікрокомпресор, опускають ручку 6 у крайнє нижнє положення, після цього піднімають столик ручкою 7 до торкання нижнього торця капіляру із поверхнею твердого тіла і в цей момент за допомогою ручки 6 піднімають капіляр на висоту  $0,5r_{\text{вн}}$ .

Переводять кнопку 12 у положення визначення ККЗ і включають тумблером 11 мікрокомпресор. В результаті із каліброваного капіляра утвориться газовий пухирець, який перетвориться у газовий мостик, після чого, внаслідок наростання тиску, що досягається ручкою 20, утвориться газовий пухирець, який впливе на поверхню рідини, а індикатор 13 при цьому короткочасно (не більше 0,2 с) спалахне, інформуючи тим самим оператора про утворення газового пухирця. На табло 8 буде представлено значення максимального тиску, а на табло 9 – час між двома послідовними утвореними газовими пухирцями. Крім цього ця інформація за допомогою кнопки 12<sup>^</sup> буде передана на вхід персонального комп'ютера, якому також через його клавіатуру необхідно попередньо ввести: значення густини рідини і газу; значення радіусу каліброваного капіляру; значення  $0,5r_{\text{вн}}$ ; значення глибини занурення капіляру у рідину (на основі показів лімба ручки 7); значення температури досліджуваної рідини (на основі показів термометра термостата); значення, що відповідають нулю і кінцю шкали приладу ВКЗ-1 згідно інформації на табличці 15.

На основі виміряних і введених значень здійснюється шляхом введення відповідної команди через клавіатуру комп'ютера розрахунок значень ККЗ, яке разом із іншою інформацією виводиться на екран комп'ютера розрахунок значення ККЗ, яке разом із іншою інформацією виводиться на монітор комп'ютера і роздруковується у вигляді протоколу проведених досліджень.

Після закінчення відповідних досліджень за допомогою ручки 7 опускають столик 2 у крайнє нижнє положення, перемикач 16 встановлюють у положення 4, що відповідає режиму продувки капіляра, виключають мікро

компресор, виключають прилад ВКЗ-1 і готують його до проведення наступних досліджень щодо визначення ККЗ.

#### 4.4.4. Особливості технічної реалізації приладу для визначення крайового кута змочування поверхонь твердих монолітних тіл та визначення ККЗ оптичними методами

Основними вимогами до конструкції приладу, що реалізуватиме одночасно обидва оптичні методи визначення ККЗ, є такі.

Розроблений оптоелектронний прилад для контролю ККЗ поверхонь твердих монолітних тіл повинен бути придатним для визначення ККЗ як за методами, розробленими в п.п. 2.4, так і в п.п. 2.5. Така конструкція приладу повинна дозволяти одержувати контрастне зображення краплі на моніторі персонального комп'ютера. Причому зображення краплі на моніторі повинно бути таких розмірів, щоб було більшим половини площі екрану монітора, що забезпечуватиме достатню точність визначення ККЗ.

Для забезпечення цих вимог система освітлення краплі повинна дозволяти проведення контролю змочування твердих тіл як прозорими, так і непрозорими рідинами (краплями).

Для непрозорих рідин необхідно використовувати освітлення краплі за схемою „на просвіт”. Для усунення аберацій в оптичних елементах освітлення слід здійснювати монохроматичним світлом. З цією метою слід використовувати світлофільтри, які необхідно вибирати з урахуванням того, що колір рідини і колір світлофільтра повинні знаходитися в різних ділянках спектра, наприклад, для крапель червоного пенетранту слід ставити синій світлофільтр.

Для прозорих рідин така схема освітлення не є придатною, тому що зображення краплі буде в цьому випадку неконтрастним з яскравою світлою плямою посередині, що погано буде піддаватися обробці. Тому для прозорих рідин доцільно використовувати таку схему освітлення, при якій пучок променів із освітлювача буде направлений під кутом на білий

(недзеркальний) екран, на фоні якого буде отримуватися зображення краплі.

При цьому освітлювач повинен живитись від регульованого блока живлення з метою регулювання яскравості світла.

Для того, щоб середина краплі попадала в центр екрану монітора, необхідно встановити досліджуваний зразок твердого тіла на столик, який за допомогою механізмів переміщення повинен переміщуватися горизонтально та вертикально відносно оптичної осі приладу. Механізм переміщення повинен забезпечувати плавність і відповідну точність переміщення столика без його вібрації, яка може приводити до зміщення, розтікання краплі на поверхні досліджуваного твердого тіла. Переміщення столика повинно відбуватися строго у вертикальній або горизонтальній площинах перпендикулярно до оптичної осі, яка у свою чергу повинна проходити через вертикальну вісь краплі та центр вхідного отвору телекамери.

Оскільки при використанні оптичного методу контролю змочуваності визначається ККЗ тільки в одному меридіанному перерізі краплі, а в інших меридіанних перерізах ККЗ можуть бути інші із-за різного роду неоднорідностей поверхні твердого тіла, то для узагальненої оцінки ККЗ по периметру основи всієї краплі треба проводити визначення ККЗ в різних меридіанних перерізах. Для цього предметний столик повинен бути поворотним. Поворот столика при цьому повинен контролюватися за допомогою кутової шкали.

З урахуванням вказаних вимог розроблений прилад ВКЗО-1, загальний вигляд якого приведений на рис. 4.1. Основними блоками, вузлами і елементами приладу ВКЗО-1 є: основа приладу, яка у процесі проведення вимірювання ККЗ повинна бути строго горизонтальною і встановлюватися на таких стендах і етапах, де повинні бути відсутні вібрації; електромеханічний блок, в якому одночасно є електричні блоки для забезпечення відповідного освітлення краплі і механічні вузли для переміщення столика із взірцем твердого тіла з нанесеною краплею на його поверхню як вертикально вверх чи вниз, так і горизонтально вліво чи вправо; освітлювач лежачої краплі,

який закріплений до електромеханічного блоку і положення якого регулюється з подальшою фіксацією цього положення; кронштейн із телекамерою, до якої прикріплений об'єктив із відповідною насадкою. При цьому телекамера може переміщуватися вертикально вгору чи вниз, з подальшою фіксацією вибраного положення.

Обробка зображення лежачої краплі, отриманого в телекамері, здійснюється за допомогою персонального комп'ютера, який на рис. 4.12 не показаний.

Принцип роботи приладу ВКЗО-1 при визначенні ним ККЗ одним із оптичних методів, що описані в розділі 2, полягає в наступному.

На столик 11 встановлюють зразки підготовленого попередньо твердого тіла 12, на верхню поверхню якого наносять за допомогою дозатора краплю 13 досліджуваної рідини. За допомогою регулюючих ніжок 3 і індикатора 2 встановлюють строго горизонтальне положення приладу ВКЗО-1. За допомогою тумблера 17 включають відповідне освітлення 5 краплі. Включають персональний комп'ютер і запускають розроблену програму для обробки зображення краплі на мішені телекамери 8. За допомогою ручок 15, 16 і 9 досягають відповідних контрастного зображення краплі на екрані монітора, розмірів зображення і необхідного положення столика 11 і телекамери 8. За допомогою клавіатури персонального комп'ютера вводять необхідні дані (різниця густин рідини і навколишнього повітря, температуру навколишнього середовища, значення поверхневого натягу на межі контакту рідини у краплі і навколишнє повітря), фіксують зображення краплі в оперативній пам'яті комп'ютера і запускають програму на обробку цього зображення за вибраною методикою. Після цього за допомогою ручки, яка на рис. 4.9 не показана і знаходиться на заданій стінці електромеханічного блоку 4, повертають столик 11 на  $90^\circ$  і повторюють фіксацію зображення краплі в оперативній пам'яті комп'ютера і його обробку. Аналогічні процедури проводять при ще двох наступних поворотах столика 11 на  $90^\circ$ .

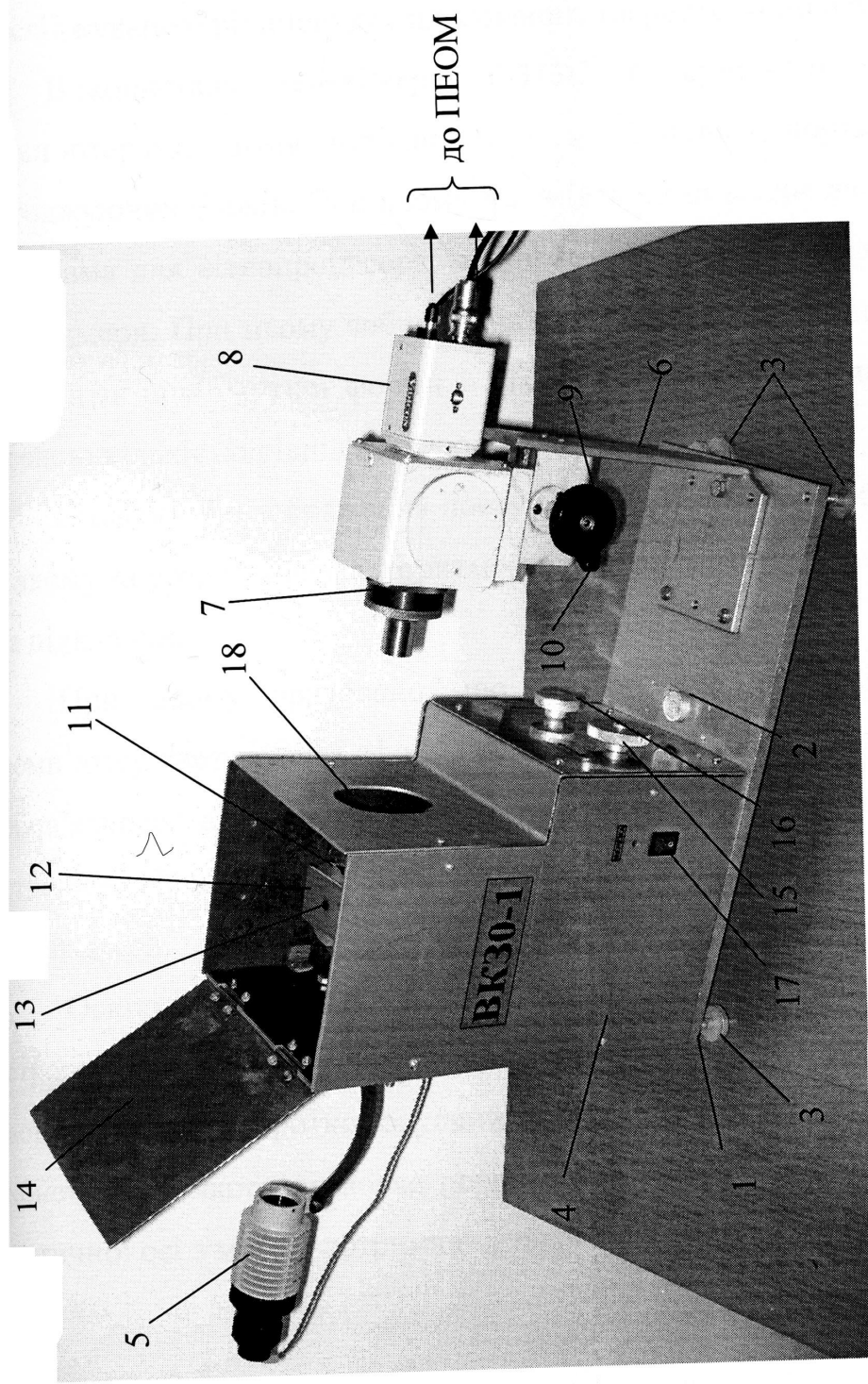


Рис. 4.12. Загальний вигляд приладу ВК30-1 для визначення ККЗ оптичним методом

1 – основа; 2 – індикатор горизонтального положення; 3 – регулюючі ніжки; 4 – електроомеханічний блок; 5 – освітлювач краплі; 6 – кронштейн; 7 – об’єктив з насадкою; 8 – телекамера; 9 – ручка горизонтального переміщення; 10 – фіксатор; 11 – столик; 12 – зразок твердого монокристалічного тіла; 13 – крапля досліджуваної рідини; 14 – кромка; 15 – ручка горизонтального переміщення столика 11; 16 – ручка вертикального переміщення столика 11; 17 – тумблер включення приладу; 18 – отвір для проходження променів світла на об’єктив

В результаті отримують значення ККЗ для кожного положення столика, або їх потім усереднюють і отримують середнє значення кута змочування досліджуваною рідиною досліджуваного твердого монолітного тіла.

Використана телекамера Т-313С є сумісною з персональними комп'ютерами, тому під'єднується до вхідного порта комп'ютера без узгоджуючих блоків. При цьому в пам'ять комп'ютера вводиться спеціальна програма для відеопроцесора, в якому відбувається оцифрування сигналу з телекамери. При цьому зображення буде складатись із множини дискретних елементів прямокутної форми – пікселів. Кожний піксель характеризується певною кількістю рівнів яскравості.

Оцифроване зображення поступає в центральний процесор комп'ютера, в якому за розробленим алгоритмом здійснюється обробка зображення краплі та підкладки.

При цьому враховано, що використана телекамера передає на комп'ютер картину, яка сформована в площині її фотомішені. Тобто потрібно обов'язково використовувати в комплекті телекамерою об'єктив, який створить дійсне зображення профілю краплі на підкладці в площині мішені телекамери.

Оскільки нереально завжди встановлювати краплю на підкладці на строго визначеній віддалі  $X_k$  від об'єктива, то потрібно на телекамеру встановлювати короткофокусний об'єктив з фокусною віддалю  $f = 15$  мм, конструкція якого дозволяє переміщувати його в невеликих межах вздовж оптичної осі з метою дотримання такого рівняння лінзи (рис 4.13):

$$\frac{1}{X_z} + \frac{1}{X_k} = \frac{1}{f}, \quad (4.1)$$

де  $X_z$  – віддаль від головної площини об'єктива до мішені телекамери (рис. 4.13)

Переміщенням об'єктива на телекамері отримують чітке зображення

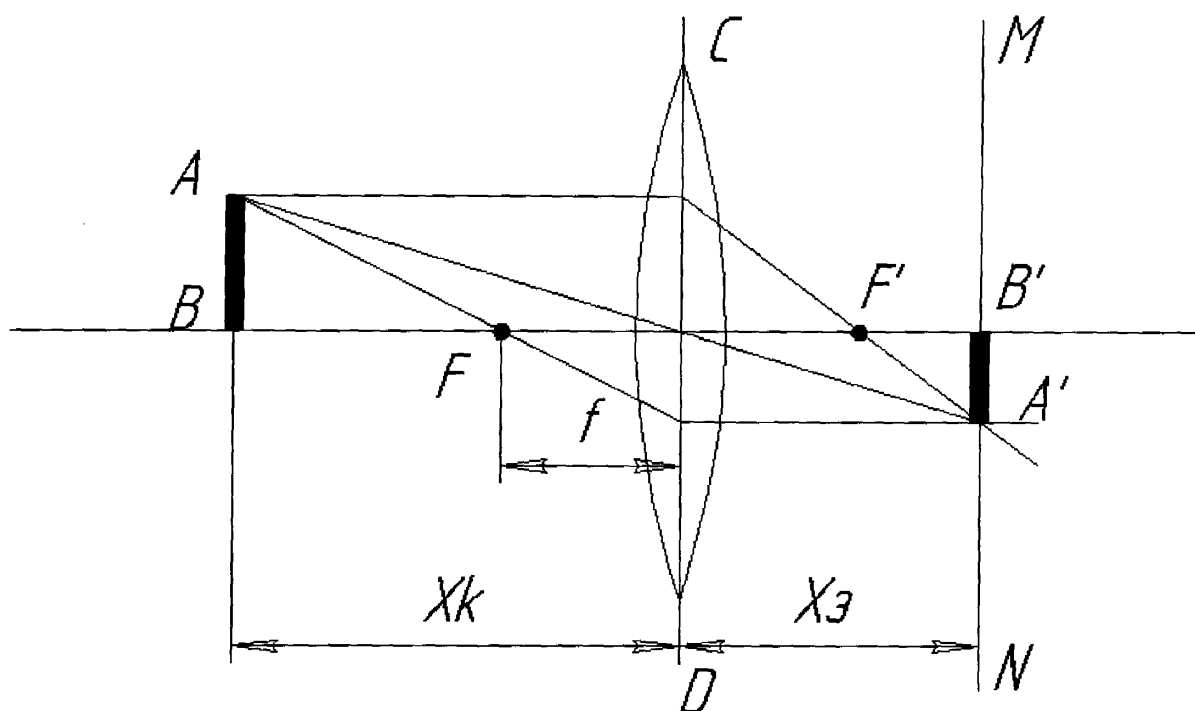


Рис. 4.13 Схема створення об'єктивом зображення профілю краплі на мішені телекамери

$AB$  – лінія профілю краплі;  $CD$  – головна площина об'єктива;  $MN$  – площина мішені телекамери;  $A'B'$  – лінія зображення профілю краплі в площині мішені



краплі на екрані монітора.

Розроблена конструкція оптоелектронного приладу для контролю ККЗ дозволяє використовувати його для визначення ККЗ за методами розробленими як в п.п. 2.4, так і в п.п. 2.5. Основна мета такої побудови приладу, зображеного на рис.4 полягає в тому, щоб одержати на моніторі персонального комп'ютера чітке, контрастне зображення краплі. При чому це зображення повинно бути такої величини, що забезпечує достатню точність визначення ККЗ.

Для забезпечення цих вимог до зображення краплі на моніторі система освітлення краплі повинна бути такою, щоб дозволяла проведення контролю ККЗ як прозорих, так і непрозорих рідин.

Для непрозорих рідин добре підходить освітлення краплі за схемою «на просвіт», як зображено на рис.4. Для усунення оберацій в оптичних елементах освітлення слід здійснювати монохроматичним світлом. З цією метою використовуються світлофільтри, які потрібно вибирати з умови, що колір рідини і колір світлофільтра мають знаходитись в різних ділянках спектра, наприклад, для крапель червоного пенетранту слід вживати синій світлофільтр. Для прозорих рідин така схема освітлення дає не контрастне зображення краплі з яскравою світлою плямою посередині і воно погано піддається обробці. Тому для прозорих рідин доцільно використовувати тау схему освітлення, при якій пучок променів із освітлювача падає під кутом на білий (недзеркальний) екран, на фоні якого отримують зображення краплі.

Зрозуміло, що для регулювання яскравості освітлення освітлювач повинен живитись від регульованого блока живлення.

Для того щоб середина краплі попадала в центр екрану монітора в приладі передбачено встановлювати досліджуваний зразок твердого тіла на столик, який за допомогою механізмів переміщення пересувається горизонтально та вертикально впоперек оптичної осі приладу. Механізм переміщення мусить забезпечувати легкість, плавність і точність пересування столика, щоб не виникала вібрація, яка приводить до зміщення, розтікання

крапель на поверхні досліджуваного тіла, а значить до зміни ККЗ. Переміщення столика повинно відбуватись суворо у вертикальній або горизонтальній площинах перпендикулярно до оптичної осі, проходить через середину краплі та центр вхідного отвору телекамери.

Оскільки при використанні оптичного методу контролю змочуваності визначається ККЗ тільки в одному меридіанному перерізі краплі, а в інших меридіанних перерізах ККЗ можуть бути інші із-за різного роду неоднорідностей поверхні твердого тіла, то для більш узагальненої оцінки ККЗ по периметру основи краплі треба проводити визначення ККЗ в різних меридіанних перерізах. Для цього предметний столик зроблено поворотним. Поворот столика контролюється по кутовій шкалі.

Для розробленого приладу використано телекамеру Т-313С, яка є сумісною з персональними комп'ютерами, тобто під'єднується до вхідного порта комп'ютера без узгоджуючих блоків, тільки в пам'ять комп'ютера вводиться спеціальна програма для відеопроцесора, в якому відбувається оцифрування сигналу з телекамери. При цьому зображення буде складатись із множини дискретних елементів прямокутної форми – пікселів. Кожний піксель характеризується певною кількістю рівнів яскравості.

Оцифроване зображення поступає в центральний процесор комп'ютера, в якому за розробленим алгоритмом здійснюється обробка зображення краплі та підкладки.

При цьому враховано, що використана телекамера передає на комп'ютер картину, яка сформульована в площині її фотомішені. Тобто в комплекті з телекамерою потрібно обов'язково використовувати об'єктив, який створить дійсне зображення профілю краплі на підкладці в площині мішені телекамери.

Крім того щоб визначився істинний ККЗ, а не кути натікання чи відтікання, а також, щоб в процесі вимірювання крапля не переміщувалась по поверхні твердого тіла, ця поверхня повинна бути горизонтальною. Для контролю горизонтальності служить рівень, встановлений на основі приладу.

#### 4.4.5. Особливості технічної реалізації приладу для визначення крайового кута змочування пористих тіл

Як було вказано раніше в розділі 3 методика визначення ККЗ пористих тіл відрізняється від методики визначення ККЗ монолітних з гладкою поверхнею твердих тіл необхідністю попереднього визначення значно більшої кількості параметрів як досліджуваного пористого тіла, так і параметрів змочуваної рідини.

Тільки після попереднього визначення вказаних у розділі 3 параметрів пористого тіла і рідини приступають до визначення ККЗ.

Основними вимогами до приладу для визначення ККЗ пористих тіл є такі: можливість використання для проведення досліджень різних рідин, в т.ч. і розчинів поверхнево-активних речовин; можливість використання для досліджень різних пористих твердих тіл, в т.ч. і нафтогазоносних порід певних розмірів і форми (діаметр 25 мм.) забезпечення контакту досліджуваного зразка пористого твердого тіла із досліджуваною рідиною тільки через його основу; забезпечення такого герметичного розміщення зразка пористого тіла у вимірювальній камері, щоб внутрішній простір, в якому буде здійснюватися вимірювання капілярного тиску, був герметичний і включав в себе тільки пористе середовище зразка пористого тіла та простір між верхньою стороною зразка і пружною мембраною давача тиску; можливість реєстрації тиску і часу безпосередньо на цифрових табло приладу і передача цих значень в оцифрованому вигляді на персональний комп'ютер для подальшої обробки.

З урахуванням вищевказаного розроблено прилад ВЗПТ-1 для визначення ККЗ пористих тіл, загальний вигляд якого приведений на рис. 4.14.

Прилад ВЗПТ-1 включає такі основні блоки, вузли і елементи: електронно-механічний блок 4, в якому розміщені відповідні електронні блоки для вимірювання капілярного тиску і реєстрації часу від моменту контакту рідини із нижньою основою пористого тіла, на передній панелі якого

встановлені цифрові табло тиску 10 і таймера 15, тумблер 11 для включення живлення приладу, кнопки 16 і 18 для запуску і зупинки таймера 15, ручки регулювання нуля шкали приладу по тиску 12 і чутливості приладу щодо фіксації моменту контакту рідини із пористим тілом 19, а також індикатор 17 моменту цього контакту; через передню панель виведені для оператора ручка 13 для створення відповідного тиску обтискання зразка пористого тіла (наприклад: 0,5 МПа), а також ручка вентиля 14 для відкриття системи гідрообтискання зразка під час її заповнення обтискуючою рідиною, закриття і створення відповідного тиску обтискання під час проведення процедури вимірювання ККЗ і для зняття тиску і зливання обтискуючої рідини після закінчення процедури визначення ККЗ пористого тіла і його звільнення із камери 5; вимірювальну камеру 5 із нижньою і верхньою кришками 8 і 9 для герметичного закриття камери, при цьому у нижній кришці 8 є отвір, через який зливається надлишок досліджуваної рідини у посудину 2, у верхній кришці 9 встановлений давач тиску 6 для вимірювання капілярного тиску над зразком пористого тіла, а на боковій стінці камери 5 встановлений манометр 7 для індикації рівня обтискання як під час його створення, так і під час проведення вимірювання капілярного тиску. індикація роботи таймера контакту рідини із пористим тілом; 19 – потенціометр регулювання чутливості моменту контакту

Слід відмітити, що обтискуючу рідину подають у гідравлічну схему приладу ВЗПТ-1 через відповідні патрубки, встановлені на задній стінці, а досліджувану рідину встановлюють на нижній кришці 8 камери 5. Підняття досліджуваної рідини до моменту торкання її з твердим досліджуваним тілом здійснюють за допомогою повороту нижньої кришки 8.

Вихідний сигнал приладу ВЗПТ-1 подається на персональний комп'ютер, який на рис. 4.1.4 не показаний і в якому є спеціально розроблена програма, що дозволяє провести обробку вхідної інформації тобто, виміряного капілярного тиску, і моментів часу його реєстрації з метою одержання значення ККЗ.

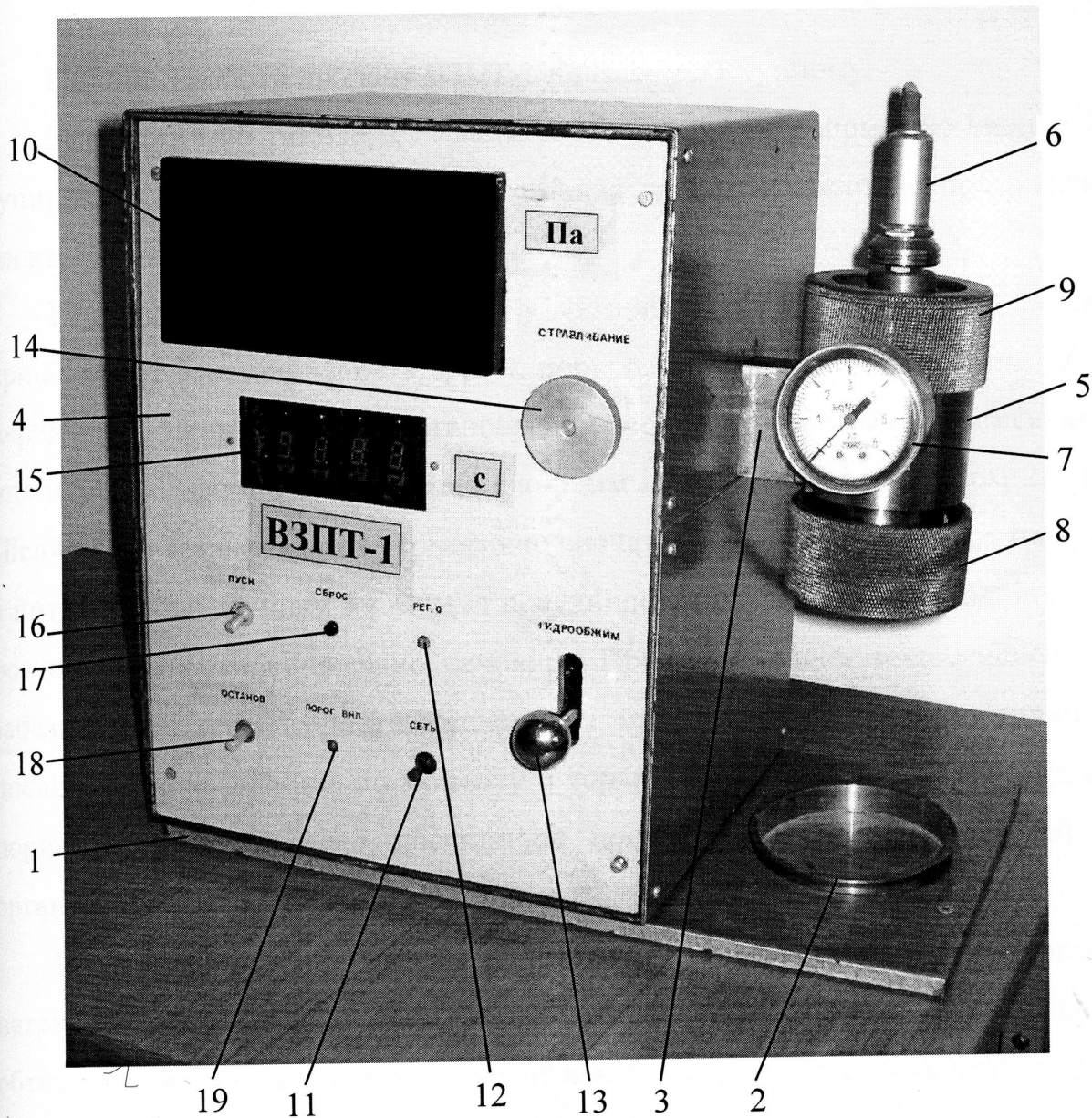


Рис. 4.14. Загальний вигляд приладу ВЗПТ-1 для визначення ККЗ пористих тіл

1 – основа; 2 – посудина для збору надлишків досліджуваної рідини; 3 – вузол для встановлення досліджуваного зразка твердого тіла; 4 – електронно-механічний блок; 5 – вимірювальна камера; 6 – давач тиску ПДП-1000 МА; 7 – манометр; 8 – днище; 9 – кришка; 10 – цифрове табло індикації тиску у вимірювальній камері; 11 – тумблер включення електричного живлення; 12 – ручка підстроювання нуля приладу; 13 – ручка насоса гідрообжиму; 14 – вентиль для втравлювання рідини (масла) обжиму керна породи; 15 – цифрове табло часу; 16 – кнопка пуску таймера; 18 – кнопка зупинки таймера; 17 – індикація роботи таймера контакту рідини із пористим тілом; 19 – ручка регулювання чутливості моменту контакту

Принцип роботи приладу ВЗПТ-1 полягає у наступному.

За допомогою тумблера 11 включають прилад, за допомогою кнопки 18 зупиняють таймер 15 і залишають прилад на 20-ти хвилинне прогрівання електронних схем і давача тиску 6.

Під час прогрівання приладу у вимірювальну камеру 5 при знятих кришках 8 і 9 встановлюють зразок пористого тіла діаметром 25 мм, який перед тим повинен бути встановлений у маслобензостійку обтискуючу циліндричної форми гуму, товщиною 3 мм із внутрішнім діаметром 25 мм. Після цього встановлюють герметично спочатку кришку 9 із давачем тиску 6, а потім нижню кришку 8 разом із посудиною із досліджуваною рідиною чи розчином поверхнево-активної речовини. При цьому повинні одночасно бути забезпечені і герметичність з'єднання, і можливість підйому посудини із досліджуваною рідиною до моменту її торкання із нижньою основою зразка пористого тіла. Вказане досягається шляхом використання деталей із органічного скла і нижнього різьбового з'єднання.

Після встановлення зразка пористого тіла у камеру 5 через відповідні патрубки ззаду приладу ВЗПТ-1 заповнюють систему гідрообтискування обтискуючою рідиною при відкритому вентилі 14, перекривають клапан 14 і за допомогою ручки 13 насоса гідрообтискування вручну створюють відповідний тиск гідрообтискування за значенням якого слідкують по манометру 7 (наприклад: 0,5 МПа). Слід відмітити, що в процесі проведення наступних вимірювань капілярного тиску тиск гідрообтискування може зменшуватися внаслідок недосконалої конструкції системи гідрообжиму і відсутності „ідеальної” герметичності. Тому в такому випадку необхідно постійно вручну підтримувати цей тиск на заданому рівні за допомогою ручки 13 і показів манометра 7.

Після 20-ти хвилинного прогрівання за допомогою ручки 12 встановлюють нульові покази тиску на табло 10 і налаштовують максимальну чутливість щодо фіксації моменту контакту рідини із пористим тілом за допомогою ручки 19 і індикатора 19. При цьому зайве спрацювання

індикатора 17 приводить до запуску програми обробки результатів вимірювань у персональному комп'ютері. Тому в цих випадках за допомогою клавіатури необхідно зупинити запуск програми, що передбачено у розробленій програмі.

Шляхом підняття за допомогою кришки 8 посудини із досліджуваною рідиною у камері 5 досягають моменту контакту рідини із пористим тілом, в результаті спрацює індикатор 17, запуститься програма та розрахунок значення косинуса ККЗ згідно (3.32).

Закінченням процесу досліджень слід вважати зупинку наростання тиску на табло 10 приладу. Тривалість процесу від торкання до стабілізації капілярного тиску може бути від 10 до 30 хвилин і залежить від властивостей досліджуваних як пористого тіла, так і рідини.

Результати обробки результатів досліджень будуть представлені на моніторі комп'ютера.

Дослідження ККЗ інших пористих тіл різними рідинами чи їх розчинами проводять аналогічно, попередньо провівши відповідне очищення певних блоків і вузлів приладу в результаті проведення попередніх досліджень.



### Висновки до розділу

Приведені результати досліджень у 4-у розділі зводяться до наступного:

1) розроблені структурні схеми приладів для контролю ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску у газовому пухирці, шляхом вимірювання геометричних параметрів профілю лежачої краплі на поверхні досліджуваного твердого монолітного тіла (площі меридіанного перерізу, висоти краплі і її діаметру при основі, а також шляхом знаходження аналітичної поліноміальної залежності і отримання виразу для похідної на базі цієї залежності), а також для вимірювання ККЗ твердих пористих тіл. В кожному із цих випадків обов'язковим складовим блоком приладів є персональний комп'ютер із спеціально розробленим програмним забезпеченням;

2) розроблені конструкції приладів для визначення ККЗ, які реалізують вищевказані структурні схеми. Описані складові блоки і вузли цих приладів і приведені їх загальні вигляди (фотографії), описані методики проведення визначення ККЗ за допомогою цих приладів. Важливим елементом всіх вищевказаних приладів є первинний перетворювач тиску, телекамера для фіксації профілю лежачої краплі, а також відповідні електронно-механічні блоки, які дозволяють виконати відповідні операції при визначенні ККЗ;

3) прилад для визначення ККЗ шляхом вимірювання максимального тиску у газовому пухирці рекомендується використовувати для знаходження кута відтікання, що є важливим при змочуванні твердих монолітних тіл різними рідинами. Прилад для визначення ККЗ шляхом вимірювання площі меридіанного перерізу лежачої краплі, її висоти і діаметру в основі рекомендується для визначення кута натікання при умові, що цей кут є більшим  $90^\circ$ . Прилад для визначення ККЗ шляхом отримання аналітичної поліноміальної залежності нижньої частини лежачої краплі і знаходження похідної на базі цієї залежності рекомендується використовувати для визначення кута натікання при умові, що цей кут є меншим  $90^\circ$ .

~



## Розділ 5

# **МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ МОНОЛІТНИХ І ПОРИСТИХ ТІЛ**

Розроблені прилади для визначення ККЗ твердих мономітних і пористих тіл повинні бути оцінені з метрологічної точки зору. Метрологічний аналіз приладів здійснюють або структурним методом на основі окремих складових похибок окремих блоків приладу з урахуванням структурної схеми приладу, або диференціальним методом при відомій залежності між вихідною величиною, вхідними величинами і іншими величинами, що характеризують досліджуваний прилад, або імовірнісним методом при відсутності повної інформації про прилад, або при неможливості використання вказаних двох інших методів [?].

## **5.1. Аналіз метрологічних характеристик приладу для вимірювання крайового кута змочування методом максимального тиску в газовому містку**

### **5.1.1. Загальний метрологічний аналіз приладу ВКЗ-1**

На основі аналізу основних факторів, які впливають на сумарну похибку вимірювання крайового кута змочування приладом ВКЗ-1, схема нагромадження його похибок представлена на рис. 5.1. Основними складовими сумарної абсолютної похибки приладу ВКЗ-1 є:

$\Delta_{мет.}$  - методична похибка, яка обумовлена похибкою залежності ККЗ від тиску і інших параметрів (2.28), похибкою апроксимації  $\Delta_{апр.}$  та похибкою  $\Delta_{розн.}$  чисельного розрахунку з метою знаходження значень коефіцієнтів залежності (2.28);

$\Delta_h$  - похибка, яка обумовлена неточністю встановлення торця каліброваного капіляру на задану висоту над поверхнею досліджуваного твердого тіла;

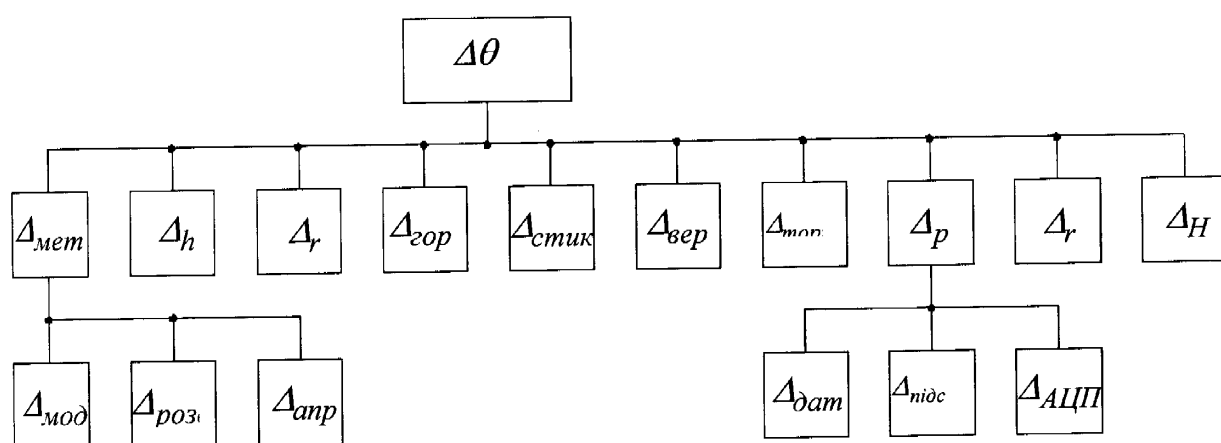


Рис. 5.1. Узагальнена схема нагромадження похибки приладу ВКЗ-1

$\Delta_{\text{верт.}}$  – похибка із-за невертикальності осі капіляра;

$\Delta_{\text{тор.}}$  – похибка із-за неперпендикулярності зрізу капіляра;

$\Delta_p$  – похибка каналу вимірювання тиску;

$\Delta_{\text{дат.}}$  – похибка давача тиску;

$\Delta_{\text{підс.}}$  – похибка підсилювача сигналу;

$\Delta_{\text{АЦП}}$  – похибка АЦП;

$\Delta_{\text{стик.}}$  – похибка, яка обумовлена неточністю контакту каліброваного капіляру з поверхнею досліджуваної рідини;

$\Delta_r$  – похибка визначення внутрішнього радіуса вимірювального капіляра;

$\Delta_{\text{гор.}}$  – похибка, яка обумовлена негоризонтальністю поверхні твердого тіла;

$\Delta_t$  – похибка, яка обумовлена інерційністю процесів в пневматичній схемі приладу;

$\Delta_n$  – похибка визначення глибини занурення капіляру.

Випадкові відносні похибки доцільно оцінювати шляхом визначення їхніх середньоквадратичних відхилень (СКВ)  $\sigma$ . Перевагою такого шляху оцінки розкиду випадкових величин є можливість визначення СКВ сумарної похибки  $\sigma_\Sigma$  через СКВ окремих складових похибки  $\sigma_i$  за формулою [118]

$$\sigma_\Sigma^2 = \sum \sigma_i^2 \quad (5.1)$$

незалежно від різноманітності законів розподілу кожної із випадкових величин і деформації знаків розподілу при утворенні композицій.

Якщо відомий закон розподілу сумарної похибки, то значення сумарної випадкової похибки може бути визначеною на основі значення СКВ  $\sigma_\Sigma$  [118]:

$$\gamma_\Sigma = k_e \cdot \sigma_\Sigma, \quad (5.2)$$

де  $k_e$  – ентропійний коефіцієнт, значення якого визначено відповідно до закону розподілу сумарної похибки.

Для різних законів розподілу співвідношення між ентропійним  $\Delta_e$  і середньо арифметичним  $\sigma_i$  значення похибки є різним і його зручно характеризувати значенням ентропійного коефіцієнта  $K_e = \Delta_e / \sigma$  для даного закону розподілу.

Ентропійний інтервал невизначеності  $\alpha = 2\Delta_e$  охоплює тільки ту частину розподілу, в якій зосереджена основна частина можливих значень випадкової величини. Тому для будь-якого розподілу може бути вказане таке значення довірчої імовірності  $P_e$ , при якій ентропійне і довірче значення похибки співпадають. Залежність  $P_e$  від виду розподілу виражається аналітично [124]:

$$P_e = 0,899 + \frac{0,1818}{\varepsilon}, \quad (5.3)$$

де:  $\varepsilon = \mu_4 / \sigma_4$  – ексцес, величина якого залежить від виду розподілу;

$\mu_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - X_u)^4 p(x) dx$  – четвертий центральний момент розподілу, який

характеризує витягнутість розподілу.

Деякі з перерахованих похибок, а саме:  $\Delta_{мет.}$  і  $\Delta_t$  описані в розд. 2 і в розд. 3.3 відповідно. Дані похибки є систематичними, їх значення є мізерно малими, що дозволяє нехтувати ними.

В даному розділі детальніше досліджені інші вказані вище випадкові складові похибки приладу ВКЗ-1.

#### 5.1.2. Дослідження окремих складових сумарної випадкової похибки приладу ВКЗ-1

Похибка каналу вимірювання тиску в газовому містку.

Похибка вимірювання тиску  $\Delta p$  в газовому містку в свою чергу містить три основні складові, а саме: давача тиску  $\Delta_{дав.}$ , підсилювача  $\Delta_{підс.}$  та аналого-цифрового перетворювача (АЦП)  $\Delta_{АЦП}$ .

Основна зведена похибка давача тиску ПДП-12 МДА становить  $\gamma_{\partial}=0,5\%$  при експлуатації в діапазоні зміни температури навколишнього середовища від  $+10^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$  [120]. Похибкам даного типу властивий нормальний закон розподілу [119], для якого ентропійний коефіцієнт становить  $k_e=2,066$ . Тоді СКВ буде рівне:

$$\sigma_{\partial \text{ав.}} = \frac{\gamma_{\partial}}{k_e} = \frac{0,5}{2,066} = 0,242\%. \quad (5.4)$$

Підсилювачу постійного струму властиві адитивна похибка від зміни нуля (дрейф) та мультиплікативна похибка коефіцієнта підсилення. Дрейф нуля підсилювача визначався експериментально в лабораторних умовах. При цьому вважалось, що напруга в мережі змінного струму змінювалась в межах  $220 \text{ В} \pm 5 \text{ В}$ . Вхід підсилювача замикали накоротко на корпус, а вихідний сигнал після 15-хвилинного прогрівання вимірювали через кожні 15 хвилин протягом восьми годин. Вимірювання проводились вольтметром Щ1516, в якому періодично здійснювався контроль нуля і перевірка показів взірцевої напруги на затискачах вмонтованого у вольтметр нормального елемента. Дослідження показали, що дрейф нуля підсилювача при вказаних умовах не перевищував 7,8 мВ. При максимальному вихідному сигналі підсилювача 5 В зведена максимальна похибка від дрейфу нуля підсилювача буде:

$$\gamma_{n \partial \text{рейф}} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{5} = 0,156\%. \quad (5.5)$$

Закон розподілу похибки нуля є рівномірним. Тому СКВ даної похибки буде:

$$\sigma_{n \partial \text{рейф}} = \frac{\gamma_{n \partial \text{рейф}}}{k_{ep}} = \frac{0,156}{1,73} = 0,09\%. \quad (5.6)$$

Похибка коефіцієнта підсилення підсилювача залежить від властивостей використаних для його реалізації активних та пасивних елементів і стабільності напруги живлення. При використанні підсилювача постійного струму типу модулятор-демодулятор частотні властивості активних елементів

(мікросхемних операційних підсилювачів К140УД13 і К140УД7) не впливають на зміну коефіцієнта підсилення і його значення визначається тільки елементами ланок зворотного зв'язку та стабільністю напруги живлення [ 121 ]. В ланках зворотного зв'язку підсилювача використано прецизійні резистори типу С2-29В, нестабільність значення опору яких становить  $\pm 0,05\%$ . Тому, цим впливом можна знехтувати. Похибка коефіцієнта підсилення від коливань напруги підлягає трикутному закону розподілу. Її максимальне зведене значення при коливаннях напруги в мережі в межах  $\pm 10\%$  буде становити:  $\gamma_{n_{напр}} = 0,1\%$ , а її СКВ:

$$\sigma_{n_{дрейф}} = \frac{\gamma_{n_{напр}}}{k_{e_m}} = \frac{0,1}{2,02} = 0,05\%. \quad (5.7)$$

Максимальна допустима основна приведена похибка стандартного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) типу Ф707М/1 становить  $0,30\%$  [ 122 ]. Ця похибка згідно з [ 129 ] складається з мультиплікативних похибок від нелінійності коефіцієнта перетворення, неточності резисторних дільників та впливу зміни температури навколишнього середовища, а також адитивної похибки, яка визначається одиницею молодшого двійкового розряду.

У випадку рівномірного закону розподілу похибки АЦП, для яких властивий саме такий закон розподілу результатів спостережень, його СКВ буде:

$$\sigma_{АЦП} = \frac{\gamma_{АЦП}}{k_{e_p}} = \frac{0,3}{1,73} = 0,173\%. \quad (5.8)$$

Розрахунок результуючого СКВ каналу вимірювання тиску зводиться до алгебраїчного сумування СКВ похибок давача, підсилювача та АЦП, тобто

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{дав}^2 + \sigma_{n_{дрейф}}^2 + \sigma_{n_{напр}}^2 + \sigma_{АЦП}^2} \approx 0,31\%. \quad (5.9)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 від неточності встановлення торця капіляру на задану висоту над поверхнею досліджуваного твердого тіла.

Похибка  $\Delta_h$  обумовлена тим, що процес підймання столика з досліджуваною системою рідина-тверде тіло-газ здійснюється дискретно за допомогою гвинтового механізму, який приводиться в дію кроковим двигуном ДШИ-200.

Для експериментального дослідження похибки  $\Delta_h$  проводилося багаторазове встановлення капіляру у вузол фіксації, його опускання на задану глибину і за допомогою мікроскопа НІР-1 вимірювалася висота підняття капіляру над поверхнею твердого тіла. Результати вимірювання подані в додатку??

Оскільки опис закону розподілу такого виду результатів спостережень не є відомим, то за відомою методикою [118] було проведено перевірку відповідності результатів спостережень нормальному закону розподілу. В результаті було встановлено, що закон розподілу похибки  $\Delta_h$  є близький до нормального.

Оскільки максимальна зведена похибка згідно додатку ?? рівна  $\gamma_h = 0,7\%$ , то її СКВ буде таким

$$\sigma_h = \frac{\gamma_h}{k_{en}} = \frac{0,7}{2,07} = 0,26\%. \quad (5.10)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок неякісного контакту нижнього торця каліброваного капіляру з поверхнею досліджуваної рідини.

Похибка  $\Delta_{стик.}$ , яка обумовлена неякісним контактом нижнього торця каліброваного капіляру з поверхнею рідини, залежить від ряду факторів, серед яких основними є: вібрації різного походження, негоризонтальність приладу, неперпендикулярність площини зрізу робочого торця капіляру до його вертикальної осі та чистота обробки його поверхні, неvertикальність встановлення вимірювального капіляру у вузлі його фіксації, похибки механізму переміщення столика із досліджуваною рідиною і механічне

підняття капіляру на висоту  $0,5r_{\text{вн}}$ . Сумарний вплив цих факторів було досліджено експериментально.

Похибка  $\Delta_{\text{стик.}}$  визначалась шляхом вимірювання величини переміщення столика підйимального механізму від встановленого знизу спеціального упору до моменту контакту рідини з нижнім торцем каліброваного капіляру. Величину переміщення вимірювали за допомогою багатообертової вимірюваної головки годинникового типу 2МИГ з ціною поділки 0,002 мм. Після кожного контакту рідини з капіляром і фокусування показів вимірювальної головки столик з посудиною опускали вниз до упору, з капіляру видували залишки рідини, торець капіляра осушували і повторювали описані вище операції.

В результаті експериментальних досліджень визначили максимальну похибку від неякісного контакту капіляра з рідиною  $\Delta_{\text{НЯК}}$ , яка становила  $\Delta_h = 0,0028$  мм (додаток ???). Відносну похибку визначення ККЗ розраховували як відношення абсолютної похибки тиску  $\Delta P = \rho \cdot q \cdot \Delta_{\text{НЯК}}$  до максимального тиску  $P_{\text{макс}}$  згідно (2.28).

Максимальна відносна похибка  $\Delta_{\text{стик.}}$  буде у випадку незмочуваності твердого тіла ( $\cos \theta \rightarrow 0$ ), тобто тоді, коли  $P_{\text{макс}}$  буде мінімальним. При відомих коефіцієнтах  $C_0, C_1, C_2, C_3$  розв'язавши кубічне рівняння (2.28) відносно  $P_{\text{макс}}$  при  $\cos \theta = 0$  одержимо, що  $P_{\text{макс.}} = 22,327$  (у відносних одиницях).

Величина абсолютного тиску на основі виразу (2.23) буде:

$$P = P_M \cdot \rho \cdot q \cdot r. \quad (5.11)$$

Якщо прийняти радіус вимірювального капіляра  $r = 0,5$  мм, густину рідини  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , то абсолютне значення тиску  $P$  буде рівним:

$$P = 22,327 \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 109,4 \text{ Па}. \quad (5.12)$$

Максимальна похибка тиску  $\Delta P$  буде рівною:

$$P = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,0028 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,027 \text{ Па}. \quad (5.13)$$



Відповідно максимальна відносна похибка із-за неякісного контакту буде рівна

$$\gamma_{\text{стик.}} = \frac{0,027}{109,4} \cdot 100 \% = 0,025 \% \quad (5.14)$$

при нормальному законі її розподілу з ентропійним коефіцієнтом  $k_e = 2,066$ .

Отже СКВ даної похибки

$$\sigma_{\text{стик.}} = \frac{\gamma_{\text{стик.}}}{k_e} = \frac{0,045}{2,066} = 0,012 \% . \quad (5.15)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок визначення внутрішнього радіуса каліброваного капіляра,  $\Delta r$ .

Залежність (2.28)  $\cos \theta = f(P_{\text{max}})$  визначалась при умові фіксованого значення радіуса капіляра. Тому похибка  $\Delta_r$  буде впливати на сумарну похибку приладу ВКЗ-1.

Вимірювання діаметрів внутрішнього отвору 10 капілярів проводилось за допомогою мікроскопа МБИ-1 з точністю 0,001 мм у 6 перерізах рівномірно розподілених по всьому внутрішньому периметру кожного капіляра. Як видно з результатів вимірювання, поданих в додатку ???, максимальні відхилення досягають значень  $\Delta r = 0,002$  мм, що приводить до зведеної похибки 0,2%. Закон розподілу даної похибки можна вважати трикутним [ ]. Отже, СКВ даної похибки

$$\sigma_r = \frac{0,2}{\sqrt{6}} = 0,08 \% . \quad (5.16)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 від неперпендикулярності площини зрізу нижнього торця капіляру до його вертикальної осі,  $\Delta t$ .

При розрахунку значення ККЗ за виміряними значеннями тиску необхідно враховувати строго фіксоване значення внутрішнього радіуса нижнього торця капіляра, на якому формується газовий пухирець. Неперпендикулярність площини зрізу капіляра буде приводити до утворення овальної форми нижнього торця капіляра. При цьому дійсний радіус буде різним по малій і

великій осях такого овального отвору, а дійсний радіус по великій осі овала  $r_q$  буде відрізнятися від виміряного значення радіуса круга  $r_{\text{вн.}}$ .

На основі значень  $r_{\text{вн.}}$  і  $r_q$  визначили кут нахилу  $\alpha$ :  $r_{\text{вн.}}/r_q = \cos \alpha$ . Для дослідження даної похибки визначалась залежність максимального тиску в пухирці від кута  $\alpha$ . Для цього було вибрано 8 різних капілярів. Кут нахилу площини зрізу капіляра визначався через виміряне за допомогою мікроскопа відношення  $h/D_{\text{вн.}}$  за формулою

$$\alpha = \arccos(h/D_{\text{вн.}}), \quad (5.17)$$

де  $D_{\text{вн.}} = 2r_{\text{вн.}}$ ,  $h$  – різниця висот точок на протилежних сторонах нижнього торця капіляру при його строго вертикальному положенні.

В додатку ??? приведені результати визначення ККЗ за методом максимального тиску в газовому пухирці при витискуванні пухирців з різних капілярів для однієї і тієї ж рідини (дистильованої води) і одного і того ж твердого тіла (скло).

Для експериментальних досліджень було використано відібрані капіляри, неперпендикулярність площини зрізу яких не перевищує  $1,2^\circ$ . Як видно з результатів досліджень максимальне значення приведеної відносно похибки значення ККЗ становить не більше 0,023%. Закон розподілу даної похибки можна вважати трикутним, [119]. Ентропійний коефіцієнт  $k_{e_m} = \sqrt{6}$ . Отже СКВ даної похибки буде:

$$\sigma_{\text{торця}} = \frac{0,023}{\sqrt{6}} = 0,0094\%. \quad (5.18)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок негоризонтальності поверхні твердого тіла,  $\Delta_T$ .

Негоризонтальність поверхні твердого тіла може бути обумовлена двома причинами: сама поверхня досліджуваного твердого тіла не є абсолютно плоскою, або досліджуване тіло встановлене під деяким кутом до горизонту, а також негоризонтальністю встановлення самого приладу або столика з

посудиною. Для уникнення систематичної складової даної похибки необхідно періодично здійснювати перевірку горизонтальності приладу та його столика для посудини з досліджуваною рідиною.

Для дослідження випадкової похибки, зумовленої негоризонтальністю поверхні, експериментально визначалась залежність максимального тиску в газовому пухирці від кута нахилу пластини. Для експерименту була відібрана хімічно чиста скляна пластина та дистильована вода. Значення ККЗ становило  $6^\circ$ . Встановлення пластини з відхиленням від горизонтального положення здійснювалося за допомогою регулювальних ніжок приладу, контроль кута нахилу здійснювався шляхом вимірювання перекосу основи приладу за допомогою вимірювальної головки 2МИГ з ціною поділки 0,01 мм. Перекос одного краю приладу на 1 мм при базі 285 мм відповідав куту  $0,2^\circ$ . В додатку ??? наведені результати вимірювання ККЗ за допомогою приладу ВКЗ-1 при різних значеннях кута нахилу досліджуваного твердого тіла. Із поданих результатів випливає, що для невеликих значень кутів відхилення різниця значення ККЗ від отриманого при відсутності нахилу пластини зростає пропорційно куту нахилу поверхні досліджуваного тіла.

Отже для того, щоб похибка, зумовлена нахилом пластини була меншою, ніж 0,1%, необхідно, щоб кут відхилення від горизонталі пластини не перевищував  $2^\circ$ . Для досягнення такого малого кута нахилу необхідно при встановленні приладу здійснювати контроль його горизонтальності, а при зміні рідини чи досліджуваного твердого тіла перед початком вимірювань необхідно здійснювати контроль горизонтальності тіла. В результаті проведення експериментальних досліджень вказаного вище характеру було встановлено, що максимальне відхилення поверхні пластини від горизонтального положення не повинно перевищувати  $0,9^\circ$ . Тому максимальну зведену похибку  $\varepsilon_{гор}$  приймаємо рівною 0,03%. Закон розподілу цієї похибки з достатнім ступенем вірогідності можна вважати трикутним, оскільки результати спостережень геометричних розмірів тіл описуються трикутним законом розподілу [119]. Отже СКВ даної похибки буде наступним:

$$\sigma_{\text{гор.}} = \frac{\xi_{\varepsilon}}{k_e} = \frac{0,03}{\sqrt{6}} = 0,012\%. \quad (5.19)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок відхиленням капіляра від вертикалі,  $\Delta_{\text{верт.}}$

Відхилення положення капіляра від строго вертикального положення приводить до спотворення форми газового пухирця, що утворюється на нижньому торці капіляра. Процес наростання тиску у деформованому пухирці відмінний від аналогічного процесу у пухирці, який видувається з вертикального капіляра. Це пов'язано з тим, що форма пухирця вже не буде симетричною, а максимальний тиск в пухирці буде різним залежно від відхилення капіляру від вертикального положення. У додатку ??? наведені результати визначених ККЗ при різних значеннях кута відхилення капіляру від вертикального положення. Капіляр багаторкратно вставлявся в тримач і за допомогою катетометра вимірювався кут нахилу капіляра. Максимальне відхилення осі вимірювального капіляру від вертикалі при багаторкратних встановленнях різних капілярів у вузол фіксації не перевищувало  $1^{\circ}27'$ . При цьому відносна похибка визначення ККЗ внаслідок неvertикальності капіляру не перевищувала 0,173%.

Закон розподілу такої похибки також можна вважати трикутним [ ]. В результаті, СКВ даної похибки буде:

$$\sigma_{\text{верт.}} = \frac{0,173\%}{\sqrt{6}} = 0,071\%. \quad (5.20)$$

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок вимірювання глибини занурення капіляру у досліджувану рідину,  $\Delta_h$ .

Вказана похибка  $\Delta_h$  обумовлена тим, що процес підймання столика з посудиною із досліджуваною системою „рідина-тверде тіло” здійснюється за допомогою ручки з відліковим лімбом з ціною поділки 0,1 мм, яку можна вважати за абсолютну похибку результату вимірювання глибини занурення

капіляру у досліджувану рідину. Це приводить до абсолютної похибки вимірювання тиску 1,0 Па або у відносних одиницях  $\Delta P = 0,3332$ . Максимальна відносна похибка буде при мінімальному  $P_m = 22,327$  (у відн. один.) у пухирці при дослідженні незмочуваних матеріалів ( $\theta = 90^\circ$ ) і буде

$$\gamma_h = \frac{\Delta P}{P_{\min.}} \cdot 100\% = \frac{0,3332}{22,327} \cdot 100\% = 1,49\%.$$

Оскільки похибки кінематичних пар механізмів підлягають рівномірному закону розподілу [125], то СКВ даної похибки рівне

$$\sigma_h = \frac{1,49\%}{\sqrt{3}} = 0,86\%. \quad (5.21)$$

Похибка вузла підйому капіляра на висоту  $0,5r_{\text{вн}}$ , яка визначена за допомогою вказаної вище вимірювальної головки 2МИГ, не перевищує 0,09%.

Похибка приладу ВКЗ-1 внаслідок неточності фіксації моменту контакту торця капіляру з поверхнею,  $\Delta_c$ .

Внаслідок великої кількості чинників, які впливають на точність фіксації моменту контакту нижнього торця капіляру з досліджуваною поверхнею твердого тіла і які діють випадково, вказану складову похибку визначити аналітично досить важко. Тому було проведено експериментальне дослідження похибки глибини ручного занурення капіляру в момент його контакту з поверхнею твердого тіла. Для цього використовувався вимірювальний індикатор типу 2МИГ з ціною поділки 0,01 мм, який встановлювався в стійці типу С-IV. Індикатор встановлювався у стійці С-IV таким чином, щоб наконечник рухомого стрижня індикатора контактував з поверхнею підйомного столика підйомного приладу ВКЗ-1. Фіксувались покази індикатора 2МИГ, коли столик підйомного механізму знаходився у нижньому початковому положенні і коли столик зупинявся при ручному підйомі в момент контакту капіляра з твердим тілом. Різниця показів індикатора визначала висоту підймання столика при кожному контакті, і надавала інформацію про точність визначення глибини занурення капіляру в момент контакту. Для дослідження

використовували чотири різні капіляри. В ролі досліджуваних тіл використовували калібровані пластинки з нержавіючої сталі, латуні, алюмінію, а також пластинки з гладкою поверхнею, з скла, тефлону і поліетилену. Найбільший розкид результатів вимірювання спостерігався при експериментах з алюмінієвою пластинкою із-за неякісного шліфування і полірування її поверхні. Похибки результатів визначення глибини ручного занурення капіляру в моменти його контакту з алюмінієвою пластинкою приведені в додатку .

Результати дослідження показують, що максимальна відносна похибка визначення глибини капіляру в момент його контакту з твердим тілом становить  $\gamma_c = 0,114\%$ . Оскільки на процес визначення глибини ручного занурення капіляру в момент його контакту з поверхнею твердого досліджуваного тіла впливають багато випадкових чинників, то в цьому випадку результати спостережень описуються нормальним законом розподілу [119]. Тому можна вважати, що  $K = 2,066$  і СКВ буде рівним:

$$\sigma_{стик} = \frac{0,114}{2,066} = 0,055\%. \quad (5.22)$$

### 5.1.3. Визначення результуючої відносної похибки приладу ВКЗ-1

Результати дослідження випадкових складових дають можливість розрахувати сумарну похибку приладу ВКЗ-1. Оскільки всі вказані на рис. 5.1 складові похибки є некорельованими між собою, то СКВ випадкової сумарної похибки визначається згідно (5.1) і буде рівним:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma}^2 &= (0,057)^2 + (0,829)^2 + (0,009)^2 + (0,071)^2 + \\ &+ (0,012)^2 + (0,012)^2 + (0,080)^2 + (0,0024)^2 + (0,26)^2 + (0,202)^2 = \\ &= 0,0032 + 0,6872 + 0,0001 + 0,0051 + 0,0002 + 0,0002 + \\ &+ 0,0064 + 0,0001 + 0,0676 + 0,0409 = 0,721\%. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Складові сумарної похибки приладу ВКЗ-1 поділяються на систематичні і випадкові. Для систематичних похибок внаслідок виконання числових розрахунків було визначено величини відносних похибок.

Похибка числового інтегрування за методом Рунге-Кутта четвертого порядку системи диференціальних рівнянь не перевищує  $10^{-5}\%$  [??] і тому нею можна знехтувати.

Максимальне значення похибки апроксимації табличних результатів розв'язку диференціальних рівнянь при визначенні поліноміальних коефіцієнтів  $C_0, C_1, C_2, C_3$  не перевищує  $\gamma_{apn} = 0,35\%$ . Ця похибка є випадковою величиною, результати спостережень при визначенні якої підлягають рівномірному закономірному розподілу[ ]. При цьому ентропійний коефіцієнт рівний  $K_e = 1,73$ , а СКВ цієї похибки буде рівними:

$$\sigma_{apn} = \frac{0,35}{1,73} = 0,202\%. \quad (5.24)$$

Відносна похибка, яка викликана інерційністю процесів в пневматичній частині приладу, була визначена в розд. 3 і становить  $\gamma_{\tau} = 0,03\%$ .

Для визначення згідно (5.3) ентропійного інтервалу довірки результату вимірювання ККЗ, що і буде зведеною сумарною похибкою приладу ВКЗ-1, необхідно, дослідивши її закон розподілу, визначити відповідний ентропійний коефіцієнт.

Як видно з аналізу законів розподілу випадкових складових похибок приладу ВКЗ-1, більшість з них має експоненціальний характер. Найбільший ваговий коефіцієнт дисперсії має похибка каналу вимірювання тиску та рівна  $\sigma_p = 0,829\%$ . Враховуючи відому в теорії імовірності центральну граничну теорему [119], можна скористатись узагальненням, згідно з яким, в міру сумування значної кількості похибок (не менше чотирьох) ексцес результуючих композицій законів розподілу все більше і більше наближається до нормального закону розподілу, для якого ентропійний коефіцієнт рівний  $K_e = 2,066$  а коефіцієнт ексцесу  $\varepsilon = 3$ .

Звідси ентропійне значення зведеної сумарної відносної похибки приладу ВКЗ-1 буде рівним:

$$\gamma = K_e \cdot \sigma_{\Sigma} = 0,721 \cdot 2,066 = 1,49 \%. \quad (5.25)$$

Значення довірчої імовірності  $P_e$ , при якому ентропійне та довірче значення похибки приладу ВКЗ-1 співпадають, буде згідно (5.4) таким:

$$P_e = 0,899 + \frac{0,1818}{3} = 0,9596. \quad (5.26)$$

Отже, при імовірності 0,96 для приладу ВКЗ-1 максимальна сумарна похибка становитиме 1,49%. Таке значення похибки дозволяє віднести розроблений прилад ВКЗ-1 до приладів з класом точності 1,5.

## **5.2.Метрологічний аналіз приладу для вимірювання крайового кута змочування оптичним методом**

Розглянемо похибки, які виникають в приладі при визначення крайового кута змочування. похибки, які впливають на результат є такі:

- похибка обчислень  $\gamma_E$  обумовлена об'ємом пам'яті комп'ютера, яка відводиться для зберігання чисел;
- похибка негоризонтальності площини зразка  $\gamma_T$ ;
- похибка дискретизації зображення  $\gamma_D$ ;
- похибка нерізкості зображення  $\gamma_H$ .

Останні дві похибки формують похибку обробки зображення  $\gamma_3$ .

Схема нагромадження похибок приведена на рисунку 5.2.

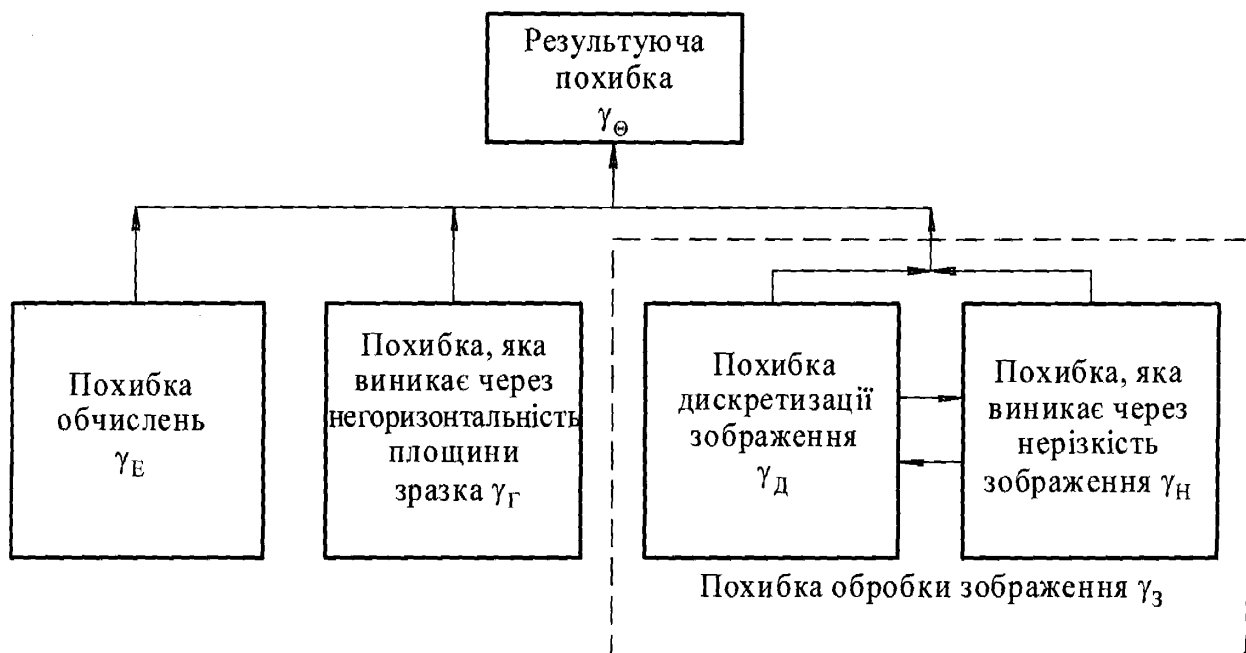


### 5.2.1 Визначення похибки обчислень на ПЕОМ

Числа в ПЕОМ представляються у вигляді мантиси та порядку. Число комірок пам'яті комп'ютера, що відводиться на зберігання одного числа є скінченим. Через це виникає похибка зберігання числа в пам'яті, яка нагромаджується при обчисленнях. Тип single дозволяє зберігати 8 цифр в мантисі, значущими є 7 цифр. Отже абсолютна похибка зберігання складе  $10^{-7} \cdot 10^n$ . Де  $n$  — значення порядку. При виконанні арифметичних операцій похибка буде нагромаджуватись, але не перевищить  $10^{-5} \cdot 10^n$ . Як видно із значень коефіцієнтів рівняння апроксимації в таблиці 2.2 значення  $n$  не перевищує 2. Отже, абсолютна похибка обчислень не перевищує  $10^{-3}$ . Максимальне число, яке можна записати в мантису складає 9,9999999, отже відносна похибка складе  $\gamma_E = 10^{-3} / 9,9999999 = 10^{-4}$ . Значно зменшити дану похибку можна використовуючи типи, які використовують більший об'єм оперативної пам'яті.

### 5.2.2. Аналіз похибки негоризонтальності поверхні зразка

Якщо верхня площа зразка твердого тіла є негоризонтальною відносно лінії горизонту, тоді будуть формуватися кути натікання та відтікання. Вклад похибки негоризонтальності площини зразка в сумарну похибку визначити є досить важко, так як не існує залежності між кутом нахилу верхньої площини зразка та цією похибкою. Зменшити цю похибку можна суворо дотримуючись методики проведення вимірювання, викладеної в пункті 4.4.4 даної роботи. Крім того, вплив похибки майже компенсується при визначенні значення крайового кута змочування за формулою (2.41) при підстановці в  $\Theta_z$  та  $\Theta_c$  кутів натікання та відтікання.



**Рисунок 5.2** — Узагальнена схема нагромадження похибок при вимірюванні крайового кута змочування

### 5.2.3 Аналіз виникнення похибки обробки зображення

Зображення краплі в пам'яті комп'ютера є дискретним — кожній точці зображення (пікселю) відповідає певна частина зображення краплі, що утворюється на матриці відеокамери, зі стороною  $\Delta l$ . При обробці програма оперує не лінійними розмірами зображення, що утворюється на матриці відеокамери, а розмірами дискретного зображення — пікселями. В такому випадку похибка визначення координати елементу зображення рівна одному пікселю. Обчислити похибку дискретизації можна диференціальним методом, подаючи залежність між кутом змочування, коефіцієнтами полінома (2.37) та точками, у яких потрібно визначити кут, у вигляді функції виду:

$$\Theta = f(a_{1c}, a_{2c}, a_{3c}, a_{13}, a_{23}, a_{33}, x_c, x_3), \quad (5.27)$$

де в свою чергу коефіцієнти полінома є функціями від множин точок отриманого контуру краплі з лівого та правого боків:

$$\begin{cases} a_{1c} = f_1(x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{nc}, y_{1c}, y_{2c}, \dots, y_{nc}); \\ a_{2c} = f_2(x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{nc}, y_{1c}, y_{2c}, \dots, y_{nc}); \\ a_{3c} = f_3(x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{nc}, y_{1c}, y_{2c}, \dots, y_{nc}); \\ a_{13} = f_4(x_{13}, x_{23}, \dots, x_{n3}, y_{13}, y_{23}, \dots, y_{n3}); \\ a_{23} = f_5(x_{13}, x_{23}, \dots, x_{n3}, y_{13}, y_{23}, \dots, y_{n3}); \\ a_{33} = f_6(x_{13}, x_{23}, \dots, x_{n3}, y_{13}, y_{23}, \dots, y_{n3}). \end{cases} \quad (5.28)$$

Аналітично розв'язуючи рівняння (5.27) та (5.28) за формулами (2.39) і (2.40) можна отримати аналітичний вираз рівняння (5.27). Використовуючи знайдений вираз можна диференціальним методом розрахувати похибку дискретизації зображення. При визначенні похибки таким шляхом є два недоліки. Отриманий аналітичний вираз є досить складним, таким чином не можна врахувати похибку від нерізкості зображення. З іншого боку, похибки, які виникають через нерізкість та дискретність зображення, є складовими

похибки, яка виникає при обробці зображення. Щоб довести це, згадаємо, що алгоритм обробки: зображення розбивається на частину, яка належить краплі та частину, яка належить фону. Межа розділення визначається рівнем яскравості. Якщо контур краплі є нерізким, то існує градієнт переходу кольору краплі в колір фону. Якщо змінювати рівень яскравості, то дістанемо для кожного рівня яскравості певний контур краплі. Елементи контуру якщо частково попадають на певний піксель засвічують його, що й створює похибки від дискретизації. Як видно з вище сказаного між похибками від дискретизації та нерізкості зображення існує зв'язок. Таким чином можна розглядати похибку обробки зображення як сукупність цих похибок. Для оцінки похибки обробки зображення можна скористатися методом обробки посередніх вимірювань з багатократним спостереженням аргументів [133]. Змінюючи рівень яскравості, можна отримати значення коефіцієнтів полінома (5.27) для кожного рівня яскравості. Так як точка контакту трьох фаз має координати (0,0), то для обчислення кута достатньо тільки коефіцієнта  $a_2$ . Отримані значення коефіцієнтів для контуру на рисунку 2.24 приведені в таблиці 5.1.

Методика обробки наступна.

1 Визначаємо середнє арифметичне значення кожної вибірки за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5.29)$$

2 Визначаємо оцінку СКВ результатів:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (5.30)$$

3 Визначаємо значення показника аномальності (параметр  $\beta_{\text{гран}}=2,18$  [11]):

$$v_i = \left| \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right|. \quad (5.31)$$

**Таблиця 5.1** — Значення отриманих коефіцієнтів для полінома

№ вимірювання	Значення $a_{13}$	Значення $a_{1c}$
1	-1,456	-1,52
2	-1,437	-1,432
3	-1,433	-1,432
4	-1,428	-1,432
5	-1,316	-1,405
6	-1,316	-1,387
7	-1,301	-1,325
8	-1,275	-1,282
9	-1,249	-1,241
10	-1,231	-1,215

Якщо  $\beta_{\text{гран}} < v_i$ , то такий результат є аномальним і вилучається з вибірки.

4 Здійснюємо перевірку результатів на відповідність певному закону розподілу. Перевірка здійснювалась за допомогою програми NUMERI. Згідно цієї програми результати в таблиці 5.1 відповідають рівномірному закону розподілу (перевірка здійснювалась за критерієм  $\chi^2$ , отримано значення:  $\chi^2_{\text{розр}}=12$ ,  $\chi^2_{\text{крит}}=16$ . Так як  $\chi^2_{\text{розр}} < \chi^2_{\text{крит}}$  закон є рівномірний).

5 Визначаємо результат вимірювання і розмах вибірки:

$$\tilde{a}_r = \frac{x_1 + x_n}{2}; \quad (5.32)$$

$$R = (x_n - x_1). \quad (5.33)$$

6 СКВ результату:

$$\sigma_{\tilde{a}_r} = \frac{R}{\sqrt{2(n+1)(n+2)}}. \quad (5.34)$$

7 Абсолютна похибка:

$$\Delta a_1 = z \cdot \sigma_{\tilde{a}_r}, \quad (5.35)$$

де  $z = \frac{1}{\sqrt{1 - P_{\text{зад}}}}$ ,  $P_{\text{зад}} = 0,95$ .

Результати обчислень за пунктами 1–7 наведені в таблиці 5.2.

8 Визначаємо середнє значення результату вимірювання:

$$\bar{\Theta} = f(a_{1c}, a_{13}) = \arccos\left(\frac{\cos(180 + \arctg(a_{1c})) + \cos(180 + \arctg(a_{13}))}{2}\right). \quad (5.36)$$

9 Абсолютна похибка результату вимірювання:

$$\Delta\Theta = \frac{\partial f}{\partial a_{1c}} \Delta a_{1c} + \frac{\partial f}{\partial a_{13}} \Delta a_{13}, \quad (5.37)$$

де

$$\frac{\partial f}{\partial a_{1c}} = \frac{a_{1c}}{2(1 + a_{1c}^2)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \left(\frac{1}{2(1 + a_{1c}^2)} + \frac{1}{2(1 + a_{13}^2)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (5.38)$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_{13}} = \frac{a_{13}}{2(1 + a_{13}^2)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \left(\frac{1}{2(1 + a_{1c}^2)} + \frac{1}{2(1 + a_{13}^2)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (5.39)$$

10. Середнє квадратичне відхилення результату вимірювання:

$$\sigma_{\Theta} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a_{1c}}\right)^2 \sigma_{a_{1c}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_{13}}\right)^2 \sigma_{a_{13}}^2 + 2R_K \frac{\partial f}{\partial a_{1c}} \frac{\partial f}{\partial a_{13}} \sigma_{a_{1c}} \sigma_{a_{13}}}, \quad (5.40)$$

де коефіцієнт кореляції:

$$R_K = \frac{\sum_{i=1}^n a_{1ci} a_{13i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{1ci} \cdot \sum_{i=1}^n a_{13i}}{n \cdot \sigma_{a_{1c}} \sigma_{a_{13}}}. \quad (5.41)$$

Відносну похибку обробки зображення можна знайти як

$$\gamma_3 = \frac{\Delta\Theta}{\bar{\Theta}}. \quad (5.42)$$

$$\gamma_3 = \frac{1,471}{126,419} = 0,0116\%.$$

**Таблиця 5.2** — Результати обчислень похибки визначення контура краплі

Назва величини	Значення для контуру зліва	Значення для контуру справа
Середнє арифметичне $\bar{x}$ .	-1,344	-1,367
СКВ результатів $\sigma_x$	0,086	0,098
$v_1$	1,304	1,565
$v_2$	1,083	0,664
$v_3$	1,036	0,664
$v_4$	0,978	0,664
$v_5$	0,329	0,388
$v_6$	0,329	0,204
$v_7$	0,504	0,431
$v_8$	0,807	0,871
$v_9$	1,111	1,291
$v_{10}$	1,320	1,557
Результат вимірювання $\tilde{a}_r$	-1,344	-1,368
Розмах вибірки R	0,225	0,305
СКВ результату $\sigma_{\tilde{a}_r}$	0,014	0,019
Абсолютна похибка $\Delta a$	0,062	0,084

Результати обчислень за пунктами 8–10 наведені в таблиці 5.3.

**Таблиця 5.3** — Результат обчислень похибки

Назва величини	Значення
Середнє значення результату вимірювання $\bar{\Theta}$	126,419°
Абсолютна похибка результату вимірювання $\Delta\Theta$	1,471°
Відносна похибка $\gamma_z$	0,0116
Середнє квадратичне відхилення результату вимірювання $\sigma_{\Theta}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$

Як видно з таблиці 5.3 похибка обробки зображення має значний вплив на точність вимірювання. Зменшити цю похибку можна декількома шляхами. Одним методом є вдосконалення алгоритму обробки зображення, який полягає в більш точному відтворенні контуру краплі за допомогою спеціальних алгоритмів. Другим методом є отримання зображення з більшою роздільною здатністю, це можна реалізувати використовуючи відеокамеру з більшою кількістю елементів у матриці. Вплив на величину похибки має кількість точок, що береться на контурі краплі. При збільшенні кількості точок до певної величини похибка буде зменшуватись. Якщо взяти занадто велику кількість точок похибка буде зростати через погіршення точності апроксимації в точці контакту трьох фаз

#### 5.2.4. Визначення результуючої похибки

Сумарну відносну похибку можна знайти як:

$$\gamma_P = \sqrt{\gamma_E^2 + \gamma_Z^2}, \quad (5.43)$$

$$\gamma_P = \sqrt{10^{-8} + 0,0116^2} = 0,0116.$$

Визначимо абсолютну похибку:

$$\Delta\Theta_{\Sigma} = \gamma_P \cdot \bar{\Theta} = 0,0116 \cdot 126,419 = 1,471^\circ.$$

Порівнюючи отримане значення  $\Delta\Theta_{\Sigma}$  із значенням  $\Delta\Theta$  в таблиці 5.3 можна сказати, що похибка вимірювання в основному визначається похибкою обробки зображення.

### 5.3 Метрологічний аналіз приладу для контролю змочуваності пористих

#### тіл

Згідно виразу (3.42) величина змочування пористих тіл залежить від ряду параметрів які визначаються з легковстановлюваними похибками. В такому випадку розрахунок похибки визначення змочування доцільно здійснювати



диференційним методом. Абсолютна похибка вимірювання змочування за виразом (3.42) визначається за формулою

$$\Delta \cos \theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial V_0}\right)^2 \cdot (\Delta V_0)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial S} \cdot \Delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial \varepsilon} \cdot \Delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial \sigma} \cdot \Delta \sigma\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial \mu} \cdot \Delta \mu\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial P_0} \cdot \Delta P_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial P} \cdot \Delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \theta}{\partial \left(\frac{dP}{dt}\right)} \cdot \Delta \left(\frac{dP}{dt}\right)\right)^2}. \quad (5.44)$$

Продиференціювавши вираз (3.42) за кожною змінною отримуємо такі частинні похідні

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial V_0} = \frac{1}{S \varepsilon \sigma} \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)} = \frac{1}{S \varepsilon \sigma} \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)} \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial S} = -\frac{V_0}{S^2 \varepsilon \sigma} \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)} = -\frac{V_0}{S^2 \varepsilon \sigma} \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}; \quad (5.47)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial \varepsilon} = -\frac{V_0}{S \varepsilon^2 \sigma} \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)} = -\frac{V_0}{S \varepsilon^2 \sigma} \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}; \quad (5.48)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial \sigma} = -\frac{V_0}{S \varepsilon \sigma^2} \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)} = -\frac{V_0}{S \varepsilon \sigma^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}; \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial \mu} = \frac{\left(2 \frac{P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right) \cdot V_0}{S \varepsilon \sigma \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)}} = \frac{V_0 \cdot 2 \frac{P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}{S \varepsilon \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}}; \quad (5.50)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial P_0} = \frac{V_0 \left(\frac{2 \mu}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{4 \mu P_0}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)}{S \varepsilon \sigma \sqrt{\left(\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2 \mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt}\right)}} = \frac{V_0 \cdot 2 \frac{\mu}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}{S \varepsilon \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)}}; \quad (5.51)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial P} = \frac{V_0 \left( -\frac{2\mu P_0}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{4\mu P_0^2}{P^3} \cdot \frac{dP}{dt} \right)}{S\varepsilon\sigma \sqrt{\left( \frac{2\mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2\mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt} \right)}} = \frac{V_0 \cdot 2 \frac{\mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left( -\frac{1}{P} + 2 \frac{P_0}{P^2} \right)}{S\varepsilon\sigma \cdot \sqrt{\frac{2\mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right)}}; \quad (5.52)$$

$$\frac{\partial \cos \theta}{\partial \left( \frac{dP}{dt} \right)} = \frac{V_0 \left( \frac{2\mu P_0}{P} - \frac{2\mu P_0^2}{P^2} \right)}{S\varepsilon\sigma \sqrt{\left( \frac{2\mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{2\mu P_0^2}{P^2} \cdot \frac{dP}{dt} \right)}} = \frac{V_0 \cdot 2 \frac{\mu P_0}{P} \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right)}{S\varepsilon\sigma \cdot \sqrt{\frac{2\mu P_0}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right)}}. \quad (5.53)$$

Вибравши типові значення параметрів, які входять в вираз (3.42), визначимо значення частинних похідних за виразами (5.46-5.53).

Типові значення параметрів встановлюються наступні. Площа основи керна  $S=5,7 \text{ см}^2$  і похибка її визначення при вимірюванні розмірів керна мікрометром становитиме  $\Delta S=0,04 \text{ см}^2$ .

Об'єм газової фази у керні перед початком змочування  $V_0=3,5 \text{ см}^3$  і похибка його визначення  $\Delta V_0=0,307 \text{ см}^3$ . Початковий тиск  $P_0$  над керном не перевищує  $0,5 \text{ кПа}$ , а кінцевий тиск  $P$  в середньому становить  $2,5 \text{ кПа}$ . Абсолютна похибка каналу вимірювання тиску, як було встановлено в п.5.1 не перевищує  $\Delta P=0,008 \text{ кПа}$ . Пористість кернів становить в середньому  $\varepsilon = -0,25$  із абсолютною похибкою  $\Delta \varepsilon=0,00625$  при вимірюванні на приладі "Експресс-пор". Поверхневий натяг рідин вимірювався приладом ППНП-1 з відносною похибкою  $1,5\%$ , що для дистильованої води з поверхневим натягом  $\sigma=72,5 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$  визначає абсолютну похибку  $1,08 \frac{\text{мН}}{\text{м}}$ . Вязкість рідин вимірювалась віскозиметром ВНД-2 з відносною похибкою  $1,5\%$ , що для води визначало абсолютну похибку  $\Delta \mu=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Похибка зміни тиску в часі визначається як  $\frac{\Delta P}{\Delta t}=0,008 \frac{\text{кПа}}{\text{с}}$ . Підставляючи наведені вище значення параметрів і їхні похибки у вирази (5.46-5.53) знайдемо значення частинних похідних:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \theta}{\partial \varepsilon} &= -0,107; & \frac{\partial \cos \theta}{\partial \sigma} &= 0,299; \\ \frac{\partial \cos \theta}{\partial \mu} &= 21,43; & \frac{\partial \cos \theta}{\partial P_0} &= 0,00003; \\ \frac{\partial \cos \theta}{\partial P} &= -0,0006427; & \frac{\partial \cos \theta}{\partial \left( \frac{dP}{dt} \right)} &= 0,0027; \\ \frac{\partial \cos \theta}{\partial S} &= -35,58; & \frac{\partial \cos \theta}{\partial V_0} &= 6121,0. \end{aligned}$$

Отримані значення частинних похідних підставляємо у формулу (5.45) разом із значеннями абсолютних похибок параметрів і одержимо абсолютну похибку визначення величини змочування  $\cos\theta$ :

$$\begin{aligned} \Delta \cos \theta = & \sqrt{(0.307 \cdot 10^{-6} \cdot 6121.0)^2 + (0.04 \cdot 10^{-4} \cdot 35.58)^2 + (0.107 \cdot 0.00615)^2 +} \\ & + (0.299 \cdot 1.08 \cdot 10^{-3})^2 + (21.43 \cdot 1.5 \cdot 10^{-5})^2 + (3.215 \cdot 10^{-5} \cdot 8)^2 + (0.0006427 \cdot 8)^2 + \\ & + (0.0027 \cdot 8)^2 = \sqrt{(0.001879)^2 + (0.000142)^2 + (0.000658)^2 + (0.000323)^2 + (0.000322)^2 +} \\ & + (0.000257)^2 + (0.00514)^2 + (0.021603)^2} = 0.0223 \end{aligned}$$

Прийнявши до уваги, що максимальне значення функції косинуса рівна одиниці, то відносна приведена похибка буде становити

$$\gamma = \frac{\Delta \cos \theta}{\cos \theta^0} \cdot 100\% = 2,23\%.$$

## РОЗДІЛ 6

### ВИПРОБУВАННЯ ПРИЛАДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАНOSTІ ТВЕРДИХ ТІЛ.

Випробування приладів ВКЗ-1, ВКЗО-1 та ВЗПТ-1 проводились з метою підтвердження достовірності теоритичних і експерементальних досліджень, які були описані в попередніх розділах і закладені в основу розроблених приладів.

В процесі випробувань були перевірена працездатність запропонованих методів контролю змочуваності твердих тіл: монолітних і пористих.

Випробування проводились в науково-дослідній лабораторії кафедри “Методи і прилади контролю якості ” Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а також в лабораторії ДП “ Колоран ” Інституту фізичної хімії НАН України.

В процесі випробувань були проведені визначення ККЗ монолітних і пористих тіл ( кернів ) різними рідинами. Оскільки довідкових даних значень ККЗ для різних пар взаємодіючих твердих тіл і рідин на даний час немає, то для порівняння результатів визначення ККЗ за допомогою розроблених приладів ВКЗ-1 і ВКЗО-1, використовувались взаємні порівняння ККЗ,отриманих з використанням цих приладів, а також результатів вимірювання ККЗ безпосереднім оптико-механічним методом.

Розроблені прилади ВКЗ-1, ВКЗО-1 та ВЗПТ-1 виготовлені в науково дослідній лабораторії розробки методів і засобів вимірювання фізико-механічних параметрів на кафедрі методів і приладів контролю якості і сертифікації продукції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

### 6.1 Результати лабораторних випробувань

Перед початком вимірювань прилади прогріваються впродовж 15 хв, а досліджувані тверді тіла разом з вимірювальним капіляром для приладу ВКЗ-1 піддавались очищенню в кілька етапів. Очищення досліджуваних зразків і капіляра здійснювались спочатку розчинниками жирів та нафтопродуктів, після чого - розчином біхромату калію в концентрованій сірчаній кислоті, далі промивались в проточній воді і, накінець, промивались в дистильованій воді і просушувались.

Випробування показали, що при дослідженні твердих тіл чистими речовинами забезпечується висока точність вимірювання, як за допомогою приладу ВКЗ-1, так і за допомогою приладу ВКЗО-1, про що свідчать порівняння результатів вимірювання, наведені в табл.1. Причому результати визначення ККЗ, отримані за допомогою приладу ВКЗО-1 є ближчими до результатів отриманих безпосередніми вимірюваннями. Характерним є також те, що результати отримані за допомогою , приладу ВКЗ-1 є дещо меншими. Це пояснюється тим, що в приладі ВКЗ-1 дається інтегральна оцінка ККЗ, а також тим, що все-таки значення ККЗ, отримуване методом максимального тиску в газовому містку не є повністю рівноважним, а має в деякій мірі характер ККЗ відтікання.

Випробування приладу ВКЗ-1 підтвердили можливість дослідження кінетики процесу змочування. Це здійснювалось шляхом регулювання подавання газу у вимірювальний капіляр при незмінній відстані між вихідним торцем капіляру та поверхнею досліджуваного матеріалу. Результати визначення ККЗ для системи “мідь-вода” при різних часах формування капілярного газового містка приведено у табл.2.

Як видно з результатів (у табл.2) на горизонтальній поверхні твердого тіла внаслідок фізико-хімічної взаємодії рідини і твердого тіла проявляється статичний гістерезис ККЗ. Причому, чим більший час існування газового містка, тим меншим є значення ККЗ.

Таблиця 6.1. Результати визначення ККЗ в лабораторних умовах

Взаємодіючі фази	Одержанні значення крайового кута змочування, град.			
	На приладі ВКЗ-1	На приладі ВКЗО-1		
		наступаючий	відступаючий	статичний
Вода-тефлон	92.5	105.2	51.8	95.1
Гліцерин-тефлон	98.1	108.6	60.7	100.4
Вода-поліетилен	91.6	98.5	72.4	93.1
Гліцерин-поліетилен	80.6	88.3	47.4	81.2
Вода-парафін	99.3	110.4	56.8	102.1
Спирт-етиловий парафін	96.4	108.1	47.9	97.2
Вода-скло	10.8	82.5	6.2	13.2
Вода-мідь	70.9	90.6	55.7	76.1
Вода-склотекстоліт	61.2	85.6	42.8	59.7
Вода-кремній	27.8	48.7	14.6	30.1
Вода-сталь	77.1	83.2	33.9	75.8

Таблиця 6.2. Результати визначення динамічного ККЗ на приладі ВКЗ-1 для системи мідь-вода.

Час, с	2	5	11	42	93	179	293	622
ККЗ, Град.	76.2	76.3	76.2	75.7	75.4	73.6	72.3	70.4

При дослідженні ККЗ за допомогою приладу ВКЗ-1 виявилось, що на межі стійкості капілярного містка, що відповідає максимальному тиску у ньому, процес є чутливим до вібрацій, випадкових поштовхів, флуктуацій тиску та інших параметрів. Тому для більшої вірогідності результатів вимірювання слід брати усереднені результати від кількох ( не менше п'яти ) вимірювань утворень капілярних газових містків.

Для дослідження динамічного гістерезису ККЗ на приладі ВКЗО-1 нахиливали столик із досліджуваним твердим тілом, на поверхні якого нанесено краплю досліджуваної рідини. Нахилення столика проводилось до тих пір, поки крапля не почне поволі рухатись, тоді столик на  $2^{\circ}$ - $3^{\circ}$  повертали назад, до зупинки руху краплі, і проводили вимірювання наступаючого та відступаючого кутів.

Для виключення можливості виникнення додаткових похибок визначення ККЗ під час експериментів на приладі ВКЗО-1 весь час дотримувались формування одного розміру крапель. З цією метою для нанесення крапель використовувався шприц-дозатор.

Лабораторні випробування приладу ВПЗТ-1 проводились на кернах діаметром 27 мм, отриманих при бурінні розвідувальних свердловин нафтових родовищ. Спочатку досліджували змочування необроблених кернів. Для наступних випробувань керни випарювались гарячою парою з метою очищення пор у зразку породи. Потім керни осушувались в сушильній шафі при температурі  $160^{\circ}\text{C}$ .

Графіки експериментальних залежностей зміни тиску в герметичній камері над досліджуваними кернами, змочуваних знизу водою, приведено на рис. 6.1.

Похідні зміни тиску  $\frac{dP}{dt}$  визначались на початкових етапах зростання тиску і становили для кожного з кернів відповідно:

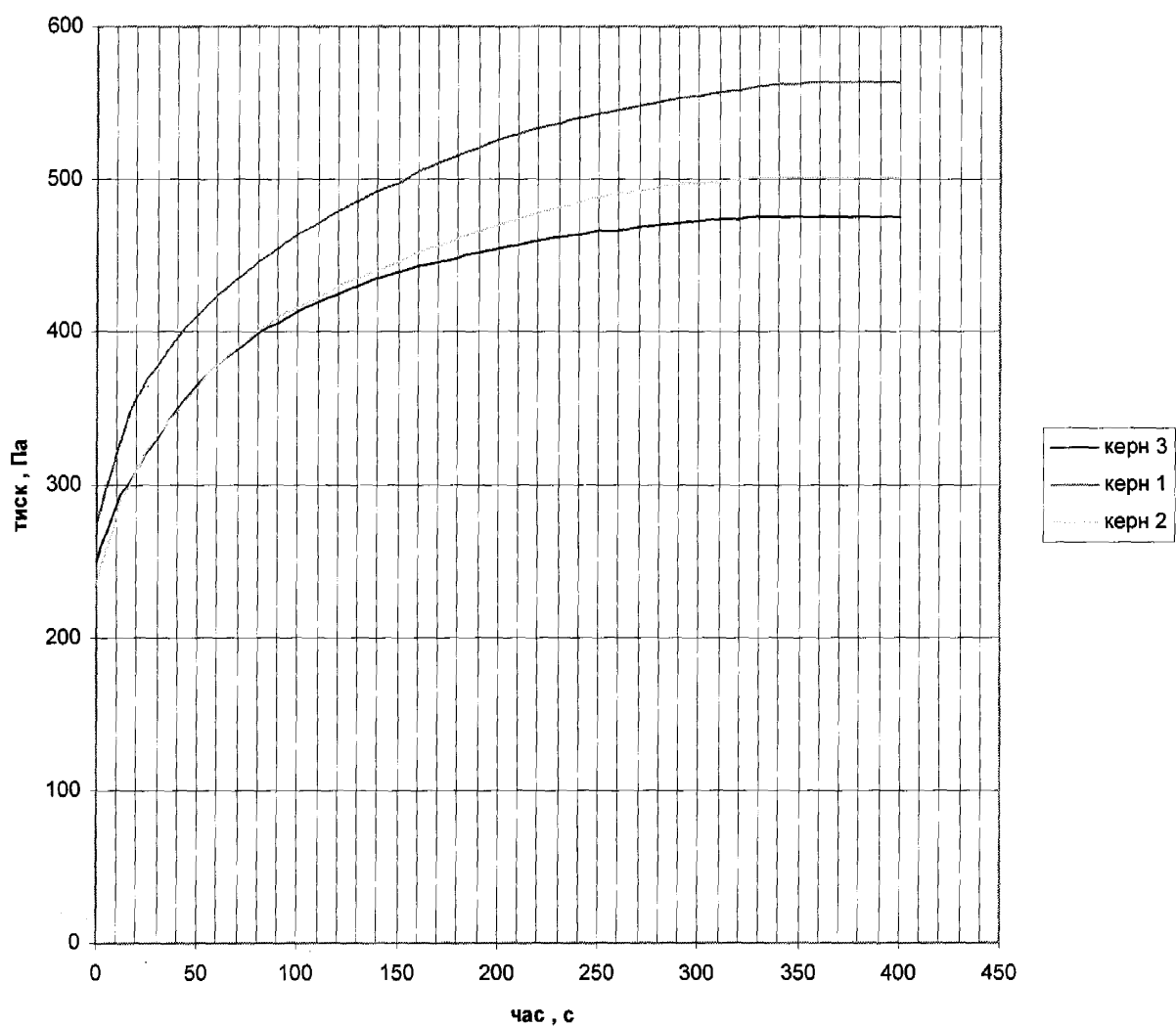


Рис. 6.1. Графіки експериментальних залежностей зміни тиску для необроблених кернів у процесі їх змочування.



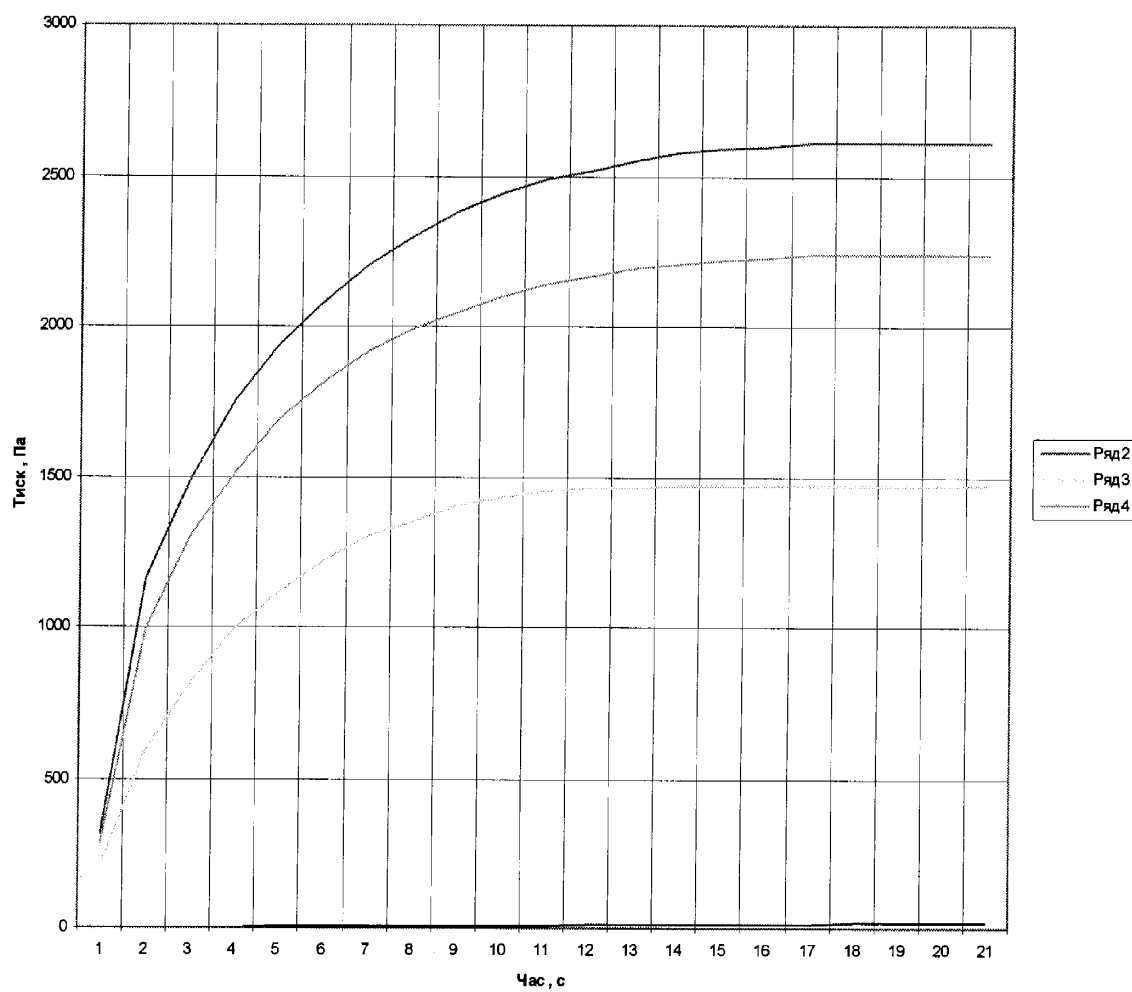


Рисунок 6.2 Графіки експериментальних залежностей зміни тиску для випарених кернів у процесі їх змочування

для випарених кернів:  $\frac{dP_1}{dt}=841,25 \frac{\text{Па}}{\text{с}}$ ;  $\frac{dP_2}{dt}=373,81 \frac{\text{Па}}{\text{с}}$ ;  $\frac{dP_3}{dt}=783,36$

$\frac{\text{Па}}{\text{с}}$ , і для необроблених кернів:  $\frac{dP_1}{dt}=4,723 \frac{\text{Па}}{\text{с}}$ ;  $\frac{dP_2}{dt}=4,381 \frac{\text{Па}}{\text{с}}$ ;

$\frac{dP_3}{dt}=3,724 \frac{\text{Па}}{\text{с}}$ .

Параметри кернів та результати випробувальних визначень величини змочуваності кернів приведено в табл.6.3.

Таблиця 6.3. Результати досліджування змочування кернів із теригенного піщаника.

№ кер-на	Об'єм керна $V, \text{см}^3$	Пло-ща пере-різу $S, \text{см}^2$	Пори-стість $\epsilon, \%$	$V_0, \text{см}^3$	$P_0, \text{Па}$	$P, \text{Па}$	$dp/dt, \text{Па/с}$	$\text{Cos}\theta$	$\theta, \text{град.}$
Після випарювання									
1	21.33	5.723	11.2	3.6	317.1	2610.5	841.25	0.32886	70.80
2	27.64	5.613	8.4	3.5	216.4	1465.4	373.81	0.3173	71.50
3	23.45	5.702	9.6	3.45	285.7	2242.3	738.36	0.35511	69.20
До випарювання									
1	21,33	5,723	11,2	3,60	273,3	564,2	4,723	0,03762	87,8
2	27,64	5,613	8,4	3,52	237,1	502,5	4,381	0,15217	81,2
3	23,45	5,702	9,6	3,45	249,0	475,2	3,724	0,11848	83,2

Випробування приладу ВПЗТ-1 підтвердили можливість визначення змочуваності кернів запропонованим в роботі методом.

Результати вимірювань показують для всіх трьох кернів після випарювання зменшення ККЗ, тобто покращення змочуваності (підвищення гідрофільності). Що є результатом видалення залишків нафти із пор керна в процесі випарювання.

## **6.2. Результати промислових випробувань приладів.**

За допомогою приладів ВКЗ-1 та ВКЗО-1 досліджували нові рецептури пенетрантів, розроблених державним підприємством “Колоран” Інституту фізичної хімії НАН України. Дослідження пенетрантів для більшої достовірності результатів вимірювання проводились одночасно обома приладами. Метою досліджень були як перевірка роботоздатності розроблених приладів, так і вироблення рекомендацій щодо особливостей використання нових пенетрантів. Для цього було підготовлено відполіровані зразки досліджуваних твердих тіл зі сталі, алюмінію, нікелю та латуні. Пенетранти досліджувались на предмет змочування різних матеріалів при різних концентраціях для визначення оптимальної їх концентрації без погіршення змочування.

Результати промислових випробувань, проведених на базі ДП “Колоран” Інституту фізичної хімії НАН України, показали близькість значень ККЗ, отриманих двома різними методами за допомогою приладів ВКЗ-1 та ВКЗО-1 [135]. Результати промислових досліджень приведені в табл.6.4.

Промислові випробування приладів ВКЗ-1 та ВКЗО-1 показали перевагу другого приладу у продуктивності проведення вимірювань внаслідок порівняно дуже малої підготовки до проведення вимірювань на кожному наступному зразку твердого тіла.

Таблиця 6.4. Результати визначення змочуваності матеріалів пенетрантами за допомогою приладів ВКЗ-1 та ВКЗО-1 в промислових умовах.

Рідини	Крайовий кут змочування, град					
	Сталь		Латунь		Алюміній	
	ВКЗО-1	ВКЗ-1	ВКЗО-1	ВКЗ-1	ВКЗО-1	ВКЗ-1
1	2	3	4	5	6	7
ЦЖ-1	28.2	27.1	22.6	22.4	24.5	23.7
ЦЖ-2	14.0	13.2	8.6	8.5	9.6	9.4
ЦЖ-3	14.3	13.4	13.5	13.3	15.5	15.3
Гас	4.9	5.1	5.0	5.3	5.3	5.6
СП-1	11.6	11.4	11.4	11.2	10.5	10.3
СП-2	15.6	15.2	8.7	8.3	11.5	11.2
СП-3	12.7	12.4	15.0	14.3	17.2	16.5
СП-4	14.2	13.6	23.1	22.4	14.8	14.2
СП-5	21.9	21.4	19.8	19.3	18.5	18.2
СП-6	19.0	18.1	19.8	19.3	15.1	14.5
СП-7	20.2	19.2	20.1	19.4	15.2	14.6
СП-8	9.7	9.2	21.5	20.6	11.7	11.4
СП-9	28.5	27.3	34.1	32.6	22.8	22.4
СП-10	25.3	24.6	21.4	20.5	19.0	18.4
СП-11	203	19.2	17.7	17.1	7.1	6.3

### Висновки до розділу 6.

1. Прилади ВКЗ-1 та ВКЗО-1 забезпечують високу точність визначення ККЗ поверхонь твердих тіл рідинами. Вони дають можливість визначити як рівноважні, так і динамічні значення ККЗ.
2. Результати промислових випробувань, підтвердили правильність теоретичних основ запропонованих методів визначення ККЗ, які лягли в основу розроблених приладів.
3. Результати промислових випробувань показали можливість використання приладу ВКЗО-1 як для точних вимірювань, так і для експрес-аналізу змочування швидко випаровуваними рідинами.

Випробування приладів показали можливість використання приладів ВКЗО-1, ВКЗ-1, ВЗПТ-1 у заводських та науково-дослідних лабораторіях.

## ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу відомих методів та засобів контролю ККЗ обґрунтовано розроблення нових методів контролю ККЗ, оснований на вимірюванні максимального тиску в газовому містку, на вимірюванні геометричних параметрів профілю краплі рідини на поверхні досліджуваного твердого тіла, а також на вимірюванні капілярного тиску в процесі змочування пористого тіла досліджуваними рідинами. Ці методи найбільш придатні з точки зору автоматизації процесу контролю ККЗ, забезпечення відповідної точності результатів контролю, простоти реалізації і часу на їх проведення.

2. Розроблені математичний опис процесу утворення газового містка між капіляром та досліджуваною поверхнею твердого тіла в рідині, а також методика і програма чисельного розрахунку параметрів газового містка на різних стадіях його утворення. Це дало можливість визначити екстремальні параметри газового містка, зокрема, максимальний тиск в ньому і встановити однозначну залежність вказаного тиску від радіусу капіляру, висоти газового містка, параметрів рідини і ККЗ і, таким чином, запропонувати новий метод контролю ККЗ.

3. Проведено аналіз і оцінена методична похибка отриманої поліноміальної залежності між косинусом ККЗ і виміряним максимальним тиском в газовому містку, яка не перевищує 0,35%.

4. Числове моделювання форми краплі рідини на поверхні твердого тіла дало можливість за допомогою апроксимації отримати аналітичні вирази для зв'язку величини ККЗ: а) з висотою, максимальним діаметром і площею профілю краплі; б) з координатами точок лінії профілю краплі. В результаті запропоновані такі методи контролю ККЗ: шляхом вимірювання висоти, площі профілю і максимального діаметру лежачої краплі, а також шляхом вимірювання діаметру основи краплі і координат лінії її профілю.

5. На основі аналізу математичної моделі процесу змочування пористого твердого тіла рідиною одержано аналітичну залежність величини ККЗ від зміни

капілярного тиску в пористому тілі внаслідок його змочування рідиною, в результаті чого розроблено метод контролю ККЗ пористих тіл.

6. Розроблено прилад (ВКЗ-1) для контролю ККЗ монолітних твердих тіл за методом максимального тиску в газовому містку, який дозволяє контролювати неперервно в автоматичному режимі кінетику змочування зразка твердого тіла та отримувати інтегральну оцінку змочування.

7. Розроблено оптико-електронний прилад ВКЗО-1 для контролю ККЗ шляхом визначення геометричних параметрів профілю лежачої краплі рідини на поверхні досліджуваного твердого тіла, що дозволяє контролювати процес змочування швидко випаровуваними рідинами, об'єктів різної форми та встановлювати ізоморфізм поверхні твердого тіла по периметру краплі.

8. Розроблено прилад ВЗПТ-1 для контролю ККЗ пористих твердих тіл (наприклад, керна нафтоносних порід) шляхом вимірювання швидкості зміни тиску у камері над пористим тілом у процесі його змочування досліджуваною рідиною.

9. Здійснено метрологічний аналіз розроблених приладів для контролю ККЗ суцільних і пористих твердих тіл. В результаті встановлено, що приведені похибки вказаних вище приладів: прилад ВКЗ-1-1,5%; ВКЗ-1-1,6%, ВПЗТ-1-2,36%

10. Проведено лабораторні та промислові випробування розроблених приладів, результати яких підтвердили правильність теоретичних розробок і працездатність розроблених засобів контролю ККЗ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петрянов-Соколов И.В. Коллоидная химия и научно-технический прогресс. – М.: Наука. – 1988. – 180 с.
2. Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник / Под ред. Я.М.Колотыркина. М.: Химия. – 1988. – С. 180-220.
3. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия. – 1981. – 304 с.
4. Ребиндер П.А. Поверхностно-активные вещества. – М.: Знание. – 1960. – 46 с.
5. Поверхностные явления и поверхностные вещества: Справочник / А.А.Абрамзон, Л.Е.Боброва, Л.П.Зайченко и др. Л.: Химия. – 1984. – 392 с.
6. Физико-химические основы применения поверхностно-активных веществ / П.Р.Траубе и др. Часть 1. Пенза. – 1970. – 133 с.
7. Спринг С. Очистка поверхности металлов. Пер. с англ. / под ред. О.И.Бабикова. М.: Мир. – 1966. – 349 с.
8. Гоковина М.П., Зайченко Л.П. Влияние ПАВ на краевой угол смачивания / Коллоидный журнал. 1978. – № 2. – 311 с.
9. Шернан Ф. Эмульсии: Пер. с англ. / под ред. А.А.Абрамзона. Л.: Химия. – 1972. – 448 с.
10. Применение поверхностно-активных веществ с целью увеличения нефтеотдачи. Г.А.Бабалян и др. М.: Недра. – 1970. – 109 с.
11. Кравченко И.И., Бабалян Г.А. Адсорбция ПАВ в процессах добычи нефти. М.: Недра. – 1971. – 159 с.
12. Физико-химические основы применения поверхностно-активных веществ при разработке нефтяных пластов. Бабалян Г.А., Кравченко И.М. и др. М.: Госоптехиздат. – 1962. – 283 с.
13. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия. – 1976. – 232 с.



14. Ребиндер П.А. и др. Физикохимия флотационных процессов. – М.: Металлургия. – 1933. – 230 с.
15. Грембовицкий В.А., Классен В.И., Плаксин И.И. Флотация. – М.: Госсорттехиздат. – 1961. – 547 с.
16. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия. – 1974. – 416 с.
17. Сульмах Г.П. Обогащение руд флотацией: Перд. с англ. / под ред. С.М.Ненюсевича. – М.: Цветметиздат. – 1932. – 52 с.
18. Козаровский А.А. Бумага и краска в процессе печатания. М.: Книга. – 1965. – 367 с.
19. Гупп Э. Химия и физика плоской печати: Пер. с англ. / под ред. Н.И.Синакова. – М.: Искусство. – 1957. – 157 с.
20. Becher P., Becher D. The effect of Hydrophilelipophile balance on Contact Angle of Solutions of Nonionis Surface Active Agents. – Advances in Chemistry series 86 ku. 1969. – № 86. – p. 15-23.
21. Великовский Д.С. и др. Консистентные смазки. – М.: Химия. – 1966. – 256 с.
22. Трамкан В. Борьба с вредителями: Пер. с нем. / под ред. А.М.Сигристского. Л.: Сельхозизд. – 1932. – 380 с.
23. Гар К.А. Химия в с.х. 1970. – Т. 8. – № 1. – 29-31 с.
24. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика: изб. тр. – М.: Наука. – 1979. – 381 с.
25. Быховский А.И. Растекание. – Киев. – Наукова думка. – 1983. – 192 с.
26. Schwartz A.M., Tejada S.B. Studies of dynamik contract Angees on solides. – J. Col. Inter. Sci., – 1972. Vol. 38. – № 2. – p. 359-375.
27. П.Ж. де Жен. Смачивание: статика и динамика. Успехи физических наук. Т. 151. – Вып. 4. – 1987.
28. Defay R., Petre G. Dynamic Surface Tension. Jonm. Surface and Collid Science, New York, Wiley Interscience. – 1971. – V. 3. – p. 27-81.
29. Elliat G.E.P., Riddiford A.C. Contact Angles Recent Progresse in Surfase and Colloide Science, 1964. – V. 2. – p. 111-128..

30. Welygan D.G. Bums C.M. Dynamic Contact Angles of Viscous Ziquids. *Journ. Adhesion*, 1980. – V. 11. – p. 41-55.
31. Oliver I.E., Mason S.G. Liquid Spreading on Rough Maice Surfase. *Journ. of Materials Sci.*, 1980. – № 15. – p. 431-437.
32. Ребиндер П.А. Физико-химия моющего действия. – М.: Пищепромиздат. – 1935. – 163 с.
33. Rehbinden P.A. Uber Grenzflächenactivital bzw. – energie an verschiedenen Grenzflächen and deren spezifischen Adsorbtion svermoden. – *Bioch. Z.*, 1927. – Ed. 181. – p. 19-31.
34. Пугачевич П.П., Бкгляров Э.М., Павшин И.А. Поверхностные явления в полимерах. – М.: Химия. – 1982. – С. 108-170.
35. Іващенко Ю.М., Єременко В.Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів за методом лежачої краплі. К.: Наукова думка. – 1972. – 232 с.
36. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. – Л.: Химия. – 1967. – 388 с.
37. Русанов А.И., Прохоров В.А. Межфазная тензометрия. – Санкт-Петербург. Химия. – 1994. – 397 с.
38. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Phil. Trans. Royal Sos. of London*. 1805, 1. – p. 65-87.
39. Laplace P.S. Theorie der Kraft, welcje in der Haarrohren und bei Annlichen Erscheiniingenwirkt. Frei ubersetzt mit einigen Aninerkunden von Brandes und Giebert. *A. Phys. und Chim.*, 1809, Ed. 33, s. 1-114; 117-182; 275-338; 373-394.
40. Адамсон Ф. Физическая химия поверхностей: пер. с англ. / Под ред. З.М.Зорина, В.М.Муллера. М.: Мир.– 1979. – 568 с.
41. Good R.J. Contact Angles and the surface Free Energy of Solids. *Surface and Colloid Sci.*, 1979. – V. 11. – p. 1-29.
42. Kioubek J. Messuny der Method maximalen Blasendrucks. – *Tenside*. 1958. – V. 5. – s. 11-12, 317-323.

43. Padday J.F. Heights of Sessile Drops and Meniscus Properties. – *Nature*. – 1963. V. 198. – № 4878. – p. 378-379.
44. Padday J.F. The Profiles of Axially Symmetric Menisci. *J. Phil. Trans. Of the Royal Soc. of London. A. Mathematical and Physical Science*. 1971. – V. 269. – p. 265-293.
45. Neumann A.W., Good P.J. Thermodynamics of Contact Angle. I. Heterogeneous Solid Surface. *J. Col. Inter. Sci.*, 1972. – V. 38. – № 62. – p. 341-358.
46. Neumann A.W., Good P.J., Nepe Z.J., Seipdl M. An Equation of State Approach to Determine Surface Tension of Low-Energy Solids from Contact Angle. *J. Col. Inter. Sci.* 1974. – V. 49. – № 2. – p. 291-304.
47. Neumann A.W., Absolam D.R., Francis D.W. and Vanoss C/J/ Conversion Tables of Contact Angles to Surface Tensions. *Separation and Purification Methods*. 1980. – V. 9. – № 1. – p. 69-163.
48. Путьель Ф.Я., Глигорский С.Д. Искусственная почка и ее применение. М.: Медиздат. – 1961. – 292 с.
49. Орлов Н.Ф., Иванов Г.В., Андросов В.Ф. Изв. ВУЗ. Технологическая текстильная промышленность. 1968. – № 5. – с. 88-91.
50. Фролов Ю.Т. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия. – 1982. – 400 с.
51. Чизмаджась Ю.А. и др. Макрокинетика процессов в пористых средах. – М.: Наука. – 1971. – 363 с.
52. Ellison A.M. Zisman W.A. *Journ. Phys. Chem.* 1954. – V. 58. – № 3. – p. 260-265.
53. Fowkes F.M. *Journ. Col. Inter. Sci.* 1968. – V. 28. – № 3-4. – p. 493-505.
54. Bandham D.H. and Rasouk R.Z. *Trans. Faraday Soc.* 1937. – V. 33. – p. 1459.
55. Dupre A. *Theories mechanique de la chaleur*. Couthier. – Villars, Paris. 1869. – p. 369.
56. Boyd G.F. and Livingston U.K. *Journ. Amer. Chem. Soc.* 1942. – V. 64. – № 10. – p. 2383-2388.

57. Harkins W.D. and Loeser E.H. Journ Chem. Phys. 1958. – V. 28. – № 4. – p. 556-569.
58. Loeser E.H., Harkins W.D. and Twiss S.B. Journ Ohys. Chem. 1953. – V. 57. – p. 251-254.
59. Zisman W.A. Contact Angle, Wettability and Adhesion. Advan. Chein. – 1964. – № 43. – p. 1-51.
60. Granams D.P. Journ. Phys. Chem. 1964. – V. 68. – p. 2788, 1965. – V. 69. – p. 4387.
61. Whalen J.W. Journ. Coll.Interface Sci. 1968. – V. 28. – p. 443.
62. Wade W.H. and Whalen J.W. Journ. Phys. Chem. 1968. – V. 72. – p. 2898.
63. Tadors M/E/, Hu P. and Adamson A.W. Journ. Coll. Interface Sci. 1974. – V. 49. – p. 184.
64. Good R.J. Journ. Coll. Interface Sci., 1975. – V. 52. – p. 308.
65. Cherry B.W. Aspects of Surface Chemicty and Morfology in Plastics, Surface and finish. S.H. Pinner and W.G.Simpson (Eds), Butterworth, London. – 1971. – p. 217-242.
66. Johnson R.E., Dettre R.M. Wettability and Contact Angle. Journ. Surface and Coll. Sci, New York, Wiley Interscience, 1970. – V. 2. – p. 65-153.
67. Shuttlewortli R. and Bailey G.L. F. Dise. Faraday Soc. 1948. – V. 3. – p. 16.
68. Johnson R.E. and Dettre R.H. in Contact Angle Wettability and Adhesion. ACS Adr. Chem. Ser. – 1964. – V. 43. – p. 112.
69. Cassie A.B.D. and Baxter S. Trans, Faraday Soc. – 1944. – V. 40. – p. 546-551.
70. Baxter S. and cassie A. B. D. Journ. Text. Inst. – 1945. – V. 36. – p. 767.
71. Cassie A.B.D. Disc. Faraday Soc. – 1948. – V. 3. – p. 11.
72. Кайдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. – К.: Наукова думка. – 1972. – 196 с.
73. Н.Я.Иванова, И.И.Родина, В.И.Юрьева, С.В.Устюжанин, А.Т.Иванов. Установка для определения величины краевого угла смачивания поверхности твердого тела жидкостью. Заводская лаборатория. – 1984. – Т. 50. – № 1. – с. 86.

74. Е.М.Александрова, В.Л.Максимов, А.В.Богословский. Прибор для измерения краевых углов смачивания. Коррозия и защита. – № 4. – 1972.
75. Приборы для научных исследований. – 1986. – № 2. – с. 74.
76. Fisher L.R. Measurement of Small Contact Angles for Sessile Drops. Journ. Col. Inter. Sci. 1979. – Vol. 72. – № 2. – p. 200-205.
77. Tomlinson Fort, Jr., and H.T.Patterson. A simple Method for Measuring Solid-Liquid Contact Angle.
78. Bewin K.W., Zisman W.A. Journ. Phys. Chem. – 1965. – V. 69. – № 12. – p. 4238-4242.
79. Bikerman J., Journ. Surface Chemistry, New York, Academic Press. – 1958. – 501 p.
80. Mack G.L. Journ. Phys. Chem. – 1936. – V. 40. – p. 159.
81. Bikemian J., Journ. Ind. End. Chem. Anal. Ed. – 1941. – № 13. – p. 443.
82. Bashforth F., Adams J.C. An Attempt to Test the Theories of Capillary Action, Cambridge University Press< London. – 1883. – 140 p.
83. Staicopolus D.N., Journ. Colloid. Sci. 1962. – № 17. – p. 439-447.
84. Padday J.F. Heights of Sessile drops and memisens properties, - Nature, 1963. - V. 198. – № 4878. – p. 378-379.
85. Poisson S.D. Nouvelle theorie de Faction capillare, Paris. – 1831.
86. Pyley D.J., Khoshaim B.N. A new method of determining the contact Angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact angle). Journ. Col. Intertase Sci. 1977. – V. 59. – № 2. – p. 243-251 p.
87. Pyley D.J., Mond. Shifbin. Ismail. The shape of sessile Water drop on inclined plane surface. – Journ. Col. Inter, Sci. – 1972. – V. 65. № 2. – p. 394-396.
88. Neuman A.W., Good R.J. Journ. Surface and Colloid Science, New York. – V. 11. – 1979. – p. 1-91.
89. Дерягин Б.В. Доклады АН СССР. – 1946. – Т. 51. – № 7. – с. 517-520.
90. Neuman A.W., Good R.J. Techniques of Measuring Contact Anles. Journ. Surface andColloid Science, New York, Wiley Interscience. – 1979. – V. 7. – p. 31-91.
91. Патент ФРГ. № 2902561.

92. А.с. 450994 (СССР). Способ определения краевого угла смачивания. Кисиль И.С., Фабри Л.П. – Бюл. изобр. – 1974. – № 43.
93. А.с. 767623 (СССР). Способ измерения краевого угла смачивания. Н.А.Макаревич. Бюл. изобр. 1980. – № 36.
94. Малько А.Г. Методы и прибор для определения поверхностных свойств веществ по измеренному давлению в жидкостном мостике. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: – 1985.
95. Фини Р. Равновесные капиллярные системы. Математическая теория. М.: Мир. – 1989. – 322 с.
96. Padday J.F., Pitt A. Journ. Colloid Interface Sci. 1972. – V. 38. – № 2. – p. 323-334.
97. Padday J.F. Puze Appl. Chem. – 1976. – V. 48. – № 4. – 485-494.
98. Hartland S., Hartley R.W. Axisymmetric fluid-liquid interface. Amsterdam: Elsevier. – 1976. – p. 583.
99. Boucher E.A. Repts Progr. Phys. – 1980. – V. 83. – № 4. – p. 497-546.
100. Bocher E.A., Evans M.J., Jones T.G. Adv. Colloid Interface Sci. – 1987. – V. 27. – № 1/2. – p. 43-79.
101. Fortes M.A. Journ. Colloid Interface Sci. – 1982. – V. 88. – № 2. – p. 338-352.
102. Boucher E.A., Evans M.J.B. Journ. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 1. – 1985. – V. 81. – № 4. – p. 919-937.
103. Bocher E.A., Jones T.G.J. Journ. Colloid Interface Sci. – 1988. – V. 126. – № 2. – p. 469-481.
104. Cantor M/ Veber Capillari tatsconstakten. – Ann. Phys. Chem. – 1892. – V. 47. – p. 399-423.
105. Schrodinger E. Notiz uber den Kapillardruck Gasblasen. – Ann. der Physik. – 1915. – Bd. 56. – s. 403-418.
106. Sugden S. Determination of Surface Tension from the Maximum Pressure in Bubble. Part I. – Journ. Chem. Soc. – 9122. – V. 121. – p. 856-866.

107. Duque J. Mesure de la Tension Superficielle par la Metrohode de la Pression maximale de bulle. – Gif-sur-Yvette. – 1971. – 93 p. Servose Central d'enerqie Atomique Rapport CEAR-4220.

108. Пугачевич П.П. – В кн.: Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии. – Киев. – Изд. АН УССР. – 1963. – с. 422-432.

109. Пугачевич П.П., Бегляров Э.М., Павычин И.А. Поверхностные явления в полимерах. М.: Химия. – 1982. – с. 108-170.

110. Файнерман В.Б. Методы измерения неравновесного поверхностного натяжения жидкостей. – Тез. докл. второго Всесоюзного совещания по приборостроению в области коллоидной химии и физико-химической механике. Ивано-Франковск. – 1990. – с. 12-13.

111. Кисиль И.С. Исследование и разработка дроссельных преобразователей для измерения поверхностных свойств жидкостей по методу максимального давления в газовом пузырьке. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Львов. – 1974.

112. Кисиль И.С., Малько А.Г., Дранчук М.М. О точности измерения поверхностного натяжения по методу максимального давления в газовом пузырьке. – ЖФХ. – 1981. – Вып. 2. – С. 318-326.

113. Кисиль И.С. Методы и приборы контроля качества растворов поверхностно-активных веществ путем измерения поверхностного и межфазного натяжений: Дисс. ... докт. техн. наук. – Ивано-Франковск. – 1991.

114. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. – М.: Наука. – 1974. – 176 с.

115. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНЕ. Пер. с англ. М.: Мир. – 1977. – 584 с.

116. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука. – 1975. – 632 с.

117. Porter A.M. Notes an surface tension. Past U.On Jaeqers Maximum Presure Method. – Phil. Maq. – 1930. – V. 9. – № 61. – p. 1061-1073.

118. Сургучев М.Л., Желтов Ю.В., Симкин Э.М. Физико-химические микропроцессы в нефтегазоносных пластах. – М.: Недра, 1984. – 215 с.

119. Алешко П.И. Механика жидкости и газа. – Харьков. Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения «Вища школа». 1977. – 320 с.

120. David Dustan and Lee R. White. A Cappillary Pressure Method for Measurement of Contact Angle in Powders and Porous Media. Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 111 No. 1, May 1986.

121. Створення імітаційної моделі витіснення рідин у пористому тілі з урахуванням поверхневих сил. Методи та прилади контролю якості. № 1. – 1997.

122. А.С. 728054, М. кл. G01 N 13/02 (СССР). Способ определения краевого угла смачивания / Витязь П.А., Шелег Б.К., Пепко С.Б. и Капцевич.

123. А.С. 794213 М. Кл. Е 21 В 49/00 (СССР). Устройство для исследования процесса капиллярного вытеснения нефти из образца горной породы / Кузьмичев Д.Н., Багов М.С.

124. А.С. 535483, М. Кл. G 01 N 13/02 (СССР). Способ определения смачиваемости порошковых материалов / Белов В.Н., Султанова И.Г., Ромашова Н.П., Денисова И.И.

125. Крутов В.И., Исаев С.И., Кожин И.А. и др. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа. – 1991. – 384 с.

126. Отраслевой стандарт СССР. Группа А29. Нефть. Метод определения смачиваемости углеводородсодержащих пород. ОСТ 39-180-85. – М.: Миннефтепром. – 1985.

127. Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник. / Под ред. акад. Колтыркина Я.М. – М.: Химия. – 1988. – 248 с.

128. Боровиков А.С., Прохоренко П.П., Дежунов Н.В. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. – Минск: Наука и техника. – 1983. – 256 с.

129. Бурдун Г.Д., Марков Б.И. Основы метрологии. – М.: Изд. стандартов. – 1972. – 317 с.

130. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. – 1991. – 304 с.



131. Преобразователь давления полупроводниковый ПДП-12МДА. Паспорт А2.832.031 ПС.
132. Мичулин И.Н., Чаковский М.З. Интегральные схемы в радиоэлектронных устройствах. – К.: Техника. – 1978. – 200 с.
133. Преобразователь аналого-цифровой Ф707 М/1. Пасорт 2Яа.949.541 ПС.
134. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука. – 1971.
135. Иванов В.Н. К вопросу о соотношении различных критериев точности средств измерений. Автометрия. – 1974. – № 5. – с. 89-91.
136. Полішко С.П., Трубенюк О.Д. Точність засобів вимірювання. – К.: Вища школа. 1992. – 174 с.
137. Кисиль И.С. Исследование и разработка дроссельных преобразователей для измерения поверхностных свойств жидкостей по методу максимального давления в газовом пузырьке. Дисс. ... канд. техн. наук. Львов. – 1974.
138. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение. 1975. – 600 с.
139. Abram J., Jones R.E.S. Me Veigh J.C. A resistance flowmeter for liquids at low Reynolds number. // Measurement and Instruments Review, 1969. Jun., 17-18, Feb., p. 91-92.
140. Румшицкий Л.З. Элементы теории вероятностей. – М.: Наука. – 1976. – 240 с.
141. Шрюфер Э. Обработка сигналов. – к.: Либедь. 1995. – 350 с.
142. Волков Е.А. Численные методы. – М.: Наука. 1982.
143. Кісіль І.С. Метрологія і надійність засобів вимірювань. – Івано-Франківськ. Факел. – 20002. – 400 с.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

## Програма розрахунку параметрів газового містка

```

program Menisk_1; { Попередній розрахунок параметрів меніска }
uses graph,crt,math,dos;
const kz = 3;
type masiv = array[1..kz] of real;
const co = 200;
var ka, kb : real;
procedure rk4(h, k : real; var funcp, funcn : masiv );
{ h - крок, funcp - значення ф-ції на попередньому кроці,
  funcn - значення функції на наступному кроці }
var dt, dx, dz : array[1..4] of real ;
    sx, st, sp, sr : real ;
begin
    sp:=k+funcp[3];

    sx:=sin(funcp[1]);
    dt[1]:=(sp-sx/funcp[1])*h;
    dx[1]:=cos(funcp[1])*h;
    dz[1]:=sx*h;

    st:=funcp[1]+dt[1]/2; sx:=sin(st); sr:=funcp[2]+dx[1]/2;
    dt[2]:=(sp+dz[1]/2-sx/sr)*h;
    dx[2]:=cos(st)*h;
    dz[2]:=sx*h;

    st:=funcp[1]+dt[2]/2; sx:=sin(st); sr:=funcp[2]+dx[2]/2;
    dt[3]:=(sp+dz[2]/2-sx/sr)*h;
    dx[3]:=cos(st)*h;
    dz[3]:=sx*h;

    st:=funcp[1]+dt[3]; sx:=sin(st); sr:=funcp[2]+dx[3];
    dt[4]:=(sp+dz[3]-sx/(funcp[2]+dx[3]))*h;
    dx[4]:=cos(st)*h;
    dz[4]:=sx*h;

    funcn[1]:=(dt[1]+2*(dt[2]+dt[3])+dt[4])/6+funcp[1];
    funcn[2]:=(dx[1]+2*(dx[2]+dx[3])+dx[4])/6+funcp[2];
    funcn[3]:=(dz[1]+2*(dz[2]+dz[3])+dz[4])/6+funcp[3];
end;

procedure rk(k, zdor, xteta, xz : real;
    var func0 : masiv;
    var Ok : byte);
{mlen - мінімальна віддаль від точок кривої до точки [xz, xz*zdor]}

var
    ds, etmin, etmax, ka, kb, etz, ek, zdox, lens, za, lena, lenb, lenc, sa, sb,
    smin, mine, sc, maxet, k0, fa, fb, fr, fmax : real;
    fc, fx, a, b, c, x, t1, t, h : real;
    i, n : integer;
    flag, flag1 : boolean;
    func, func1, func2, et, funcr : masiv;
    ps : byte;
    label m1;
{ k - кривизна в поч. точці ; задане відношення z до r ;
  etc - максимальна похибка вихідних ф-цій ;
  func - значення ф-ції при заданому відношенні z до r ;
  teta, xteta - початковий кут і початкове значення x }

begin

```

```
ds:=1e-3;ek:=2e-6;etmax:=1e-8;etmin:=etmax/10;
```

### Додаток А (продовж.1)

```
etz:=1e-5;ps:=0;fmax:=3*pi/2;  
za:=zdor*xz;mine:=1e-6;Ok:=0;
```

```
func[1]:=teta ; func[2]:=xteta ; func[3]:=0 ; n:=0;  
{початкові умови}
```

```
repeat {основний цикл}
```

```
  repeat {цикл поточності}
```

```
    rk4(ds,k,func,func1);
```

```
    {значення функції при h=ds}
```

```
    rk(ds/2,k,func,func2);
```

```
    {проміжне значення функції при h=ds/2}
```

```
    rk4(ds/2,k,func2,func2);
```

```
    {значення функції при h=ds/2}
```

```
  if keypressed then halt(0);
```

```
    maxet:=-1e32;
```

```
  for i:=1 to kz do
```

```
    begin
```

```
      et[1]:=16*(func2[i]-func1[i])/15;
```

```
      {похибки на кроці}
```

```
      if abs(et[i])>maxet
```

```
      then maxet:=abs(et[i]) {максимальна похибка }
```

```
    end;
```

```
  if(maxet > etmax) or (sqrt(sqr(xz-func2[2])+
```

```
    sqr(za-func2[3])) < ds*2)
```

```
    {зміна кроку при великій похибці}
```

```
  then
```

```
    begin
```

```
      flag:=FALSE ; {зациклення}
```

```
      ds:=ds/2
```

```
    end
```

```
  else
```

```
    begin
```

```
      flag:=TRUE;
```

```
      inc(n); {підрахунок кроків}
```

```
      if maxet < etmin
```

```
      then ds:=ds*3 ; {зміна кроку }
```

```
    end ;
```

```
  until flag;
```

```
zdox:=func1[3]/func[2];
```

```
  if sign(zdor-zdox) <> sign(zdor-func[3]/func[2])
```

```
  then inc(ps);
```

```
    { визначення перетину }
```

```
  if (func1[1] > fmax) and (ps=0)
```

```
  then Ok:=1;
```

```
    { поверхня не дійшла до прямої z/r }
```

```
  if (ps=1) and (xz > func1[2])
```

```
  then Ok:=2;
```

```
    { поверхня пройшла під лінією z/r зліва від xz }
```

```
  if (ps=1) and (func1[1] > fmax)
```

```
  then Ok:=5;
```

```
    { поверхня перетнула z/r і закрутилась }
```

```
  if ((func1[2] < xz) and (func[2] > xz)) and (ps=1)
```

```
  then Ok:=4;
```

```
    { поверхня перетнула лінії z/r і xz }
```

```
  if ps=2
```

```
  then Ok:=3;
```

```
    for i:=1 to kz do func[i]:=func1[i]+et[i];
```

```
{ присвоєння значень функціям зврахуванням похибки }
{ goto(i,1);write(func[3]/func[2]);}
```

## Додаток А (продовж.2)

```
putpixel(round(func[2]*co),200-round(func[3]*co),7);
  if n*etmax > ek
  then
    begin
      etmax:=etmax/2; { збільшення точності на кроці }
      emin:=etmax/10;
      n:=0;
      func[1]:=teta;func[2]:=xteta;
      func[3]:=0;n:=0;
    end;
  until Ok <> 0;
  func0:=func1; { присвоєння значень функції в кінцевій точці }
nd;

procedure topoint(tetta,xteta,zdor,xz : real ;
                  var func : masiv; var k : real);
{teta,xteta,zdor,xz - геометричні параметри
 k на вході наближення кривизни, на вході точне,
 func - значення вихідних функцій}
var
  kmin,kmax : real;
  Ok        : byte;
  oks,ls,ks : string[20];
  y         : integer;
begin
  cleardevice;
  line(0,200,round(xz*co),200-round(xz*zdor*co));
  kmax:=k*1.1;kmin:=k/1.1;y:=8;
  moveto(0,8);str(xteta,ks);outtext(ks);
  moveto(0,16);str(k,ks);outtext(ks);
  moveto(0,24);str(ka,ks);outtext(ks);
  moveto(0,32);str(ka,ks);outtext(ks);
  moveto(0,40);str(k,ks);outtext(ks);
  moveto(0,48);str(round(gradus(teta)),ks);outtext(ks);

  while abs(kmin-kmax) > 1e-3 do
    begin
      k:=(kmin+kmax)/2;
      rk(k,zdor,teta,xteta,Xz,func,Ok);
      moveto(300,y);inc(y,8);str(Ok,oks);str(k,ks);
      if y > 150 then
        begin
          cleardevice;
          y:=0;
        end;
      outtext(oks+' '+ks);
      if Ok=4 then kmin:=k else kmax:=k;
    end;

  var
    teta,xz,zdor,xteta      : real; { дані що задаються }
    Kmax,ppp,pppp          : real; { кривизна }
    grDriver,grmode        : integer;
    Ok,i                   : byte;
    x,a,b,c,h              : real;
    t,t1,dteta,tetalim     : real;
    func                   : masiv;
    fi                     : text;
```

```
begin
  grdriver:=CGA;grmode:=CGAHi;
```

### Додаток А (продовж.3)

```
initgraph(grdriver,grmode,'d:\t_pas\bgi');
assign(f1,'pov1.dat');
rewrite(f1);readln(ppp);
Xz:=1/sqrt(ppp);zdor:=0.5; { =фізичні умови }
teta:=radian(0);          { початковий кут }
readln(pppp);
ka:=pppp;                  { =кривизна }
a:=0.7*xz;b:=1.5*xz;       { межі по x }
kmax:=0;
for i:=0 to 20 do
  begin
    { =кількість точок }
    c:=a+(b-a)/20*1; { - 1.1 - }
    topoint(teta,zdor,xz,func,ka);
    writeln(f1,c,ka);
    flush(f1);
    if ka < kmax then halt(0) else kmax:=ka;
  end;
end;
closegraph;
end.
```

## Додаток Б

## Результати розрахунків параметрів капілярних газових містків

$$a^2/(r^2)=1$$

кут	cos	Pmax	x	об'єм
0	1	4,92255	0,9647	2,12466
5	0,99619	4,91596	0,98315	2,12325
10	0,98481	4,89535	1,00326	2,12927
15	0,96593	4,86067	1,02317	2,13691
20	0,93969	4,81308	1,04349	2,14922
25	0,90631	4,74972	1,06416	2,16557
30	0,86603	4,67329	1,0857	2,18591
35	0,81913	4,58287	1,10707	2,20712
40	0,76604	4,47887	1,12847	2,23105
45	0,70711	4,36169	1,15119	2,26047
50	0,64279	4,23137	1,1743	2,29308
55	0,57358	4,09073	1,19828	2,32766
60	0,5	3,93819	1,22099	2,35956
65	0,42262	3,776	1,24849	2,40812
70	0,34202	3,60515	1,27138	2,44198
75	0,25002	3,42563	1,30266	2,50494
80	0,17365	3,24076	1,33269	2,56187
85	0,08716	3,05017	1,36253	2,61914
90	0	2,85554	1,39736	2,69289
95	-0,08716	2,65884	1,4324	2,76549
100	-0,17365	2,46101	1,47088	2,85104
105	-0,25882	2,26277	1,51102	2,94096
110	-0,34202	2,06666	1,55681	3,04871
115	-0,42262	1,87377	1,60855	3,17441
120	-0,5			

$$a^2/r^2=2$$

0	1	6,78089	0,68865	0,75614
5	0,996195	6,77098	0,70248	0,75713
10	0,984808	6,74269	0,71679	0,76018
15	0,965926	6,69407	0,73061	0,76292
20	0,939693	6,62492	0,74439	0,76641
25	0,906308	6,53602	0,75879	0,77245
30	0,866026	6,42681	0,77363	0,77897
35	0,819152	6,29863	0,78865	0,78698
40	0,766045	6,15037	0,80195	0,79207
45	0,707107	5,9845	0,81964	0,80561
50	0,642788	5,79999	0,83589	0,8168
55	0,573577	5,60003	0,85292	0,82936
60	0,500001	5,38456	0,87114	0,84476
65	0,422619	5,15394	0,88781	0,85714

## Додаток Б (продовж.1)

кут	cos	Pmax	x	об'єм
70	0,342021	4,91048	0,90756	0,87547
75	0,25882	4,65045	0,92797	0,89489
80	0,173649	4,39526	0,94858	0,91395
85	0,087157	4,12487	0,97212	0,93835
90	1,33E-06	3,84888	0,99625	0,96337
95	-0,08715	3,56941	1,02173	0,99054
100	-0,17365	3,28793	1,04987	1,02213
105	-0,25882	3,00749	1,0775	1,05291
110	-0,34202	2,72844	1,11636	1,10392
115	-0,42262	2,45521	1,14915	1,1391
120	-0,5	2,10709	1,1866	1,1834
125	-0,57357	1,92872	1,23433	1,24598
130	-0,64279	1,68054	1,28449	1,30917
135	-0,70711	1,44476	1,34203	1,38627
140	-0,76604	1,22417	1,41275	1,48396
145	-0,81915	1,02039	1,51017	1,63661
150	-0,86602	0,83481	1,61853	1,80293
155	-0,90631	0,67004	1,74287	1,98025
160	-0,93969	0,52813	1,93133	2,29506

a2/r2=3

кут	cos	Pmax	x	об'єм
0	1	8,2305	0,5656	0,41446
5	0,996195	8,21978	0,57558	0,41337
10	0,984808	8,18405	0,58684	0,41467
15	0,965926	8,123428	0,59803	0,41606
20	0,939693	8,03993	0,60975	0,41892
25	0,906308	7,93112	0,62125	0,42143
30	0,866026	7,79669	0,63326	0,4254
35	0,819152	7,6395	0,64528	0,42924
40	0,766045	7,45798	0,65815	0,4345
45	0,707107	7,254321	0,67104	0,43992
50	0,642788	7,02897	0,68422	0,44601
55	0,573577	6,78219	0,69763	0,45254
60	0,500001	6,51761	0,71236	0,4611
65	0,422619	6,2357	0,72748	0,46916
70	0,342021	5,93894	0,74318	0,47676
75	0,25882	5,6282	0,75947	0,4884
80	0,173649	5,3063	0,77686	0,49997
85	0,087157	4,97471	0,79497	0,51155
90	1,33E-06	4,6311	0,81429	0,52488
95	-0,08715	4,29373	0,8351	0,53942
100	-0,17365	3,94882	0,8599	0,56006
105	-0,25882	3,6045	0,88464	0,57795
110	-0,34202	3,26316	0,91251	0,60086
115	-0,42262	2,92713	0,9431	0,62654
120	-0,5	2,59874	0,97449	0,65064



## Додаток Б (продовж. 2)

$$a^2/r^2=4$$

кут	cos	Pmax	x	об'єм
0	1	9,4613	0,49	0,26889
5	0,996195	9,44876	0,49919	0,26876
10	0,984808	9,40732	0,50899	0,26973
15	0,965926	9,33973	0,51891	0,27078
20	0,939693	9,24004	0,52827	0,27207
25	0,906308	9,11396	0,5387	0,27413
30	0,866026	8,95983	0,54908	0,27658
35	0,819152	8,77744	0,5598	0,2796
40	0,766045	8,56869	0,57052	0,28249
45	0,707107	8,33234	0,58168	0,2862
50	0,642788	8,07229	0,59334	0,2902
55	0,573577	7,78971	0,60512	0,29452
60	0,500001	7,48289	0,6175	0,29959
65	0,422619	7,15683	0,63066	0,30515
70	0,342021	6,81363	0,64427	0,31142
75	0,25882	6,45413	0,65862	0,31813
80	0,173649	6,08263	0,6735	0,32503
85	0,087157	5,699	0,68974	0,33383
90	1,33E-06	5,30919	0,7072	0,34264
95	-0,08715	4,91276	0,72452	0,35171
100	-0,17365	4,51444	0,7463	0,36494
105	-0,25882	4,11638	0,76789	0,37697
110	-0,34202	3,72215	0,79449	0,39453
115	-0,42262	3,33393	0,81848	0,40764
120	-0,5	2,95342	0,85131	0,4299
125	-0,57357	2,58743	0,88331	0,4499
130	-0,64279	2,23509	0,91832	0,47181
135	-0,70711	1,90082	0,96412	0,50477

$$a^2/r^2=5$$

кут	косинус	тиск макс	x	об'єм
0	1	10,54998	0,43826	0,19221
5	0,996195	10,53431	0,44709	0,19266
10	0,984808	10,48963	0,45548	0,19298
15	0,965926	10,41098	0,46438	0,19393
20	0,939693	10,30214	0,47327	0,193
25	0,906308	10,16077	0,49214	0,1964
30	0,866026	9,98799	0,49143	0,19797
35	0,819152	9,78334	0,501101	0,20002
40	0,766045	9,55126	0,51058	0,20229
45	0,707107	9,28799	0,5208	0,20507
50	0,642788	8,99656	0,53103	0,20793

## Додаток Б (продовж. 3)

кут	cos	Pmax	x	об'єм
55	0,573577	8,67829	0,54181	0,21123
60	0,500001	8,33708	0,55233	0,21434
65	0,422619	7,97279	0,564855	0,21863
70	0,342021	7,58778	0,57657	0,22281
75	0,25882	7,18707	0,58964	0,22786
80	0,173649	6,77095	0,60333	0,2332
85	0,087157	6,34243	0,61729	0,23893
90	1,33E-06	5,90482	0,63246	0,24497
95	-0,08715	5,4624	0,64909	0,25221
100	-0,17365	5,0169	0,66851	0,26204
105	-0,25882	4,57218	0,68738	0,27041
110	-0,34202	4,13052	0,7098	0,28102
115	-0,42262	3,69553	0,73316	0,29309
120	-0,5	3,27184	0,76039	0,30673
125	-0,57357	2,86082	0,78844	0,32022

$$a^2/r^2=6$$

кут	cos	Pmax
0	1	11,53574
5	0,996195	11,51939
10	0,984808	11,46906
15	0,965926	11,38451
20	0,939693	11,26465
25	0,906308	11,11
30	0,866026	10,92202
35	0,819152	10,69793
40	0,766045	10,44198
45	0,707107	10,15325
50	0,642788	9,83353
55	0,573577	9,48571
60	0,500001	9,11084
65	0,422619	8,71121
70	0,342021	8,2911
75	0,25882	7,85115
80	0,173649	7,3953
85	0,087157	6,9262
90	1,33E-06	6,44717
95	-0,08715	5,96143
100	-0,17365	5,47336
105	-0,25882	4,98535
110	-0,34202	4,50246
115	-0,42262	4,02555
120	-0,5	3,56114
125	-0,57357	3,11105

## Додаток Б (продовж. 4)

$$a^2/r^2=7$$

кут	косинус	тиск макс
0	1	12,44429
5	0,9962	12,42653
10	0,9848	12,37195
15	0,9659	12,28042
20	0,9397	12,15126
25	0,9063	11,98436
30	0,8660	11,78018
35	0,8192	11,53843
40	0,7660	11,26146
45	0,7071	10,94985
50	0,6428	10,60441
55	0,5736	10,22876
60	0,5000	9,82362
65	0,4226	9,39345
70	0,3420	8,93884
75	0,2588	8,46292
80	0,1736	7,97109
85	0,0872	7,46365
90	0,0000	6,94689
95	-0,0872	6,42266
100	-0,1736	5,89438
105	-0,2588	5,36795
110	-0,3420	4,84536
115	-0,4226	4,33054
120	-0,5000	3,8294
125	-0,5736	3,34217
130	-0,6428	2,87511
135	-0,7071	2,43316

$$a^2/r^2=8$$

кут	косинус	тиск макс
0	1	13,28972
5	0,996195	13,27156
10	0,984808	13,2136
15	0,965926	13,11494
20	0,939693	12,97749
25	0,906308	12,79919
30	0,866026	12,58039
35	0,819152	12,3226

## Додаток Б (продовж. 5)

кут	косинус	тиск макс
40	0,766045	12,026
45	0,707107	11,69271
50	0,642788	11,32369
55	0,573577	10,92203
60	0,500001	10,4696
65	0,422619	10,02859
70	0,342021	9,54221
75	0,25882	9,03436
80	0,173649	8,50794
85	0,087157	7,96597
90	1,33E-06	7,41261
95	-0,08715	6,85176
100	-0,17365	6,28762
105	-0,25882	5,72474
110	-0,34202	5,16655
115	-0,42262	4,61579
120	-0,5	4,07937
125	-0,57357	3,55911

$$a^2/r^2=9$$

кут	косинус	тиск макс
0	1	14,08525
5	0,996195	14,06617
10	0,984808	14,0044
15	0,965926	13,90006
20	0,939693	13,75442
25	0,906308	13,56389
30	0,866026	13,33297
35	0,819152	13,0595
40	0,766045	12,74387
45	0,707107	12,39076
50	0,642788	12,0002
55	0,573577	11,5739
60	0,500001	11,11462
65	0,422619	10,62586
70	0,342021	10,10973
75	0,25882	9,57131
80	0,173649	9,0125
85	0,087157	8,43759
90	1,33E-06	7,85059
95	-0,08715	7,2564
100	-0,17365	6,65797
105	-0,25882	6,06062
110	-0,34202	5,46783
115	-0,42262	4,89476
120	-0,5	4,31482
125	-0,57357	3,76375

## Додаток Б (продовж. 6)

кут	косинус	тиск макс
130	-0,64279	3,23426
135	-0,70711	2,73129
140	-0,76604	2,25844
145	-0,81915	1,82241

$$a^2/r^2=10$$

кут	косинус	тиск макс
0	1	14,8388
5	0,996195	14,81738
10	0,984808	14,75211
15	0,965926	14,64259
20	0,939693	14,48933
25	0,906308	14,28929
30	0,866026	14,0445
35	0,819152	13,75688
40	0,766045	13,4242
45	0,707107	13,05159
50	0,642788	12,6392
55	0,573577	12,18975
60	0,500001	11,70647
65	0,422619	11,19126
70	0,342021	10,64774
75	0,25882	10,07923
80	0,173649	9,49077
85	0,087157	8,88442
90	1,33E-06	8,26607
95	-0,08715	7,63902
100	-0,17365	7,00899
105	-0,25882	6,37841
110	-0,34202	5,75321
115	-0,42262	5,13826
120	-0,5	4,53854
125	-0,57357	3,95654
130	-0,64279	3,39809
135	-0,70711	2,86846

## Додаток В

Таблиця В1. – Значення коефіцієнтів залежності (1) для різних значень  
відносно крефіцієнта

$\xi = \frac{a^2}{r^2}$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1	-1,20426	0,42167	-0,00742	0,00257
2	-1,07905	0,24999	0,00720	0,00016
3	-1,11529	0,23557	-0,00084	0,00042
4	-1,07389	0,18761	0,00199	0,00014
5	-1,08497	0,17568	0,00045	0,00015
6	-1,08129	0,16041	0,00037	0,00012
7	-1,07776	0,14812	0,00038	0,00009
8	-1,07344	0,13745	0,00049	0,00007
9	-1,07508	0,13081	0,00029	0,00006
10	-1,07278	0,12389	0,00027	0,00005

## Додаток Д

### Програма розрахунку профілів лежачої краплі

```

% calculating the sessile drops' profiles of liquids
global B

hold on

grid on

beta=0; slim=5; x0=0.00000001; z0=0;

mu_index=1; s_index=1;

clear Result
clear Radius

%for B=1:0.5:10;

B=0.1;

options=odeset('Refine',1000);
[t,y]=ode45('mnsk_setb',[0 slim],[theta;x0;z0],options);
[w,v]=size(y);

kk=find(y(:,1)>3*pi/2);
y(kk,:)=[];
kk=[];
[n,m]=size(y);

for j=1:n
    plot(y(j,2),y(j,3),'k-');
end

%finding Xecv
Xecv=y(1,2);
for i=2:n
    if(Xecv<y(i,2))
        Xecv=y(i,2);
        ekvator=i;
    end
end

if(ekvator==n)continue;
end

Decv=2*Xecv;

```

## Продовження додатку Д

```

%searching the angle
number=1;

angle_prec=0.001;

i=1;
for angle=1:180

    angle_radians=angle/180*pi;

    while( abs(y(number,1)-angle_radians)>angle_prec )
        number=number+1;
    end

    if(number>n) break; end

    % now the angle - equivalented point number is defined
    volume=0;
    for volume_number=2:number
        volume=volume+(y(volume_number,2)^2)*(y(volume_number,3)-y(volume_number-1,3));
    end
    Result(i,1)=y(number,1)*180/pi;
    Result(i,2)=volume;
    Result(i,3)=y(number,2);
    i=i+1;

end

%end end of the B - cycle

save Result01.txt Result -ASCII

```

**Підпрограма**  
(для розв'язку дифрівнянь)

```

function yr=mnsk_set(t,y)
%
% t - s
% y(1) - phi
% y(2) - x
% y(3) - z
global B
r=[2/sqrt(B)+2*y(3)-sin(y(1))/y(2);cos(y(1));sin(y(1))];

```



	$\varphi=1^\circ$		$\varphi=2^\circ$		$\varphi=3^\circ$		$\varphi=4^\circ$	
	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0.1	242,9907	161,9952	117,9185	78,617	77,83969	51,90023	58,08673	38,73406
0.2	243,0672	162,0463	117,9545	78,64123	77,862	51,91546	58,10185	38,74461
0.3	243,1007	162,0687	117,7627	78,51356	77,87047	51,92145	58,10663	38,74826
0.4	242,2435	161,4974	117,771	78,51932	77,87449	51,92448	58,10809	38,74969
0.5	242,2566	161,5062	117,7762	78,52298	77,87643	51,92612	58,10798	38,75009
0.6	242,266	161,5126	117,7795	78,52546	77,87719	51,92698	58,107	38,7499
0.7	242,2732	161,5175	117,7818	78,52719	77,87721	51,92734	58,10548	38,74935
0.8	242,2788	161,5214	117,7833	78,52843	77,87674	51,92738	58,10358	38,74855
0.9	242,2833	161,5245	117,7843	78,5293	77,87591	51,92717	58,10141	38,74757
1	242,9881	161,9945	117,9504	78,64029	77,87482	51,9268	58,13939	38,77335
1.2	242,2926	161,531	117,7852	78,53056	77,87206	51,92565	58,14434	38,77758
1.4	242,2966	161,5339	117,7848	78,53068	77,86878	51,92417	58,13881	38,77482
1.6	242,2995	161,536	117,7837	78,53045	77,86516	51,92245	58,13303	38,77189
1.8	242,3016	161,5377	117,9894	78,66797	77,86128	51,92056	58,12705	38,76884
2	242,3032	161,5389	117,9877	78,6673	77,85721	51,91855	58,17148	38,79938
2.2	242,3043	161,5399	117,9859	78,66649	77,85301	51,91644	58,16527	38,79616
2.4	242,305	161,5406	117,9838	78,66556	77,84869	51,91426	58,15897	38,79289
2.6	242,3055	161,5411	117,9816	78,66455	77,84427	51,91201	58,1526	38,78957
2.8	242,3058	161,5415	117,9794	78,66345	77,93038	51,97009	58,19685	38,81998
3	242,3058	161,5417	117,977	78,6623	77,92584	51,96776	58,19038	38,8166
3.2	242,3057	161,5419	117,9745	78,66109	77,92124	51,9654	58,18388	38,81319
3.4	242,3055	161,5419	117,972	78,65984	77,91661	51,96301	58,17735	38,80976
3.6	242,3051	161,5419	117,9694	78,65856	77,91194	51,96058	58,22157	38,84015
3.8	243,0059	162,0094	118,0083	78,68493	77,96171	51,99446	58,22517	38,84347
4	242,3041	161,5417	117,9641	78,65587	77,9025	51,95569	58,2084	38,83322
4.2	242,7084	161,8114	118,0069	78,68491	77,89563	51,95182	58,23627	38,85268
4.4	242,9966	162,0037	117,8482	78,57957	77,89907	51,9548	58,22539	38,84634
4.6	242,3358	161,5634	118,0333	78,70345	77,95254	51,99114	58,23625	38,85447
4.8	243,0562	162,0439	118,0385	78,70743	77,98122	52,01095	58,26358	38,87357
5	243,0146	162,0164	118,0283	78,70111	77,9891	52,0169	58,27077	38,87926
5.2	243,0412	162,0343	118,0441	78,7121	77,99052	52,01854	58,26707	38,87768
5.4	242,8272	161,8918	118,0143	78,69268	77,95574	51,99605	58,25035	38,86743
5.6	242,5413	161,7014	117,9436	78,64605	77,99911	52,02564	58,27298	38,88339
5.8	242,942	161,9687	118,0142	78,69361	77,93681	51,98481	58,27849	38,88795
6	242,5208	161,6881	118,0468	78,71581	78,00567	52,03139	58,26853	38,8822
6.2	243,0223	162,0226	118,0448	78,71498	77,9992	52,02777	58,29827	38,9029
6.4	242,968	161,9866	118,0114	78,69311	77,99655	52,02669	58,28719	38,8964
6.6	243,0963	162,0724	118,0619	78,7273	78,02342	52,04528	58,31601	38,91648
6.8	242,9319	161,963	118,0277	78,70501	78,03087	52,05092	58,33212	38,92809
7	242,4887	161,6676	118,0784	78,73922	78,02049	52,04468	58,33653	38,93191
7.2	243,1559	162,1127	118,0488	78,71999	78,04151	52,05937	58,33016	38,92855
7.4	243,0808	162,0628	117,9428	78,6498	78,04638	52,06329	58,31385	38,91857
7.6	242,9641	161,9852	118,0834	78,74396	78,03631	52,05726	58,36196	38,9515
7.8	243,0315	162,0304	118,0947	78,75202	78,05873	52,07287	58,35134	38,94531
8	242,6179	161,7548	117,9817	78,67714	78,04445	52,06403	58,35629	38,94949
8.2	243,0477	162,0415	118,0589	78,72904	78,06323	52,07722	58,37663	38,96391
8.4	243,0017	162,0111	118,0655	78,73396	78,06965	52,08217	58,38868	38,97282
8.6	243,1372	162,1016	118,1058	78,76128	78,0645	52,07942	58,39297	38,97657
8.8	242,8131	161,8857	118,0285	78,71023	78,04856	52,06946	58,39001	38,97547
9	243,0952	162,0739	118,0368	78,71624	78,08822	52,09655	58,38025	38,96985
9.2	243,1343	162,1003	118,0796	78,74525	78,09554	52,1021	58,40925	38,99005
9.4	243,1444	162,1073	118,1076	78,76434	78,09324	52,10124	58,40905	38,9908
9.6	243,1272	162,096	118,1215	78,7741	78,10327	52,10859	58,42498	39,00229
9.8	243,0843	162,0676	118,1223	78,77506	78,10443	52,11002	58,43483	39,00974
10	243,0172	162,0231	118,1105	78,76772	78,09722	52,10588	58,43893	39,01335

# Подовження додатку Е

$\varphi=5^\circ$		$\varphi=6^\circ$		$\varphi=7^\circ$		$\varphi=8^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
46,276	30,86304	38,50176	25,6824693	32,95883	21,9896229	28,80672	19,22395854
46,327	30,897551	38,48754	25,6736774	32,95658	21,9889269	28,81068	19,22751848
46,349	30,912256	38,4898	25,675874	32,95035	21,985588	28,7993	19,22086816
46,316	30,890937	38,53287	25,705253	32,98255	22,0078369	28,8238	19,2381085
46,29	30,87467	38,49603	25,6813947	32,99364	22,0160254	28,82033	19,23672161
46,298	30,880219	38,52115	25,6988047	32,97308	22,0031318	28,8147	19,23390281
46,323	30,897401	38,54503	25,7153379	32,99474	22,0183127	28,83379	19,2475147
46,301	30,883582	38,5092	25,6921113	32,95247	21,9909217	28,84478	19,25571082
46,282	30,871528	38,49787	25,6852933	33,00375	22,0258973	28,82792	19,24540794
46,376	30,934312	38,56985	25,7339315	33,02374	22,0400159	28,87076	19,27484223
46,321	30,899154	38,57869	25,7411843	33,04196	22,0537332	28,88441	19,2857409
46,33	30,906282	38,55882	25,7293134	33,05103	22,0613579	28,87453	19,28098567
46,406	30,958204	38,60484	25,7613287	33,03438	22,051867	28,88793	19,29171585
46,342	30,916374	38,60611	25,7635329	33,06796	22,0758082	28,90546	19,30519732
46,398	30,954619	38,59758	25,7592168	33,06456	22,0751327	28,93387	19,32590869
46,424	30,973513	38,59663	25,7599451	33,08501	22,0903309	28,93481	19,32834244
46,43	30,978742	38,61278	25,7720618	33,10259	22,1036112	28,95158	19,34129721
46,421	30,973925	38,65168	25,7993231	33,08934	22,0963679	28,96371	19,35116047
46,401	30,961481	38,66866	25,8119893	33,12361	22,1207517	28,97735	19,3620283
46,44	30,988318	38,6684	25,813169	33,13709	22,1312948	28,99671	19,3766867
46,469	31,00896	38,65431	25,8051419	33,13382	22,1306907	28,9982	19,37946392
46,425	30,980601	38,67481	25,8201394	33,15077	22,1435321	29,0112	19,38988286
46,441	30,992456	38,6847	25,8280789	33,15542	22,148196	29,03717	19,40892408
46,49	31,026316	38,72147	25,8539015	33,18943	22,1723798	29,06189	19,42713396
46,457	31,005748	38,7232	25,8563972	33,20059	22,1813626	29,05633	19,42519878
46,514	31,044601	38,73759	25,8673171	33,19067	22,1763187	29,08064	19,44312428
46,519	31,049075	38,71477	25,8534638	33,21502	22,1940738	29,08027	19,44463638
46,506	31,041501	38,7593	25,8844417	33,22314	22,2010281	29,11332	19,46836174
46,542	31,066856	38,76718	25,8910264	33,25036	22,2206852	29,12519	19,47800242
46,547	31,070836	38,78165	25,901993	33,26122	22,229453	29,1364	19,48719713
46,559	31,080323	38,79295	25,9108404	33,2692	22,2363023	29,15089	19,49857236
46,548	31,07366	38,79445	25,9131731	33,27531	22,2419064	29,14268	19,49485313
46,557	31,081189	38,79509	25,9149279	33,26913	22,2393408	29,1747	19,51786378
46,552	31,079057	38,82056	25,9332095	33,30742	22,2663343	29,17402	19,51913978
46,587	31,103219	38,79675	25,9186964	33,30675	22,2674234	29,18508	19,52820763
46,591	31,106945	38,83532	25,9456856	33,32331	22,2799655	29,20789	19,54508249
46,566	31,091516	38,82678	25,9413282	33,33027	22,2861173	29,22178	19,5560223
46,615	31,125216	38,85599	25,9620924	33,34598	22,2980853	29,23432	19,56606183
46,619	31,129126	38,86379	25,9686044	33,36187	22,31017	29,24594	19,57548626
46,63	31,137418	38,8514	25,9616807	33,35265	22,3055603	29,25702	19,58454293
46,631	31,139446	38,88803	25,987371	33,37874	22,3244151	29,27448	19,59783477
46,608	31,125045	38,89377	25,9924988	33,37235	22,3216811	29,27887	19,60243679
46,656	31,158139	38,90328	26,0001435	33,40102	22,342244	29,29664	19,61592597
46,664	31,164524	38,91674	26,010409	33,41479	22,3529044	29,3085	19,62548136
46,633	31,14528	38,90169	26,0017115	33,41437	22,354128	29,31485	19,63137222
46,658	31,162506	38,92379	26,0177235	33,43252	22,3676867	29,32858	19,64215914
46,69	31,185027	38,93957	26,0295295	33,44506	22,377518	29,34347	19,65371513
46,685	31,182884	38,94944	26,037401	33,46024	22,3890911	29,35969	19,66614048
46,689	31,186616	38,95377	26,0415834	33,45473	22,3869196	29,35908	19,66739275
46,687	31,186412	38,95291	26,0423109	33,47569	22,4023319	29,35344	19,66531006
46,723	31,21161	38,97794	26,060259	33,49191	22,4145951	29,39212	19,69262894
46,724	31,213571	38,98767	26,0680308	33,49606	22,4188314	29,40288	19,70142145
46,735	31,221629	39,00283	26,0794065	33,51121	22,4303721	29,41018	19,70791399
46,74	31,22628	39,01343	26,087744	33,52226	22,439189	29,42593	19,72000476
46,755	31,237088	39,0197	26,0932081	33,52943	22,4454215	29,43836	19,72989576

Подовження додатку Е

$\varphi=9^\circ$		$\varphi=10^\circ$		$\varphi=11^\circ$		$\varphi=12^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
25,579817	17,0751	22,999463	15,35727	20,88868	13,95251	19,12968	12,7823
25,58691	17,08086	23,007944	15,36408	20,89752	13,95968	19,13826	12,7894
25,572172	17,0721	23,013908	15,36921	20,89779	13,96114	19,15019	12,79873
25,590898	17,08561	23,005073	15,3645	20,90931	13,97008	19,15932	12,80619
25,610239	17,09953	23,012187	15,3704	20,90912	13,97123	19,17177	12,81586
25,616728	17,1049	23,02301	15,37877	20,92461	13,98282	19,17182	12,81728
25,597688	17,09327	23,044143	15,39401	20,91832	13,97995	19,17115	12,81827
25,595685	17,09295	23,0335	15,38807	20,93138	13,98989	19,20033	12,83905
25,617615	17,10856	23,043411	15,39578	20,95668	14,00794	19,21048	12,84711
25,650004	17,13114	23,073254	15,41676	20,97295	14,02	19,22033	12,85502
25,646607	17,13092	23,076197	15,42099	20,98565	14,03093	19,23527	12,86766
25,678114	17,15393	23,109456	15,44537	20,99933	14,04251	19,24963	12,8799
25,680271	17,1574	23,124196	15,45743	21,02155	14,05975	19,27534	12,89966
25,710171	17,17932	23,139881	15,47011	21,0432	14,0766	19,29966	12,91847
25,707261	17,17941	23,154606	15,48214	21,05224	14,08505	19,31709	12,93269
25,741551	17,20424	23,170263	15,49477	21,06995	14,09925	19,33465	12,94698
25,755408	17,21546	23,181122	15,50421	21,09285	14,11688	19,35149	12,96078
25,758748	17,21969	23,195929	15,51626	21,11389	14,13326	19,37576	12,97949
25,779862	17,23573	23,220366	15,5347	21,12415	14,14248	19,37801	12,98357
25,800748	17,2516	23,240768	15,55045	21,14296	14,15735	19,40532	13,00426
25,803538	17,25545	23,243263	15,55429	21,15869	14,17017	19,4177	13,01503
25,812318	17,26326	23,265152	15,57101	21,1739	14,18263	19,44354	13,03472
25,828794	17,27619	23,273934	15,57901	21,19051	14,19601	19,45788	13,04676
25,858362	17,2978	23,301666	15,59958	21,21842	14,21687	19,4876	13,06898
25,869596	17,30723	23,309339	15,60683	21,23362	14,22928	19,48303	13,06846
25,87278	17,3113	23,32991	15,62263	21,25074	14,24296	19,50387	13,08477
25,894555	17,32772	23,348198	15,6369	21,25474	14,24792	19,52481	13,10113
25,902313	17,33482	23,35344	15,64251	21,27983	14,26686	19,53652	13,11137
25,929328	17,3547	23,379166	15,6617	21,30007	14,28257	19,57503	13,13935
25,942521	17,3654	23,395071	15,67436	21,31606	14,29545	19,5898	13,15159
25,954268	17,37512	23,409361	15,68594	21,33181	14,30817	19,60461	13,16383
25,96538	17,38442	23,411471	15,68943	21,33751	14,31422	19,62417	13,17921
25,983556	17,3984	23,438508	15,70945	21,34397	14,32076	19,63579	13,18932
25,991804	17,40579	23,428461	15,70487	21,36779	14,33879	19,64015	13,19462
26,008108	17,41851	23,469534	15,73418	21,38429	14,35197	19,65864	13,20924
26,021409	17,42923	23,484168	15,74596	21,40998	14,37122	19,69096	13,23301
26,032251	17,43831	23,47372	15,74109	21,4212	14,38087	19,6964	13,23898
26,052061	17,45334	23,512968	15,76917	21,44201	14,39687	19,72286	13,25884
26,057606	17,4589	23,527584	15,7809	21,45696	14,40897	19,73689	13,27047
26,064237	17,46516	23,518681	15,77704	21,46648	14,41747	19,75869	13,28722
26,087068	17,48218	23,558228	15,80529	21,48593	14,43254	19,77532	13,30053
26,093872	17,48855	23,548274	15,80072	21,49294	14,43935	19,78074	13,30643
26,116836	17,50564	23,586076	15,82779	21,51743	14,45773	19,80708	13,32614
26,12444	17,51254	23,592981	15,83438	21,53724	14,47299	19,82259	13,33868
26,11733	17,50967	23,595604	15,83813	21,53106	14,47105	19,82773	13,34435
26,157082	17,53788	23,627909	15,86153	21,55682	14,49024	19,84753	13,3597
26,17197	17,54959	23,639105	15,87094	21,57847	14,50669	19,86955	13,37651
26,182781	17,5586	23,654728	15,88327	21,59622	14,52056	19,88176	13,38682
26,189748	17,56504	23,650165	15,88222	21,61031	14,53199	19,88452	13,39087
26,18329	17,56259	23,666719	15,89516	21,62094	14,54112	19,90795	13,40857
26,222157	17,59017	23,695913	15,91646	21,63514	14,5526	19,92804	13,42406
26,228206	17,596	23,705512	15,92477	21,65294	14,56646	19,94497	13,43744
26,240595	17,60602	23,719918	15,93626	21,6676	14,57824	19,95889	13,44883
26,259263	17,62019	23,739117	15,95091	21,67929	14,58803	19,96996	13,45833
26,274736	17,63225	23,747417	15,95834	21,69481	14,60036	19,98985	13,47363

Подовження додатку Е

$\varphi=13^\circ$		$\varphi=14^\circ$		$\varphi=15^\circ$		$\varphi=16^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
17,64103	11,79232	16,36804	10,94613	15,25375	10,20577	14,29602	9,569748
17,64895	11,7991	16,35902	10,94177	15,27586	10,2222	14,30716	9,578997
17,65509	11,80469	16,38492	10,96059	15,28392	10,22929	14,30696	9,580707
17,67571	11,8199	16,40168	10,97334	15,29203	10,2364	14,33759	9,602871
17,6813	11,82511	16,41518	10,98392	15,31455	10,25307	14,35094	9,613564
17,68535	11,82931	16,42332	10,99093	15,32542	10,26199	14,36133	9,622274
17,6884	11,83287	16,43245	10,99864	15,3388	10,27261	14,36332	9,62543
17,70695	11,84669	16,44276	11,0071	15,34249	10,27678	14,39033	9,645172
17,72727	11,86164	16,45142	11,0144	15,35507	10,2868	14,40277	9,655205
17,74146	11,87253	16,47382	11,03085	15,37483	10,3016	14,41259	9,663502
17,7618	11,88896	16,49188	11,04597	15,39636	10,3192	14,43792	9,683749
17,77488	11,90055	16,51344	11,06339	15,39996	10,32487	14,46735	9,706766
17,80158	11,92116	16,53271	11,07925	15,43047	10,34839	14,48036	9,71891
17,80848	11,92861	16,55441	11,0967	15,45816	10,37002	14,51056	9,742397
17,82962	11,94548	16,56645	11,10772	15,48326	10,3899	14,52579	9,755916
17,86403	11,97113	16,60296	11,13495	15,49984	10,4041	14,56154	9,782984
17,86591	11,97519	16,62533	11,15278	15,53723	10,43205	14,57462	9,795003
17,89156	11,99499	16,64064	11,1659	15,56269	10,45207	14,60742	9,820037
17,91889	12,01588	16,65365	11,17748	15,58193	10,46794	14,631	9,838932
17,92742	12,0243	16,68803	11,20319	15,59891	10,48228	14,64974	9,854593
17,9662	12,05274	16,70521	11,21749	15,61646	10,49698	14,66677	9,869094
17,96809	12,05672	16,72775	11,23531	15,63669	10,51342	14,69993	9,894221
18,00275	12,08239	16,73766	11,24475	15,66122	10,53268	14,71974	9,910494
18,02195	12,09781	16,77125	11,26984	15,69132	10,5556	14,74636	9,931239
18,04031	12,11264	16,78331	11,28066	15,7112	10,57173	14,75674	9,941223
18,05038	12,12198	16,80316	11,29662	15,72088	10,5811	14,78735	9,964532
18,08071	12,14472	16,82139	11,31148	15,74489	10,59992	14,80044	9,976245
18,08097	12,14753	16,84796	11,33184	15,75921	10,61229	14,83256	10,00049
18,11549	12,173	16,87112	11,34992	15,79156	10,63656	14,8515	10,01601
18,13606	12,18922	16,88815	11,36393	15,81109	10,65233	14,8722	10,03265
18,15025	12,2012	16,90884	11,38033	15,83194	10,66895	14,89329	10,04953
18,16634	12,21441	16,9268	11,3949	15,84565	10,68083	14,90727	10,06169
18,1809	12,2266	16,94258	11,40801	15,86168	10,69422	14,92271	10,07479
18,20656	12,24612	16,95124	11,41641	15,8851	10,71246	14,94423	10,09188
18,22513	12,26093	16,96933	11,43101	15,90178	10,72623	14,97199	10,11304
18,2372	12,27142	16,9968	11,45179	15,92631	10,74516	14,98923	10,12726
18,24328	12,27794	17,01806	11,46844	15,94484	10,76012	15,0091	10,14319
18,27288	12,29998	17,03359	11,4813	15,96243	10,77443	15,02767	10,15823
18,29099	12,31442	17,05398	11,49735	15,97934	10,78827	15,04523	10,17259
18,2982	12,32164	17,06423	11,50668	15,99582	10,80181	15,06202	10,18643
18,3232	12,3406	17,08474	11,52277	16,01654	10,81813	15,0823	10,20254
18,33221	12,34897	17,10557	11,53905	16,02835	10,82856	15,09821	10,21575
18,35899	12,36908	17,122	11,55242	16,05354	10,84779	15,11794	10,23145
18,37588	12,38264	17,13916	11,56625	16,07024	10,8614	15,13764	10,24712
18,38328	12,38991	17,15719	11,58064	16,07882	10,86965	15,1458	10,25517
18,39773	12,40183	17,16668	11,58938	16,09669	10,884	15,16986	10,27367
18,42453	12,42189	17,18689	11,60518	16,11956	10,90163	15,19043	10,28986
18,43703	12,4325	17,20362	11,61866	16,13901	10,91699	15,20772	10,30387
18,45146	12,44436	17,21706	11,62996	16,15523	10,9302	15,2219	10,31581
18,46789	12,45753	17,22738	11,6392	16,17257	10,94414	15,23315	10,32581
18,48638	12,47205	17,2532	11,65863	16,18696	10,95612	15,25661	10,34382
18,50183	12,48456	17,27142	11,67304	16,20679	10,97166	15,27353	10,35751
18,51954	12,49854	17,28682	11,68558	16,21979	10,98269	15,29153	10,3719
18,53445	12,51066	17,29954	11,69634	16,23836	10,99738	15,30699	10,38461
18,5467	12,52101	17,31873	11,71135	16,25441	11,01039	15,32371	10,39812

Подовження додатку Е

$\varphi=17^\circ$		$\varphi=18^\circ$		$\varphi=19^\circ$		$\varphi=20^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
13,43422	8,997717	12,68165	8,498468	11,99487	8,043126	11,38758	7,640731
13,45145	9,011127	12,68992	8,506047	12,02015	8,062095	11,40416	7,65405
13,46079	9,019277	12,7065	8,51911	12,02976	8,070652	11,41908	7,666237
13,47501	9,03065	12,72281	8,531974	12,04743	8,08452	11,43753	7,680732
13,49825	9,048	12,73809	8,544133	12,05598	8,092317	11,45395	7,693846
13,5143	9,060587	12,74341	8,549706	12,06932	8,103275	11,47524	7,710132
13,52604	9,070293	12,76606	8,566755	12,09377	8,121646	11,48553	7,719254
13,53263	9,076594	12,77901	8,57737	12,11166	8,135629	11,50719	7,735819
13,53295	9,078714	12,78821	8,585399	12,1177	8,141543	11,5105	7,73993
13,57033	9,105281	12,81707	8,606388	12,14689	8,162894	11,53946	7,761302
13,5869	9,119944	12,84586	8,629417	12,15888	8,175096	11,57015	7,786111
13,61532	9,14253	12,87129	8,650253	12,1995	8,206174	11,5897	7,803449
13,63452	9,158992	12,89311	8,668632	12,22299	8,22582	11,62799	7,833007
13,66609	9,183557	12,9241	8,692976	12,25302	8,249672	11,65587	7,855576
13,68942	9,20261	12,95269	8,715657	12,28543	8,275024	11,67804	7,874303
13,72333	9,228612	12,96968	8,730623	12,31414	8,297869	11,71606	7,903415
13,74723	9,247946	13,00186	8,75557	12,33925	8,31827	11,73487	7,919795
13,76956	9,266197	13,02876	8,776974	12,35682	8,333652	11,76687	7,944809
13,79575	9,286961	13,05631	8,798768	12,38506	8,35602	11,79485	7,967116
13,81513	9,303186	13,07554	8,815017	12,41563	8,379877	11,82327	7,989657
13,84521	9,326434	13,10274	8,836491	12,43989	8,399516	11,84453	8,007436
13,85989	9,339485	13,1273	8,856178	12,4605	8,416714	11,872	8,029251
13,88927	9,362197	13,15122	8,875402	12,49098	8,440366	11,89689	8,049315
13,91521	9,382606	13,17606	8,895193	12,5167	8,460839	11,92292	8,070088
13,9282	9,394442	13,19072	8,908236	12,53003	8,47311	11,94513	8,088299
13,94809	9,410783	13,21325	8,926421	12,55419	8,492455	11,96994	8,108153
13,97799	9,43369	13,24424	8,950134	12,58552	8,516474	11,99084	8,125401
13,99803	9,450058	13,26539	8,967332	12,60707	8,534027	12,01227	8,142951
14,0233	9,469847	13,28824	8,98561	12,63159	8,553489	12,03968	8,164393
14,04426	9,486758	13,30879	9,002346	12,65334	8,571093	12,06198	8,182436
14,06407	9,502885	13,32993	9,019434	12,67571	8,589078	12,08308	8,19966
14,08567	9,520165	13,34991	9,035734	12,69717	8,606428	12,1054	8,217645
14,09993	9,532579	13,37357	9,054421	12,7182	8,623457	12,12381	8,233027
14,11924	9,548294	13,39045	9,068617	12,73263	8,636123	12,14491	8,250147
14,14377	9,567422	13,41174	9,085688	12,75079	8,651211	12,16899	8,269186
14,16604	9,585032	13,43412	9,103452	12,77932	8,673086	12,19032	8,286391
14,17505	9,593891	13,44748	9,115251	12,79911	8,689179	12,20929	8,302011
14,2052	9,616648	13,47292	9,134975	12,82013	8,706059	12,23208	8,320112
14,22273	9,631066	13,49337	9,151388	12,83948	8,721812	12,25013	8,335073
14,23925	9,644795	13,50918	9,164725	12,85742	8,736615	12,27244	8,352795
14,25864	9,660395	13,53073	9,181807	12,87729	8,752654	12,29052	8,367716
14,27741	9,675562	13,54809	9,196115	12,89616	8,768014	12,31036	8,383756
14,29575	9,690427	13,56814	9,21217	12,91424	8,782831	12,32925	8,399155
14,31384	9,705104	13,58772	9,22789	12,93475	8,799211	12,3474	8,414032
14,33183	9,7197	13,59722	9,236961	12,94874	8,811293	12,36495	8,428497
14,34989	9,734314	13,61963	9,254494	12,96547	8,825147	12,38485	8,444476
14,36814	9,749035	13,63876	9,269851	12,988	8,842782	12,40443	8,460215
14,3867	9,763941	13,658	9,285255	13,00747	8,858387	12,42106	8,473992
14,39529	9,772277	13,66789	9,294506	13,02405	8,872071	12,43488	8,485911
14,42176	9,79234	13,68773	9,31026	13,03789	8,883934	12,45152	8,499651
14,4385	9,805992	13,71115	9,328347	13,06081	8,901735	12,47322	8,51668
14,45599	9,820119	13,72877	9,34261	13,07825	8,915914	12,49032	8,530673
14,47092	9,832544	13,7439	9,355216	13,09326	8,928481	12,50793	8,54498
14,48679	9,84557	13,75977	9,368287	13,11173	8,943296	12,52614	8,559654
14,50367	9,859242	13,77645	9,381869	13,12795	8,956613	12,5422	8,5729

Подовження додатку Е

$\varphi=21^\circ$		$\varphi=22^\circ$		$\varphi=23^\circ$		$\varphi=24^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
10,837	7,276148	10,33547	6,944264	9,868345	6,635374	9,447566	6,357337
10,85637	7,291426	10,34751	6,954809	9,890854	6,652955	9,471019	6,375652
10,86512	7,299645	10,37009	6,972291	9,907121	6,666376	9,490043	6,391004
10,88391	7,314475	10,38952	6,987652	9,926227	6,681634	9,509174	6,406386
10,90654	7,331801	10,40653	7,001363	9,947897	6,698532	9,525632	6,419954
10,92017	7,343101	10,42627	7,016799	9,960774	6,709536	9,543278	6,434212
10,93179	7,353152	10,44244	7,029838	9,977601	6,722978	9,563376	6,449805
10,95447	7,370482	10,45541	7,040824	9,997054	6,738318	9,588428	6,468904
10,97483	7,385963	10,46792	7,051341	10,01688	6,753912	9,600093	6,479358
10,99269	7,400161	10,49786	7,073655	10,04234	6,773388	9,626633	6,499648
11,01679	7,420841	10,52391	7,095807	10,06967	6,796552	9,661516	6,527914
11,04753	7,445719	10,54976	7,117603	10,10296	6,823367	9,688929	6,550978
11,08371	7,474013	10,58379	7,144586	10,13367	6,848278	9,72654	6,580527
11,10939	7,495263	10,6182	7,171715	10,16436	6,873065	9,753067	6,602693
11,14528	7,523154	10,65435	7,199896	10,20038	6,901271	9,788231	6,630446
11,16801	7,542309	10,68398	7,223709	10,23559	6,928866	9,818905	6,655163
11,20243	7,569095	10,7111	7,245792	10,26525	6,952733	9,850477	6,680387
11,22494	7,587967	10,73481	7,265572	10,28951	6,972973	9,883272	6,706332
11,25234	7,610002	10,76122	7,287057	10,31461	6,9937	9,906834	6,726142
11,27858	7,631217	10,79446	7,312973	10,34481	7,017701	9,94211	6,753559
11,30692	7,653753	10,81911	7,333175	10,37457	7,041351	9,967875	6,774668
11,32994	7,672739	10,84706	7,355488	10,39793	7,060735	9,994877	6,796518
11,35951	7,69597	10,87114	7,375202	10,42545	7,082787	10,01715	6,815204
11,38736	7,718026	10,90022	7,398142	10,45697	7,107393	10,05051	6,84109
11,40523	7,733471	10,92299	7,416881	10,48202	7,127707	10,06948	6,857487
11,4303	7,75358	10,9477	7,436827	10,50603	7,147266	10,10037	6,881614
11,46059	7,777067	10,96824	7,453992	10,5258	7,163996	10,12672	6,902713
11,48133	7,79424	10,99664	7,476262	10,55245	7,185179	10,14392	6,917778
11,50707	7,81466	11,02226	7,496663	10,57919	7,206379	10,1743	6,941414
11,52938	7,832782	11,04586	7,515698	10,60358	7,225996	10,19762	6,960382
11,55246	7,851369	11,067	7,533083	10,6263	7,244467	10,21999	6,978681
11,57505	7,8696	11,08951	7,551323	10,64335	7,259188	10,23911	6,994801
11,59077	7,883287	11,1106	7,56859	10,66887	7,279405	10,26115	7,012794
11,61719	7,903958	11,13336	7,586907	10,68814	7,295495	10,28412	7,031345
11,63757	7,920627	11,15023	7,60134	10,70908	7,312632	10,30836	7,05068
11,65795	7,937263	11,1773	7,622405	10,73439	7,332594	10,33078	7,068787
11,67862	7,954059	11,19141	7,634956	10,75703	7,350766	10,34706	7,082837
11,69986	7,971192	11,21872	7,656104	10,77733	7,367368	10,3728	7,103027
11,71919	7,987041	11,23886	7,672532	10,79822	7,384318	10,39396	7,120184
11,73687	8,001779	11,25223	7,684484	10,81769	7,400305	10,41088	7,134537
11,76118	8,020826	11,27668	7,703666	10,83806	7,416843	10,43324	7,152404
11,77357	8,032033	11,2944	7,718405	10,85214	7,429236	10,44953	7,166273
11,79822	8,051241	11,31778	7,736813	10,87741	7,448909	10,47164	7,183903
11,81668	8,066368	11,33504	7,751188	10,89436	7,463108	10,49273	7,200839
11,83705	8,082718	11,3542	7,766772	10,91055	7,476787	10,50609	7,212697
11,85043	8,094456	11,37281	7,781973	10,93101	7,493222	10,52802	7,230108
11,87191	8,111475	11,39104	7,796891	10,951	7,509322	10,54712	7,245651
11,89048	8,126564	11,40901	7,81162	10,97066	7,525175	10,56585	7,260915
11,90632	8,139833	11,42687	7,826241	10,98293	7,536173	10,58432	7,275982
11,92764	8,156668	11,44219	7,839181	10,99994	7,550238	10,59587	7,286502
11,94377	8,17008	11,46268	7,855472	11,02174	7,567404	10,6187	7,304348
11,96287	8,185418	11,48085	7,870216	11,04127	7,583061	10,63706	7,319256
11,9797	8,199242	11,4968	7,883491	11,05628	7,595738	10,65333	7,332769
11,99702	8,21336	11,51315	7,897	11,07397	7,610138	10,66984	7,346413
12,01226	8,226095	11,52997	7,910794	11,09204	7,624762	10,68667	7,360238

# Подовження додатку Е

$\varphi=25^\circ$		$\varphi=26^\circ$		$\varphi=27^\circ$		$\varphi=28^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
9,059651	6,101216	8,700837	5,864502	8,367911	5,645055	8,058119	5,441038
9,083652	6,12	8,725062	5,883542	8,392098	5,664177	8,082052	5,460099
9,104788	6,136855	8,747782	5,901546	8,415964	5,683039	8,1067	5,479578
9,12371	6,152206	8,766304	5,91674	8,433936	5,697975	8,13066	5,498552
9,144431	6,168693	8,790477	5,935604	8,46088	5,718763	8,153149	5,516509
9,16703	6,186322	8,807749	5,949839	8,482061	5,73568	8,169363	5,530275
9,179653	6,197016	8,823062	5,962365	8,501808	5,75121	8,200926	5,553674
9,196261	6,210629	8,844303	5,979108	8,515794	5,763271	8,219019	5,568519
9,226113	6,233268	8,86594	5,996518	8,540943	5,783124	8,236469	5,583425
9,243358	6,247521	8,891023	6,015988	8,563956	5,801283	8,259489	5,601628
9,270966	6,271122	8,917925	6,039233	8,597585	5,82904	8,296831	5,631907
9,314417	6,304833	8,955014	6,068863	8,637225	5,860438	8,329946	5,659124
9,347361	6,331415	8,993254	6,099024	8,669964	5,887089	8,366087	5,688109
9,378806	6,356922	9,028718	6,127275	8,708205	5,917262	8,406529	5,719822
9,412547	6,383845	9,060938	6,153304	8,738503	5,942134	8,441912	5,748119
9,446884	6,411067	9,098222	6,182554	8,770687	5,96814	8,475946	5,775424
9,47146	6,431801	9,123894	6,204103	8,804151	5,994879	8,509148	5,802076
9,50347	6,457322	9,154828	6,229006	8,83378	6,019012	8,537293	5,82532
9,533138	6,481223	9,189535	6,256288	8,865808	6,044618	8,566647	5,84925
9,56492	6,506429	9,217927	6,27935	8,897746	6,070071	8,601499	5,876671
9,594484	6,530104	9,243469	6,300468	8,926163	6,093135	8,625905	5,897182
9,616929	6,549045	9,275772	6,325925	8,953643	6,115503	8,655211	5,9208
9,649231	6,574366	9,302668	6,347771	8,982173	6,138475	8,685011	5,944653
9,676548	6,596355	9,331415	6,370754	9,011999	6,162214	8,714375	5,968139
9,697298	6,613981	9,353543	6,389341	9,035177	6,181541	8,73959	5,988842
9,72656	6,637103	9,38107	6,411383	9,060886	6,202448	8,763419	6,008572
9,751273	6,657191	9,404052	6,430397	9,088467	6,224511	8,78883	6,029264
9,774024	6,675944	9,43149	6,45226	9,113469	6,244828	8,816412	6,051301
9,801707	6,697865	9,457838	6,473354	9,138398	6,265037	8,842302	6,072166
9,825178	6,71698	9,481199	6,49244	9,162922	6,284919	8,866612	6,091935
9,848789	6,736134	9,504395	6,511365	9,186419	6,304069	8,8906	6,111433
9,8717	6,75478	9,525783	6,529054	9,208393	6,322169	8,912566	6,129559
9,890378	6,770615	9,547249	6,54674	9,231996	6,341277	8,931955	6,145953
9,912248	6,788484	9,568951	6,564529	9,249414	6,356307	8,957254	6,166141
9,932469	6,805229	9,591356	6,582728	9,273616	6,375705	8,976996	6,182662
9,95858	6,825772	9,614868	6,601604	9,296676	6,394312	9,001472	6,202211
9,977275	6,841432	9,633393	6,617184	9,318974	6,412376	9,019252	6,217356
10,00027	6,859855	9,658022	6,636699	9,338805	6,428788	9,044347	6,23721
10,02107	6,876807	9,678319	6,653349	9,360542	6,446396	9,06339	6,253081
10,03998	6,892486	9,69461	6,667348	9,378362	6,461411	9,082492	6,268943
10,0617	6,909962	9,717724	6,685751	9,400583	6,479247	9,103795	6,286193
10,08199	6,92647	9,733087	6,699066	9,41935	6,494794	9,119824	6,299969
10,10108	6,942154	9,75772	6,718381	9,438883	6,510799	9,14226	6,317869
10,11915	6,957141	9,777104	6,734238	9,457355	6,526074	9,161704	6,333782
10,13638	6,971545	9,791456	6,746781	9,474935	6,540728	9,178333	6,347824
10,15294	6,985472	9,809257	6,761534	9,49375	6,556149	9,197987	6,363794
10,17546	7,003255	9,832669	6,779906	9,513919	6,572414	9,216996	6,379307
10,19321	7,017897	9,849418	6,793904	9,531625	6,58704	9,235487	6,394445
10,21282	7,033717	9,865837	6,807653	9,546998	6,600114	9,253571	6,409283
10,22579	7,045176	9,886125	6,823889	9,56798	6,616803	9,269481	6,422673
10,24726	7,06215	9,904226	6,83867	9,584874	6,6308	9,287063	6,437116
10,26445	7,076301	9,920249	6,852065	9,601692	6,644714	9,304528	6,45145
10,28174	7,090486	9,938358	6,866788	9,618516	6,658601	9,32196	6,46573
10,29921	7,104759	9,954563	6,880242	9,635425	6,672512	9,337577	6,4788
10,31481	7,117787	9,970974	6,8938	9,65249	6,686495	9,355168	6,493122



# Подовження додатку Е

$\varphi=29^\circ$		$\varphi=30^\circ$		$\varphi=31^\circ$		$\varphi=32^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
7,774357	5,254336	7,503675	5,076411	7,249917	4,90978	7,015868	4,756252
7,798074	5,27336	7,526803	5,095155	7,277174	4,931338	7,042223	4,77732
7,81771	5,289645	7,552477	5,115504	7,303149	4,95198	7,068294	4,798119
7,846718	5,312029	7,5744	5,133332	7,324163	4,969305	7,093552	4,818312
7,865119	5,327399	7,601292	5,154365	7,352879	4,991619	7,118519	4,838256
7,892132	5,348358	7,624038	5,172626	7,371678	5,007394	7,140088	4,855936
7,908705	5,362054	7,64355	5,188393	7,402261	5,030554	7,165687	4,875987
7,930008	5,379096	7,667752	5,207421	7,420199	5,045572	7,186103	4,892714
7,950575	5,396121	7,690573	5,22597	7,44495	5,065412	7,212505	4,913644
7,977157	5,416688	7,712911	5,243788	7,465037	5,081785	7,233583	4,93069
8,013857	5,446631	7,747076	5,272156	7,502742	5,11255	7,271143	4,961445
8,04897	5,475253	7,791318	5,306841	7,547256	5,147501	7,315682	4,996503
8,087172	5,505688	7,830469	5,337994	7,580455	5,174875	7,355819	5,028503
8,128914	5,538347	7,866209	5,36683	7,623398	5,208504	7,392541	5,058171
8,161686	5,565032	7,902734	5,396058	7,656875	5,235834	7,428785	5,087388
8,197161	5,593366	7,932998	5,421076	7,693911	5,265345	7,466076	5,11714
8,229933	5,619817	7,971194	5,451139	7,725169	5,290962	7,496325	5,142171
8,262778	5,646203	8,002092	5,476326	7,759771	5,318625	7,534064	5,171932
8,28947	5,668468	8,032058	5,500791	7,792488	5,344939	7,563765	5,196341
8,320627	5,69354	8,065452	5,527377	7,822199	5,369182	7,596455	5,222566
8,353335	5,719521	8,093939	5,550662	7,852202	5,393503	7,623015	5,244691
8,378056	5,740206	8,120091	5,57233	7,878235	5,41514	7,654344	5,269799
8,408829	5,76474	8,151591	5,597379	7,907923	5,439047	7,68109	5,291829
8,438811	5,788673	8,180853	5,620882	7,938974	5,463743	7,712175	5,316574
8,464527	5,809744	8,20234	5,639244	7,964614	5,484834	7,736797	5,337034
8,486433	5,828267	8,229649	5,661312	7,98836	5,504612	7,762585	5,358167
8,512245	5,849255	8,256224	5,682819	8,01688	5,527409	7,787505	5,378658
8,53823	5,870277	8,284218	5,705173	8,041136	5,547365	7,813409	5,399711
8,567407	5,893305	8,309445	5,725661	8,068004	5,568946	7,841659	5,42221
8,591352	5,912866	8,334018	5,745659	8,091949	5,588561	7,865935	5,442061
8,614448	5,931814	8,356155	5,764012	8,115918	5,608126	7,88876	5,4609
8,63625	5,949863	8,377672	5,7819	8,135292	5,624644	7,912827	5,480475
8,657367	5,967409	8,400249	5,800416	8,159101	5,643975	7,932609	5,497207
8,678321	5,984793	8,42255	5,818694	8,182543	5,663004	7,957017	5,516869
8,705208	6,005978	8,445015	5,837019	8,206048	5,682014	7,976394	5,53321
8,725204	6,022632	8,468021	5,855641	8,226532	5,699006	7,999472	5,551887
8,744352	6,038683	8,486527	5,871286	8,24436	5,714219	8,021564	5,569865
8,768546	6,05796	8,509803	5,889973	8,268422	5,733419	8,041314	5,58627
8,788733	6,074586	8,530952	5,907229	8,288664	5,750088	8,062289	5,603414
8,805205	6,088749	8,550235	5,923223	8,305356	5,764404	8,079786	5,618252
8,827416	6,106594	8,569651	5,939256	8,328927	5,78313	8,102218	5,636236
8,844507	6,121068	8,585873	5,953168	8,347654	5,798669	8,118311	5,650064
8,867673	6,139443	8,609635	5,971929	8,366819	5,814443	8,139672	5,667259
8,886088	6,15469	8,627029	5,986514	8,386572	5,830556	8,158301	5,682637
8,905397	6,170475	8,643494	6,000451	8,402013	5,843828	8,174356	5,696305
8,920288	6,183352	8,664393	6,017226	8,423363	5,86089	8,191217	5,710452
8,941775	6,200473	8,682868	6,032389	8,440664	5,875287	8,213836	5,728288
8,959098	6,214852	8,700784	6,047149	8,459064	5,890357	8,231017	5,742562
8,972395	6,226579	8,718249	6,06158	8,473659	5,902921	8,247715	5,756484
8,994366	6,243904	8,735363	6,075747	8,49122	5,917373	8,265631	5,771159
9,010706	6,257537	8,75222	6,089712	8,51016	5,932682	8,28164	5,784562
9,028692	6,272206	8,768903	6,10353	8,527237	5,94675	8,299034	5,798828
9,044824	6,285638	8,785494	6,117254	8,542538	5,959632	8,314686	5,81193
9,060969	6,299047	8,802065	6,130934	8,55945	5,973526	8,331866	5,825991
9,077195	6,312477	8,818685	6,144614	8,576382	5,987401	8,347445	5,838981



# Подовження додатку Е

$\varphi=33^\circ$		$\varphi=34^\circ$		$\varphi=35^\circ$		$\varphi=36^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
6,792021	4,609569	6,578209	4,46959	6,383618	4,342322	6,192281	4,217319
6,820653	4,632235	6,606576	4,492212	6,407757	4,362284	6,22676	4,244122
6,846642	4,653075	6,637071	4,516101	6,442694	4,389214	6,25642	4,267738
6,870606	4,67251	6,664396	4,537816	6,468781	4,410203	6,282927	4,289117
6,897007	4,693473	6,692381	4,55989	6,493207	4,430033	6,308631	4,309853
6,920916	4,71277	6,713149	4,577219	6,521377	4,452263	6,333525	4,330021
6,949645	4,73501	6,737118	4,596503	6,542425	4,469783	6,363735	4,353629
6,972359	4,75332	6,761565	4,616024	6,568517	4,490451	6,384494	4,370904
6,992164	4,769951	6,782968	4,633696	6,590993	4,508814	6,407882	4,389853
7,015513	4,788503	6,811077	4,655371	6,617714	4,52961	6,434527	4,410625
7,05818	4,82267	6,855361	4,690674	6,661936	4,564958	6,477225	4,445073
7,095608	4,853192	6,892347	4,721006	6,704265	4,598859	6,524261	4,482122
7,135859	4,885368	6,937682	4,756585	6,742677	4,630041	6,566601	4,515946
7,178368	4,918891	6,973888	4,786101	6,783577	4,662689	6,606166	4,547808
7,216746	4,949576	7,014053	4,818021	6,820049	4,692287	6,64343	4,577986
7,248657	4,975904	7,04598	4,844431	6,858195	4,722786	6,675954	4,60488
7,28305	5,003692	7,08161	4,873077	6,890316	4,749193	6,711732	4,633696
7,314983	5,029739	7,113718	4,899274	6,925845	4,777646	6,745277	4,660909
7,348892	5,056921	7,150801	4,928548	6,9606	4,80545	6,777761	4,687287
7,381781	5,083308	7,181274	4,953407	6,988724	4,828831	6,813173	4,715414
7,411343	5,107417	7,208302	4,975913	7,023118	4,856138	6,839995	4,737862
7,439858	5,130734	7,239156	5,000778	7,05107	4,879157	6,8699	4,762173
7,468977	5,154335	7,270306	5,025723	7,079151	4,902145	6,899687	4,786286
7,499933	5,179024	7,29902	5,048986	7,109517	4,926499	6,930553	4,81098
7,523467	5,198808	7,323393	5,069341	7,135504	4,947919	6,954287	4,830966
7,550979	5,221087	7,35237	5,092592	7,161031	4,968963	6,98107	4,85284
7,577465	5,24262	7,375353	5,111883	7,185356	4,989141	7,006556	4,87378
7,599745	5,26135	7,403816	5,134631	7,210197	5,009561	7,03242	4,894868
7,629161	5,28462	7,428454	5,154823	7,238664	5,032235	7,059009	4,916332
7,652655	5,30398	7,452091	5,174287	7,262359	5,051742	7,08269	4,935833
7,675315	5,322726	7,474513	5,192886	7,285404	5,070748	7,105664	4,954793
7,698754	5,341902	7,497292	5,21164	7,307496	5,089059	7,128522	4,973597
7,71961	5,359337	7,519069	5,229673	7,330063	5,107603	7,151766	4,992573
7,739992	5,376397	7,540309	5,24729	7,352038	5,125692	7,170001	5,008247
7,765131	5,396469	7,561413	5,264751	7,373814	5,143583	7,192363	5,026511
7,787322	5,414571	7,58582	5,284282	7,395732	5,161501	7,216251	5,045693
7,806909	5,430927	7,604559	5,300088	7,41362	5,176755	7,233289	5,060394
7,82897	5,448826	7,627174	5,31834	7,436697	5,195298	7,256747	5,079174
7,848971	5,465336	7,647746	5,335215	7,457748	5,212475	7,276759	5,095674
7,867154	5,480615	7,666509	5,350866	7,477001	5,228437	7,293561	5,110048
7,888467	5,49787	7,686725	5,367403	7,49614	5,244272	7,315943	5,127967
7,906772	5,513127	7,702475	5,381003	7,513867	5,259144	7,331196	5,141236
7,925397	5,528544	7,724579	5,398663	7,533289	5,275062	7,353766	5,159178
7,944491	5,544218	7,742537	5,413596	7,551609	5,290222	7,370955	5,173599
7,959496	5,557201	7,761049	5,428841	7,568963	5,304712	7,387182	5,187354
7,981491	5,574666	7,778724	5,443503	7,586943	5,319563	7,405408	5,202355
7,998086	5,588593	7,79719	5,458634	7,605659	5,334847	7,424319	5,217756
8,01564	5,603102	7,813536	5,472354	7,622293	5,348746	7,4426	5,232709
8,03425	5,618255	7,827872	5,484735	7,63695	5,361327	7,456105	5,24454
8,047794	5,630092	7,8463	5,499724	7,655548	5,376417	7,474828	5,2597
8,067229	5,645706	7,864392	5,51446	7,673797	5,391244	7,491777	5,273678
8,083323	5,659122	7,880728	5,528024	7,688867	5,403981	7,508444	5,287438
8,100804	5,673401	7,896885	5,541438	7,705196	5,417497	7,523491	5,300116
8,116645	5,686586	7,912931	5,554746	7,721397	5,430896	7,539806	5,31358
8,132462	5,699723	7,928931	5,567993	7,737535	5,444222	7,554633	5,326049

$\varphi=37^\circ$		$\varphi=38^\circ$		$\varphi=39^\circ$		$\varphi=40^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
6,017525	4,103288	5,851345	3,994992	5,687153	3,888138	5,536508	3,790241
6,047661	4,127334	5,884078	4,020801	5,721708	3,915205	5,572974	3,81862
6,079423	4,152412	5,911025	4,042808	5,750549	3,938495	5,603907	3,843309
6,106085	4,174058	5,937007	4,064174	5,783522	3,964504	5,629888	3,864845
6,137235	4,198404	5,969362	4,0894	5,813068	3,988061	5,663456	3,8912
6,159637	4,21702	5,998382	4,112372	5,839446	4,009378	5,691708	3,913782
6,186643	4,238664	6,023699	4,133027	5,867692	4,032027	5,718166	3,935359
6,215459	4,261239	6,04732	4,152301	5,89252	4,052145	5,744016	3,956198
6,233006	4,276392	6,071853	4,171978	5,917336	4,072002	5,769027	3,976182
6,261935	4,298675	6,099064	4,193178	5,942883	4,09216	5,79512	3,99673
6,306378	4,334344	6,142592	4,228347	5,99072	4,130207	5,839499	4,032641
6,351785	4,37043	6,186337	4,263451	6,032484	4,164125	5,889247	4,071797
6,392561	4,403337	6,230327	4,29853	6,078906	4,200858	5,928709	4,104127
6,430997	4,43455	6,271918	4,331841	6,116273	4,23148	5,970948	4,13791
6,469353	4,465473	6,311755	4,363749	6,155151	4,262816	6,008677	4,168561
6,505841	4,494971	6,346825	4,392381	6,193438	4,293575	6,045351	4,198334
6,544766	4,525865	6,38382	4,422076	6,228534	4,322093	6,082918	4,228484
6,576276	4,55181	6,417912	4,449729	6,264944	4,351276	6,117072	4,25625
6,611154	4,579772	6,450353	4,476155	6,295031	4,376221	6,14911	4,282477
6,639276	4,603229	6,480519	4,500962	6,327035	4,402236	6,182719	4,309543
6,672721	4,629978	6,511144	4,525918	6,359225	4,428218	6,212138	4,333763
6,699752	4,65246	6,539793	4,549464	6,389286	4,452689	6,243467	4,359059
6,731014	4,677544	6,567998	4,572594	6,414534	4,473932	6,269954	4,38111
6,760462	4,701339	6,599501	4,597724	6,446209	4,499179	6,300096	4,405377
6,783776	4,721071	6,623192	4,617713	6,471839	4,520424	6,325076	4,426211
6,811644	4,743656	6,652	4,640908	6,497344	4,541499	6,351427	4,447829
6,838135	4,765251	6,675139	4,66035	6,525481	4,564154	6,376261	4,46836
6,864884	4,786913	6,702672	4,682515	6,549596	4,584118	6,401095	4,488781
6,888784	4,806644	6,72819	4,703286	6,574142	4,60426	6,428629	4,510833
6,91325	4,82665	6,751668	4,722652	6,598262	4,624033	6,452516	4,530448
6,936095	4,845524	6,774617	4,741589	6,620723	4,642649	6,475252	4,549234
6,95535	4,862004	6,795947	4,7594	6,641287	4,659962	6,495045	4,566046
6,979187	4,881356	6,820274	4,77906	6,666039	4,679886	6,520153	4,586188
7,002338	4,900193	6,839772	4,795538	6,686047	4,696686	6,540597	4,60326
7,025184	4,918762	6,863036	4,814368	6,70966	4,71573	6,560631	4,619997
7,045247	4,935472	6,883549	4,83136	6,730553	4,732958	6,583137	4,638251
7,062839	4,950524	6,901616	4,846712	6,749024	4,748564	6,600672	4,653249
7,086608	4,969495	6,924279	4,864961	6,770603	4,766106	6,623759	4,671749
7,1056	4,98533	6,943621	4,881014	6,790237	4,782338	6,643634	4,688127
7,124221	5,00087	6,963916	4,897623	6,808135	4,797397	6,660508	4,70252
7,145437	5,018028	6,982646	4,913172	6,82842	4,813936	6,680953	4,719152
7,162476	5,032443	6,99864	4,926906	6,847316	4,82953	6,700018	4,734845
7,182429	5,048686	7,020126	4,944126	6,864981	4,844282	6,717856	4,749699
7,199899	5,063281	7,037823	4,958859	6,882862	4,859123	6,735879	4,764623
7,215024	5,076318	7,055896	4,973788	6,901082	4,874137	6,750395	4,777246
7,233444	5,091435	7,070441	4,986399	6,915845	4,886881	6,769148	4,792546
7,25388	5,107809	7,089607	5,001944	6,935082	4,902461	6,787157	4,807325
7,269551	5,12107	7,106795	5,016173	6,952374	4,916747	6,803252	4,82083
7,284687	5,133945	7,122102	5,02915	6,967814	4,9298	6,817524	4,833123
7,303494	5,149148	7,136954	5,041794	6,982791	4,942515	6,8364	4,848335
7,319185	5,162305	7,156768	5,057597	6,999984	4,956619	6,852348	4,861627
7,335956	5,176122	7,172274	5,070588	7,016866	4,970485	6,867982	4,874678
7,351135	5,188876	7,187548	5,083394	7,032205	4,983322	6,883381	4,887538
7,367528	5,202379	7,202656	5,096057	7,047368	4,99601	6,898606	4,900249
7,382458	5,214905	7,21899	5,109478	7,062421	5,008592	6,913714	4,912848

# Подовження додатку Е

$\varphi=41^\circ$		$\varphi=42^\circ$		$\varphi=43^\circ$		$\varphi=44^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
5,392654	3,696894	5,255115	3,607779	5,123459	3,52261	4,997295	3,441123
5,424942	3,722639	5,288991	3,634635	5,158666	3,55041	5,0336	3,469719
5,457248	3,748259	5,322883	3,661319	5,193914	3,578011	5,069991	3,498104
5,489565	3,77394	5,354981	3,686882	5,225745	3,603419	5,101503	3,523322
5,519408	3,798056	5,383662	3,710358	5,253358	3,626274	5,128118	3,545574
5,549968	3,822206	5,413843	3,734397	5,282978	3,65012	5,160793	3,571565
5,574702	3,842746	5,442115	3,757282	5,309456	3,671903	5,186631	3,592979
5,60141	3,864195	5,464337	3,775895	5,337639	3,694403	5,215453	3,615935
5,626533	3,884257	5,494667	3,79932	5,362557	3,714362	5,240084	3,635732
5,65513	3,90646	5,520329	3,819673	5,39234	3,737408	5,270678	3,659342
5,698997	3,942138	5,568326	3,858106	5,442109	3,777072	5,320095	3,698872
5,746405	3,979874	5,613179	3,894284	5,488816	3,814523	5,367336	3,736734
5,789104	4,014338	5,658762	3,930629	5,532679	3,849781	5,410611	3,771641
5,830657	4,047722	5,699402	3,963482	5,572336	3,882069	5,453277	3,805917
5,871539	4,080458	5,738826	3,995336	5,610301	3,913042	5,489707	3,835959
5,906526	4,109196	5,776283	4,025704	5,650006	3,944886	5,5275	3,866612
5,942056	4,138075	5,809765	4,053304	5,68545	3,973769	5,564735	3,896661
5,978167	4,167125	5,847595	4,083477	5,720889	4,00243	5,597868	3,923863
6,011916	4,194473	5,878877	4,109261	5,75365	4,029175	5,631975	3,951479
6,04288	4,219859	5,911229	4,13555	5,783404	4,053812	5,662943	3,976898
6,073652	4,244959	5,943188	4,161418	5,816436	4,080371	5,693233	4,001709
6,102108	4,268422	5,972722	4,185579	5,843188	4,102758	5,724621	4,027057
6,13366	4,293728	6,001275	4,208966	5,872624	4,126711	5,751174	4,04917
6,161502	4,316523	6,029192	4,231811	5,902798	4,150998	5,781259	4,073395
6,186586	4,337427	6,055837	4,253715	5,928655	4,172396	5,808483	4,095663
6,213676	4,359515	6,079798	4,273795	5,953295	4,192904	5,833719	4,116543
6,2392	4,380482	6,105941	4,295151	5,979977	4,214595	5,857304	4,136247
6,264641	4,401286	6,131925	4,316293	6,002786	4,233698	5,884169	4,15793
6,289569	4,421658	6,156592	4,336488	6,030077	4,25556	5,908239	4,177723
6,313196	4,441097	6,179931	4,355735	6,053105	4,274597	5,931642	4,196991
6,336404	4,460178	6,20256	4,374435	6,075868	4,293374	5,954733	4,215966
6,35669	4,477298	6,22574	4,393401	6,098156	4,31176	5,973801	4,232286
6,378312	4,495195	6,247701	4,411506	6,120411	4,330043	5,996308	4,25072
6,399137	4,512503	6,26884	4,429007	6,14182	4,347707	6,017946	4,268521
6,42328	4,531866	6,289501	4,446128	6,162722	4,364974	6,03905	4,285907
6,44351	4,548651	6,309985	4,463067	6,182223	4,381274	6,061075	4,303812
6,463871	4,565454	6,330559	4,479997	6,200592	4,396784	6,080795	4,320176
6,483354	4,581631	6,350242	4,496293	6,222814	4,414696	6,099608	4,335898
6,503424	4,598125	6,369252	4,512097	6,241972	4,430586	6,118882	4,351852
6,520541	4,612666	6,387782	4,527536	6,258265	4,444583	6,135332	4,365942
6,541106	4,629364	6,40722	4,543502	6,278974	4,461352	6,156071	4,382718
6,556573	4,642739	6,424086	4,557765	6,294781	4,474927	6,171999	4,396362
6,577032	4,659265	6,443375	4,573529	6,314113	4,490709	6,191352	4,412145
6,595162	4,674248	6,46037	4,587774	6,332369	4,505751	6,208501	4,426463
6,611091	4,68777	6,475199	4,600581	6,346127	4,517863	6,223569	4,439395
6,62989	4,703089	6,494019	4,615902	6,364969	4,53318	6,242426	4,454703
6,645467	4,716295	6,510887	4,629925	6,381905	4,547228	6,258246	4,46802
6,662875	4,730633	6,527125	4,643498	6,398207	4,560823	6,274578	4,481621
6,678487	4,743777	6,542821	4,656678	6,413957	4,574022	6,288048	4,493345
6,693639	4,756581	6,558053	4,669517	6,429235	4,586876	6,306803	4,508414
6,710883	4,770689	6,575307	4,683613	6,445291	4,60019	6,321694	4,520967
6,725343	4,782967	6,59103	4,696688	6,461016	4,613252	6,336246	4,533266
6,74079	4,795842	6,605288	4,708785	6,476473	4,626106	6,351678	4,546091
6,756049	4,808559	6,620553	4,721492	6,490544	4,638035	6,365744	4,558004
6,771177	4,821157	6,635677	4,734074	6,505644	4,650588	6,380806	4,57052

Подовження додатку Е

$\varphi=45^\circ$		$\varphi=46^\circ$		$\varphi=47^\circ$		$\varphi=48^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
4,876265	3,363079	4,760042	3,288261	4,648328	3,216468	4,540849	3,147516
4,913458	3,392339	4,797934	3,318065	4,686748	3,246708	4,579641	3,178095
4,950797	3,421386	4,836042	3,347662	4,725461	3,276757	4,61881	3,208505
4,981935	3,446381	4,866753	3,372407	4,760888	3,30455	4,653522	3,235872
5,013237	3,471667	4,896932	3,396975	4,790028	3,328453	4,68667	3,262334
5,042975	3,495946	4,926237	3,421133	4,820662	3,353557	4,713789	3,285249
5,068173	3,516984	4,958332	3,446634	4,847733	3,375919	4,745026	3,310367
5,097526	3,540323	4,983619	3,46741	4,878029	3,399936	4,775748	3,334688
5,126471	3,562913	5,012025	3,489686	4,905699	3,421777	4,80266	3,356089
5,153097	3,584025	5,041994	3,512984	4,934372	3,444295	4,830871	3,378362
5,202053	3,623354	5,091934	3,553033	4,985133	3,484952	4,881565	3,41903
5,24955	3,661417	5,139491	3,591153	5,032694	3,523088	4,928986	3,457113
5,292338	3,696065	5,181554	3,625405	5,077744	3,559314	4,973069	3,492798
5,333815	3,729644	5,225548	3,660642	5,116549	3,5913	5,014199	3,526306
5,376502	3,76372	5,262714	3,691236	5,159425	3,625552	5,055282	3,55944
5,412368	3,793171	5,30045	3,721899	5,195183	3,654975	5,092666	3,589908
5,447457	3,821869	5,33709	3,751597	5,229666	3,683311	5,128505	3,619112
5,482047	3,850012	5,37297	3,780569	5,266728	3,713037	5,163207	3,647339
5,517343	3,87839	5,405762	3,807356	5,300567	3,74049	5,198002	3,675398
5,549382	3,904496	5,435257	3,831845	5,33101	3,765583	5,229314	3,70104
5,577005	3,927609	5,467327	3,857789	5,360405	3,789824	5,259455	3,725752
5,609163	3,953446	5,496687	3,88184	5,390457	3,814311	5,286809	3,748522
5,636484	3,976047	5,524704	3,904881	5,419083	3,837734	5,315985	3,772288
5,665728	3,99973	5,554489	3,928902	5,447997	3,861194	5,345349	3,796024
5,6914	4,021005	5,580699	3,950514	5,472681	3,881828	5,370499	3,816948
5,717174	4,042217	5,606942	3,972014	5,499342	3,903582	5,397523	3,83892
5,741262	4,062232	5,631467	3,992297	5,52426	3,924104	5,422778	3,859644
5,76848	4,084128	5,655605	4,012218	5,548735	3,944229	5,44754	3,879941
5,79222	4,1037	5,681025	4,03285	5,573747	3,96459	5,470843	3,899205
5,815256	4,122724	5,70368	4,051621	5,596667	3,98352	5,493986	3,918267
5,83771	4,141284	5,726838	4,07062	5,619594	4,002361	5,515809	3,936397
5,859392	4,159263	5,747633	4,088025	5,638423	4,018508	5,53807	3,954717
5,882098	4,177814	5,767163	4,104543	5,66143	4,037229	5,557976	3,971457
5,900503	4,193543	5,789136	4,122537	5,683518	4,055286	5,580152	3,98956
5,921769	4,211023	5,810529	4,140088	5,701745	4,070812	5,598518	4,005166
5,943902	4,228985	5,831628	4,15738	5,724005	4,088833	5,619741	4,022516
5,963752	4,245423	5,849359	4,172458	5,740771	4,103287	5,637694	4,037715
5,982687	4,261213	5,870606	4,189711	5,762038	4,120542	5,657944	4,0543
6,002047	4,277213	5,888917	4,205031	5,780437	4,135901	5,676431	4,069696
6,018621	4,291373	5,907811	4,220661	5,79941	4,151559	5,693327	4,084015
6,038236	4,307418	5,925264	4,235307	5,816943	4,166239	5,713027	4,100059
6,055406	4,321843	5,941421	4,249066	5,833179	4,180034	5,730375	4,114549
6,073672	4,33691	5,960832	4,264846	5,851496	4,195101	5,74762	4,12892
6,090893	4,351255	5,976987	4,278495	5,868767	4,20945	5,763824	4,142577
6,107181	4,364953	5,993312	4,292203	5,885107	4,223154	5,779099	4,155591
6,12264	4,378072	6,008807	4,305333	5,900616	4,236282	5,794607	4,168707
6,14075	4,392841	6,02688	4,320064	5,917556	4,250276	5,812565	4,183336
6,15596	4,40571	6,0421	4,332928	5,933851	4,263815	5,827759	4,19616
6,171737	4,4189	6,057862	4,346096	5,946337	4,274879	5,843454	4,209259
6,187032	4,43174	6,073139	4,358912	5,961585	4,287664	5,858664	4,222007
6,203046	4,445	6,08911	4,372132	5,978586	4,301527	5,873462	4,234449
6,217589	4,457281	6,103631	4,384386	5,993075	4,313747	5,887912	4,246631
6,232983	4,470068	6,117871	4,396422	6,008365	4,32644	5,902077	4,258591
6,247029	4,481956	6,131888	4,408278	6,022345	4,338259	5,916014	4,270367
6,260913	4,493705	6,146845	4,4207	6,036156	4,349932	5,929779	4,281996

Подовження додатку Е

$\varphi=49^\circ$		$\varphi=50^\circ$		$\varphi=51^\circ$		$\varphi=52^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
4,437352	3,081237	4,337605	3,017475	4,245032	2,958406	4,152034	2,899174
4,476378	3,112068	4,38082	3,051082	4,284465	2,989704	4,195169	2,932933
4,515865	3,142756	4,420866	3,082203	4,324581	3,020955	4,235604	2,96447
4,55468	3,172777	4,454279	3,108824	4,361712	3,04999	4,271969	2,993073
4,586658	3,198489	4,489809	3,136795	4,395952	3,077141	4,30942	3,022265
4,615119	3,222287	4,519523	3,161399	4,426832	3,102477	4,336889	3,045422
4,645538	3,246983	4,549103	3,18566	4,455567	3,126295	4,368515	3,071154
4,672366	3,26886	4,58045	3,210441	4,487128	3,151239	4,396501	3,093863
4,702738	3,292509	4,609759	3,23346	4,515493	3,173715	4,427669	3,118168
4,732046	3,315529	4,63683	3,25511	4,545777	3,197448	4,457241	3,141473
4,781059	3,355162	4,68715	3,295592	4,595778	3,237742	4,510333	3,183752
4,831889	3,395462	4,737381	3,335572	4,64534	3,277365	4,559065	3,222916
4,874875	3,43052	4,782752	3,372205	4,689507	3,313293	4,601952	3,258086
4,918079	3,465378	4,82438	3,406093	4,733006	3,348384	4,643865	3,292192
4,957353	3,497382	4,861896	3,436998	4,772097	3,380293	4,684421	3,325028
4,996188	3,528777	4,902072	3,469244	4,810228	3,411247	4,723734	3,356725
5,029875	3,556621	4,936954	3,497845	4,846214	3,440545	4,757574	3,384668
5,065618	3,585507	4,970375	3,525261	4,880559	3,468541	4,79277	3,413196
5,097965	3,612012	5,003572	3,5523	4,91451	3,49605	4,827411	3,441133
5,130069	3,638153	5,036376	3,578877	4,944807	3,52104	4,858339	3,466514
5,16089	3,66329	5,067796	3,604386	4,97677	3,546884	4,887741	3,490735
5,188869	3,686452	5,096325	3,62789	5,0058	3,570697	4,917224	3,514826
5,218527	3,710514	5,12326	3,650222	5,033177	3,593301	4,945002	3,537674
5,247	3,733676	5,152733	3,674007	5,061124	3,61611	4,973261	3,560669
5,273836	3,755661	5,179281	3,695799	5,08676	3,637317	4,999191	3,582052
5,297996	3,775805	5,203784	3,71615	5,111568	3,65785	5,02426	3,602739
5,323548	3,796707	5,229588	3,7372	5,137592	3,679026	5,047491	3,622142
5,348562	3,817152	5,25172	3,75581	5,159965	3,697781	5,073041	3,642893
5,372095	3,836552	5,276685	3,776107	5,185066	3,718152	5,097062	3,662571
5,394797	3,855324	5,299554	3,794976	5,208072	3,737098	5,119583	3,681201
5,417421	3,873954	5,322102	3,813547	5,229719	3,755089	5,141132	3,699121
5,436671	3,890354	5,343561	3,831339	5,249263	3,77166	5,162753	3,716996
5,459852	3,909163	5,363719	3,848221	5,27252	3,790493	5,183115	3,733976
5,478959	3,925307	5,382926	3,864421	5,291849	3,806751	5,202557	3,750284
5,500564	3,942961	5,404591	3,882092	5,31057	3,822536	5,221363	3,766107
5,520792	3,959662	5,423883	3,898178	5,331934	3,839916	5,242731	3,783473
5,539911	3,975581	5,441035	3,912831	5,350165	3,85524	5,260998	3,798808
5,558127	3,990855	5,462368	3,930067	5,369472	3,871177	5,280299	3,814729
5,576666	4,006268	5,480933	3,945483	5,388042	3,886584	5,297875	3,829494
5,592581	4,01995	5,496902	3,959189	5,403046	3,899668	5,313897	3,843214
5,612262	4,035967	5,515526	3,974521	5,422637	3,915601	5,333428	3,859095
5,629616	4,050449	5,530832	3,987691	5,43996	3,930039	5,347771	3,871634
5,646853	4,064804	5,550086	4,003314	5,456142	3,943699	5,366878	3,887132
5,663055	4,078447	5,566273	4,016936	5,473305	3,957927	5,383008	3,900692
5,678332	4,091452	5,582561	4,030571	5,488554	3,970891	5,396265	3,91238
5,693826	4,104546	5,598031	4,043638	5,503994	3,983924	5,414619	3,927246
5,711712	4,119116	5,613799	4,056845	5,519716	3,997088	5,429308	3,93974
5,726879	4,131909	5,62893	4,069602	5,53581	4,010441	5,444354	3,952412
5,742528	4,144964	5,643505	4,08196	5,549344	4,022123	5,459835	3,965313
5,754569	4,155679	5,65862	4,094617	5,564404	4,03473	5,471881	3,975991
5,771404	4,169405	5,673323	4,106969	5,579055	4,047033	5,488449	3,989493
5,78581	4,181543	5,687679	4,11906	5,59336	4,059074	5,502699	4,001483
5,799929	4,193459	5,701749	4,130928	5,607377	4,070922	5,515674	4,012623
5,813819	4,205189	5,715588	4,142611	5,621163	4,082524	5,529404	4,024201
5,827534	4,216771	5,72925	4,154142	5,63477	4,094000	5,542955	4,035627

# Подовження додатку Е

$\varphi=53^\circ$		$\varphi=54^\circ$		$\varphi=55^\circ$		$\varphi=56^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
4,062197	2,842067	3,978638	2,789051	3,894518	2,735785	3,813089	2,684327
4,105	2,87572	4,021324	2,822733	3,940191	2,771459	3,861476	2,721815
4,149343	2,909822	4,065665	2,856921	3,984446	2,805681	3,905568	2,756025
4,184909	2,937979	4,104569	2,887248	4,022373	2,83546	3,942499	2,785251
4,220964	2,966298	4,139311	2,914755	4,059868	2,864723	3,982536	2,816135
4,253653	2,992736	4,172665	2,941586	4,089931	2,889456	4,013228	2,841243
4,283872	3,017646	4,201526	2,965698	4,12137	2,91524	4,043304	2,866206
4,312216	3,040609	4,230169	2,988877	4,150259	2,9386	4,075887	2,891908
4,342189	3,064217	4,258943	3,01179	4,181361	2,963021	4,105722	2,915553
4,372545	3,088015	4,290756	3,036486	4,211711	2,986787	4,135264	2,938823
4,423583	3,12905	4,342371	3,077953	4,263098	3,028184	4,188871	2,981688
4,471555	3,167804	4,392701	3,118248	4,312447	3,067919	4,237147	3,020799
4,516505	3,204314	4,436255	3,153913	4,357811	3,104743	4,281106	3,05676
4,560056	3,23946	4,478165	3,188032	4,401166	3,139769	4,322837	3,090767
4,598789	3,271149	4,51819	3,220531	4,439352	3,171111	4,36515	3,124684
4,639197	3,30353	4,556548	3,251618	4,47868	3,202799	4,402442	3,155091
4,674017	3,332087	4,592274	3,280739	4,515216	3,232421	4,436853	3,183377
4,709969	3,361083	4,625953	3,3083	4,549568	3,260399	4,471852	3,211751
4,742209	3,387503	4,658835	3,335116	4,580111	3,285741	4,505802	3,23922
4,773713	3,413239	4,690865	3,361176	4,612603	3,312081	4,535884	3,264043
4,803609	3,437765	4,721211	3,385975	4,643341	3,337118	4,566979	3,289293
4,833489	3,462096	4,751447	3,41052	4,671043	3,360063	4,595011	3,312436
4,861614	3,485153	4,779886	3,433765	4,699762	3,383473	4,62397	3,335985
4,888966	3,507567	4,806922	3,455969	4,727605	3,406172	4,651454	3,358447
4,913396	3,527994	4,832186	3,476911	4,752523	3,426887	4,677123	3,379622
4,938693	3,548815	4,857675	3,497842	4,778176	3,44791	4,700147	3,398988
4,962134	3,568342	4,881291	3,517471	4,801941	3,467623	4,724036	3,41877
4,987802	3,589155	4,90419	3,536531	4,824957	3,486749	4,749901	3,439672
5,011345	3,608522	4,928965	3,556663	4,849777	3,506897	4,772582	3,458458
5,03396	3,627201	4,951652	3,575377	4,871443	3,524948	4,794365	3,476558
5,055202	3,644918	4,972823	3,593027	4,89291	3,542761	4,816269	3,494628
5,074994	3,661616	4,991788	3,609183	4,91291	3,559552	4,835414	3,51087
5,095458	3,678639	5,012319	3,626232	4,93348	3,576612	4,856003	3,527929
5,117872	3,696806	5,03473	3,64438	4,953078	3,592978	4,875612	3,54429
5,136734	3,712651	5,053626	3,660236	4,97199	3,608832	4,894525	3,560134
5,156156	3,728775	5,073049	3,676348	4,99326	3,626095	4,914824	3,576773
5,173476	3,7435	5,090387	3,691075	5,011534	3,6414	4,931247	3,590904
5,193719	3,760004	5,110579	3,707533	5,029807	3,656636	4,951317	3,607255
5,211289	3,774753	5,128131	3,72226	5,047333	3,671334	4,968811	3,621919
5,229245	3,789685	5,143208	3,735361	5,064278	3,6856	4,983891	3,634999
5,245814	3,803679	5,162597	3,751121	5,080793	3,699534	5,003121	3,650625
5,263064	3,818045	5,176956	3,763647	5,097948	3,713809	5,017471	3,663118
5,279194	3,831645	5,194947	3,778409	5,114003	3,727333	5,035319	3,677754
5,295285	3,845166	5,210995	3,791887	5,130006	3,740767	5,051273	3,69114
5,311445	3,858677	5,225204	3,80415	5,143259	3,75241	5,065434	3,703342
5,326807	3,871632	5,240521	3,817059	5,158528	3,765272	5,080655	3,716156
5,342428	3,8847	5,257036	3,830676	5,175906	3,779415	5,096105	3,729063
5,356457	3,896713	5,271983	3,843252	5,189864	3,791349	5,110945	3,741536
5,371877	3,909558	5,285434	3,854834	5,203282	3,802894	5,125249	3,753623
5,383915	3,920215	5,300318	3,867276	5,218104	3,815279	5,137243	3,764204
5,400391	3,933641	5,314797	3,879418	5,232522	3,827364	5,153444	3,777397
5,414585	3,945578	5,328932	3,8913	5,246598	3,83919	5,166537	3,788583
5,42752	3,956674	5,342781	3,902958	5,260388	3,850793	5,180266	3,800129
5,441194	3,9682	5,356396	3,914428	5,273004	3,861612	5,193761	3,811486
5,454686	3,97957	5,368872	3,925137	5,286375	3,87287	5,206145	3,822103



Подовження додатку Е

$\varphi=57^\circ$		$\varphi=58^\circ$		$\varphi=59^\circ$		$\varphi=60^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
3,7372	2,636469	3,663557	2,590122	3,589236	2,543448	3,51985	2,499968
3,785065	2,673725	3,710847	2,627114	3,638721	2,581916	3,56859	2,538065
3,828922	2,70788	3,754406	2,661177	3,681924	2,615851	3,614701	2,573908
3,868672	2,738948	3,796758	2,693946	3,723037	2,647922	3,654801	2,605423
3,907222	2,768928	3,833838	2,723042	3,762303	2,678422	3,696168	2,637272
3,938473	2,794369	3,86558	2,748777	3,797985	2,706603	3,728502	2,663361
3,970501	2,820581	3,896255	2,774161	3,827519	2,731284	3,760969	2,689844
3,999882	2,844298	3,929075	2,800047	3,859898	2,756916	3,792285	2,714862
4,031929	2,869331	3,959895	2,824305	3,889538	2,780426	3,823876	2,73957
4,061278	2,892507	3,990264	2,848154	3,920827	2,80489	3,854117	2,763426
4,113164	2,934374	4,042223	2,890141	3,9728	2,846957	3,907766	2,806598
4,163491	2,974808	4,091422	2,929906	4,023793	2,887864	3,954673	2,844991
4,20905	3,011777	4,135581	2,966006	4,069374	2,924846	4,001657	2,882834
4,249144	3,044757	4,179846	3,001577	4,111919	2,959336	4,045319	2,918005
4,289589	3,077499	4,218432	3,033153	4,151456	2,991495	4,083036	2,949026
4,327779	3,108459	4,257423	3,064603	4,188428	3,021681	4,123432	2,981329
4,365754	3,138964	4,293249	3,09376	4,224871	3,051214	4,157763	3,009543
4,398508	3,165929	4,329323	3,122787	4,258717	3,078846	4,19208	3,037461
4,432916	3,193674	4,361407	3,149074	4,291231	3,105393	4,224972	3,064234
4,463419	3,218752	4,392293	3,174384	4,322466	3,130911	4,25651	3,089931
4,492073	3,242468	4,421275	3,198296	4,351744	3,154998	4,286044	3,114169
4,523142	3,267499	4,449863	3,221767	4,380562	3,178603	4,315059	3,137885
4,549574	3,289457	4,479214	3,245536	4,410069	3,202455	4,342103	3,160194
4,57724	3,312021	4,50596	3,267513	4,436438	3,224186	4,369127	3,182319
4,603072	3,333286	4,530328	3,287852	4,461476	3,244931	4,393763	3,202803
4,626253	3,352743	4,556309	3,30905	4,484896	3,264523	4,417307	3,222453
4,650238	3,372576	4,577712	3,327259	4,509082	3,284444	4,441601	3,242414
4,673445	3,391796	4,601044	3,34653	4,532509	3,303751	4,465094	3,261745
4,697867	3,411645	4,626053	3,366723	4,555968	3,322959	4,488062	3,280632
4,719732	3,429778	4,647441	3,384543	4,577397	3,340792	4,509514	3,298469
4,740956	3,447407	4,668695	3,402178	4,59849	3,358316	4,530265	3,315769
4,761953	3,464799	4,689697	3,419562	4,618613	3,375139	4,55124	3,333113
4,782544	3,481848	4,707623	3,434933	4,639171	3,392145	4,569197	3,348485
4,802149	3,498197	4,727214	3,45126	4,65874	3,408447	4,588736	3,364755
4,821052	3,514023	4,746098	3,467063	4,677599	3,424222	4,607564	3,380496
4,839505	3,529491	4,766295	3,48361	4,695996	3,439628	4,626783	3,3964
4,85773	3,544741	4,782715	3,497715	4,714151	3,454805	4,644038	3,411
4,875931	3,559904	4,802645	3,513945	4,73139	3,469335	4,662101	3,426027
4,893388	3,57453	4,820062	3,528531	4,748763	3,483876	4,679428	3,440523
4,910264	3,588724	4,835123	3,541571	4,76381	3,496892	4,696179	3,454587
4,926707	3,602581	4,853301	3,556499	4,781917	3,511757	4,712494	3,468312
4,941046	3,615053	4,868513	3,569504	4,797099	3,524726	4,726782	3,480704
4,958819	3,629623	4,885323	3,58345	4,812972	3,538065	4,744329	3,495072
4,974723	3,64296	4,900285	3,596178	4,82877	3,551299	4,759211	3,507713
4,988856	3,655127	4,916169	3,609427	4,841965	3,562842	4,774113	3,520308
5,004026	3,667891	4,928616	3,620462	4,85703	3,575503	4,789125	3,532917
5,019416	3,680742	4,945727	3,634376	4,873175	3,588789	4,803467	3,545054
5,034201	3,693161	4,959564	3,64618	4,887847	3,6011	4,817215	3,556766
5,048454	3,705197	4,972871	3,657602	4,901113	3,612479	4,83044	3,568101
5,060427	3,715749	4,987502	3,66981	4,915679	3,624627	4,844939	3,580188
5,076538	3,728864	5,001734	3,681722	4,928968	3,635927	4,859044	3,591983
5,089584	3,740003	5,014732	3,692813	4,941917	3,646969	4,871943	3,602976
5,103252	3,751493	5,028339	3,704245	4,95546	3,658344	4,884555	3,613746
5,115775	3,762219	5,040814	3,714923	4,967886	3,668973	4,897798	3,624874
5,129022	3,773362	5,053997	3,726009	4,981005	3,68	4,909982	3,635295

Подовження додатку Е

$\varphi=61^\circ$		$\varphi=62^\circ$		$\varphi=63^\circ$		$\varphi=64^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
3,452404	2,457796	3,38681	2,416875	3,320468	2,375584	3,258401	2,337046
3,500365	2,495504	3,436811	2,455947	3,372074	2,415747	3,311713	2,378355
3,545934	2,5311	3,482098	2,491456	3,419812	2,452864	3,359014	2,415285
3,588244	2,564069	3,526679	2,525906	3,463202	2,486651	3,401215	2,448414
3,628017	2,594971	3,56496	2,555931	3,503315	2,51786	3,44303	2,480723
3,664015	2,623331	3,600954	2,584288	3,539265	2,546194	3,4789	2,509015
3,69596	2,649441	3,632422	2,610035	3,570288	2,571589	3,509497	2,534068
3,726192	2,673847	3,664645	2,635725	3,601424	2,596649	3,542492	2,560306
3,759615	2,699681	3,696697	2,660725	3,635073	2,622669	3,574691	2,585481
3,789404	2,723305	3,72602	2,684109	3,665056	2,646506	3,605841	2,610078
3,841159	2,765361	3,778727	2,726803	3,717504	2,689085	3,657452	2,652179
3,889776	2,80483	3,828892	2,767237	3,766448	2,728768	3,707837	2,692747
3,935293	2,841752	3,872923	2,803228	3,811719	2,765508	3,754233	2,730159
3,980003	2,877557	3,915931	2,837966	3,855661	2,800807	3,796463	2,764392
4,018602	2,909117	3,957968	2,871641	3,895824	2,833316	3,837316	2,797315
4,05698	2,940159	3,994348	2,901441	3,93282	2,863489	3,87486	2,827819
4,094497	2,97034	4,029762	2,930314	3,968703	2,892645	3,911157	2,857222
4,126634	2,9969	4,064891	2,958716	4,004178	2,921251	3,944465	2,884487
4,159869	3,023877	4,098424	2,985868	4,035485	2,947021	3,976055	2,910423
4,19168	3,049734	4,127943	3,010298	4,067752	2,973138	4,008508	2,936643
4,221445	3,074104	4,157913	3,034786	4,095416	2,996192	4,03637	2,959809
4,248079	3,096334	4,187254	3,058681	4,124894	3,020157	4,065997	2,983841
4,27528	3,118729	4,212074	3,079591	4,152371	3,042688	4,091175	3,004932
4,30394	3,141856	4,24032	3,102439	4,178733	3,064348	4,119093	3,027533
4,327166	3,161449	4,264193	3,122413	4,202229	3,084071	4,14366	3,047901
4,353391	3,182736	4,287997	3,142173	4,226119	3,103867	4,167611	3,06772
4,375228	3,20115	4,312419	3,162176	4,25057	3,123873	4,189655	3,086228
4,398763	3,220492	4,335975	3,181518	4,274133	3,143208	4,213211	3,105547
4,422251	3,23969	4,358457	3,20008	4,296608	3,161756	4,236154	3,124372
4,443711	3,257521	4,379913	3,217899	4,317559	3,17925	4,257091	3,141847
4,464794	3,275017	4,400313	3,234959	4,338435	3,196594	4,277454	3,15886
4,484898	3,291808	4,419564	3,251208	4,357672	3,212822	4,296673	3,175063
4,502858	3,307171	4,440016	3,268107	4,375621	3,228154	4,317034	3,191873
4,522363	3,323405	4,459484	3,284304	4,395047	3,244308	4,333993	3,206484
4,541156	3,33911	4,475742	3,298417	4,413762	3,259931	4,352665	3,222063
4,560325	3,354966	4,49569	3,31474	4,432824	3,275684	4,371672	3,237763
4,57755	3,369531	4,512049	3,328749	4,449983	3,290173	4,388796	3,252211
4,595562	3,384509	4,530844	3,344195	4,467069	3,304537	4,40584	3,26653
4,611996	3,398428	4,547242	3,358074	4,484252	3,318886	4,422974	3,280829
4,627005	3,411388	4,563901	3,372044	4,499217	3,331783	4,437914	3,293693
4,64497	3,426124	4,580124	3,385675	4,516217	3,345876	4,454855	3,307728
4,660085	3,439015	4,594367	3,398003	4,532083	3,359198	4,470672	3,321
4,676707	3,452785	4,610926	3,411713	4,547754	3,372335	4,485477	3,333578
4,691548	3,465381	4,625723	3,424263	4,562507	3,384839	4,500185	3,346035
4,7047	3,476863	4,638851	3,435713	4,576437	3,396771	4,51489	3,358432
4,719656	3,489418	4,653752	3,448214	4,591282	3,409218	4,529679	3,370825
4,735651	3,502569	4,669671	3,461298	4,605472	3,421203	4,543817	3,382759
4,749354	3,514235	4,684167	3,473441	4,619907	3,43329	4,557375	3,394281
4,763389	3,526059	4,697305	3,484686	4,632171	3,443972	4,57042	3,405434
4,775261	3,536481	4,709147	3,495073	4,64647	3,455877	4,584652	3,417279
4,790154	3,548751	4,723963	3,507275	4,660378	3,467494	4,597675	3,428325
4,803856	3,560231	4,7376	3,518696	4,673118	3,478336	4,61036	3,439117
4,816417	3,570952	4,750107	3,529368	4,685572	3,488957	4,622758	3,449687
4,829596	3,582021	4,763221	3,540378	4,69862	3,499909	4,635739	3,46058
4,841727	3,592393	4,775298	3,550699	4,710641	3,51018	4,647702	3,4708



Подовження додатку Е

$\varphi=65^\circ$		$\varphi=66^\circ$		$\varphi=67^\circ$		$\varphi=68^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
3,197947	2,299601	3,139038	2,263204	3,081608	2,22781	3,027809	2,19474
3,250173	2,340326	3,192744	2,304926	3,13666	2,270443	3,079409	2,235336
3,299644	2,378678	3,241647	2,343008	3,184969	2,308239	3,129561	2,274338
3,343812	2,413093	3,284562	2,376728	3,229656	2,343117	3,175898	2,310293
3,384054	2,444486	3,32634	2,409118	3,269844	2,374588	3,217565	2,34272
3,419808	2,47272	3,364962	2,439122	3,308225	2,404461	3,255533	2,372361
3,452939	2,499249	3,397496	2,465206	3,343126	2,431916	3,28979	2,399352
3,484754	2,524786	3,428162	2,490061	3,375421	2,457784	3,320937	2,424534
3,5183	2,550845	3,460219	2,515271	3,405942	2,482122	3,352646	2,449666
3,548305	2,574777	3,491842	2,540228	3,437474	2,507052	3,384594	2,474872
3,601188	2,617688	3,545928	2,583896	3,491642	2,550783	3,438302	2,518331
3,650287	2,657461	3,593768	2,622891	3,540751	2,590542	3,48862	2,558811
3,695207	2,693947	3,639743	2,660001	3,585223	2,626715	3,534039	2,595541
3,738306	2,7287	3,683623	2,695219	3,629837	2,662366	3,576922	2,630125
3,779802	2,762007	3,723253	2,727375	3,670037	2,694863	3,617653	2,662939
3,817853	2,792817	3,761773	2,758464	3,70659	2,724745	3,654623	2,69307
3,854531	2,822445	3,796395	2,786826	3,743933	2,754763	3,689908	2,721826
3,888151	2,849895	3,83031	2,814449	3,775737	2,781089	3,724312	2,749726
3,919986	2,875974	3,862376	2,840661	3,808034	2,807422	3,756837	2,77617
3,950189	2,900799	3,892805	2,865601	3,838668	2,832462	3,78534	2,799891
3,978268	2,924076	3,923448	2,890427	3,869441	2,857347	3,816224	2,824824
4,008026	2,948164	3,950949	2,91311	3,897063	2,880088	3,843948	2,847613
4,033349	2,969328	3,978752	2,935782	3,922613	2,901363	3,869586	2,868929
4,060847	2,99165	4,004415	2,956959	3,94973	2,923417	3,896275	2,890705
4,085962	3,01234	4,029108	2,977374	3,973075	2,942991	3,920128	2,910577
4,109955	3,032173	4,053127	2,997212	3,997107	2,962827	3,944161	2,930404
4,132031	3,050692	4,075224	3,015736	4,019214	2,981349	3,96627	2,948917
4,15557	3,069989	4,098737	3,035006	4,042695	3,000585	3,987428	2,966718
4,177529	3,088195	4,120203	3,052896	4,064604	3,018735	4,010678	2,985674
4,198447	3,105646	4,141097	3,070319	4,08547	3,036126	4,031514	3,003031
4,218943	3,122728	4,161247	3,087173	4,105901	3,053136	4,051298	3,019628
4,236547	3,13792	4,179634	3,102834	4,123497	3,068295	4,070416	3,035704
4,256859	3,154682	4,199896	3,119546	4,143708	3,084957	4,088282	3,050906
4,276198	3,170747	4,216832	3,13411	4,16063	3,099495	4,107483	3,066826
4,294829	3,186282	4,235417	3,149597	4,179171	3,114934	4,12598	3,082218
4,312185	3,200941	4,254313	3,165187	4,19801	3,130468	4,143232	3,096754
4,328473	3,214854	4,271363	3,179551	4,215022	3,144788	4,159437	3,110559
4,346274	3,229621	4,288322	3,193778	4,231937	3,158968	4,177076	3,125163
4,362558	3,243373	4,304566	3,207485	4,248141	3,172631	4,193238	3,138781
4,377472	3,256202	4,320242	3,220767	4,263778	3,185869	4,208067	3,151501
4,395152	3,270676	4,336272	3,234198	4,279758	3,199249	4,224765	3,165304
4,410118	3,283399	4,350407	3,246387	4,293862	3,211402	4,238068	3,176945
4,425683	3,29643	4,366708	3,259855	4,310099	3,22481	4,254239	3,190291
4,440345	3,30884	4,382115	3,272708	4,324666	3,237123	4,269528	3,203032
4,454196	3,320687	4,394339	3,283528	4,33765	3,248398	4,281706	3,213793
4,468927	3,333025	4,409011	3,29581	4,352263	3,260626	4,296259	3,225965
4,483011	3,344908	4,424627	3,308626	4,36702	3,272889	4,310949	3,238169
4,496518	3,35638	4,438084	3,32005	4,380423	3,284263	4,325072	3,249972
4,509515	3,367486	4,44944	3,330119	4,392535	3,294787	4,336367	3,259975
4,523678	3,37927	4,463532	3,341842	4,406558	3,306449	4,350319	3,271576
4,536644	3,390264	4,477237	3,353279	4,420194	3,317826	4,363884	3,282893
4,549273	3,401004	4,490607	3,364464	4,432707	3,328463	4,376338	3,293478
4,562425	3,412029	4,502892	3,374932	4,444933	3,33888	4,388504	3,303842
4,574527	3,422358	4,514936	3,38521	4,456918	3,349106	4,401207	3,3145
4,586433	3,432526	4,526782	3,395326	4,469494	3,359661	4,412931	3,324512

Подовження додатку Е

$\varphi=69^\circ$		$\varphi=70^\circ$		$\varphi=71^\circ$		$\varphi=72^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,973102	2,161199	2,919699	2,128549	2,867548	2,096754	2,817778	2,066498
3,025915	2,202623	2,973613	2,170726	2,924758	2,141014	2,874656	2,110629
3,075372	2,241273	3,024982	2,210609	2,973044	2,179092	2,924714	2,149847
3,123249	2,278232	3,071669	2,246907	3,021122	2,216294	2,971572	2,186371
3,163315	2,309741	3,113086	2,27929	3,063804	2,249496	3,015438	2,220338
3,200995	2,33923	3,150317	2,308534	3,103312	2,280141	3,054421	2,250694
3,23745	2,367492	3,186072	2,336313	3,138254	2,307385	3,088655	2,277475
3,270124	2,393615	3,220202	2,363327	3,171141	2,333652	3,122912	2,304573
3,302894	2,419455	3,251422	2,38829	3,203351	2,359272	3,156064	2,330811
3,332635	2,443341	3,282575	2,413048	3,23335	2,383345	3,185908	2,354801
3,385882	2,486523	3,336789	2,456814	3,28609	2,426215	3,238591	2,397629
3,434932	2,526216	3,386922	2,497144	3,337307	2,467179	3,290792	2,439161
3,481289	2,563494	3,431746	2,533474	3,382971	2,503998	3,334943	2,475052
3,524853	2,598481	3,475919	2,568819	3,427712	2,539676	3,377969	2,509687
3,566077	2,631587	3,515285	2,600793	3,467514	2,571909	3,418191	2,542169
3,60343	2,661946	3,55299	2,631361	3,503282	2,601302	3,456516	2,573092
3,638998	2,690868	3,588837	2,660437	3,539423	2,630526	3,492929	2,602449
3,671368	2,717505	3,621484	2,687214	3,572315	2,65743	3,526031	2,629463
3,704103	2,744052	3,654394	2,713848	3,60538	2,68414	3,557042	2,654917
3,735064	2,769253	3,683248	2,737754	3,634377	2,708121	3,586165	2,678963
3,763772	2,792844	3,712064	2,761397	3,663282	2,731805	3,615146	2,702681
3,791583	2,815672	3,739948	2,784255	3,691225	2,754685	3,643138	2,725577
3,817295	2,837021	3,767951	2,806984	3,71705	2,776078	3,669004	2,746981
3,84401	2,858797	3,793345	2,827941	3,743788	2,797835	3,69531	2,76846
3,867897	2,878677	3,816368	2,847281	3,76772	2,817714	3,717519	2,78728
3,891924	2,898489	3,84038	2,867073	3,789516	2,836148	3,741487	2,80702
3,914028	2,916989	3,862474	2,885556	3,813794	2,855945	3,76355	2,825458
3,935176	2,934772	3,883608	2,903317	3,834912	2,873682	3,786821	2,844484
3,957923	2,953403	3,906753	2,922172	3,856683	2,891683	3,807685	2,861915
3,978727	2,970724	3,927078	2,939183	3,876979	2,908657	3,827951	2,878852
3,998181	2,9871	3,946506	2,955525	3,896233	2,924875	3,847325	2,895123
4,01576	3,002217	3,964074	2,970618	3,91526	2,940838	3,864869	2,910164
4,035868	3,018773	3,98413	2,98712	3,933059	2,955942	3,884822	2,926558
4,055022	3,034643	4,001001	3,001573	3,952118	2,971711	3,901654	2,940948
4,071207	3,048597	4,019406	3,016865	3,96827	2,985606	3,919968	2,956142
4,089935	3,064017	4,038078	3,032229	3,986884	3,000912	3,937799	2,970948
4,106868	3,078249	4,054971	3,046416	4,003736	3,015053	3,953153	2,984155
4,122937	3,091868	4,071004	3,059993	4,020471	3,02904	3,970569	2,998537
4,139815	3,105906	4,087082	3,073519	4,036505	3,042519	3,986558	3,011969
4,155371	3,119056	4,101098	3,085704	4,051976	3,055579	4,001255	3,024537
4,170491	3,131866	4,118422	3,099849	4,06701	3,0683	4,016974	3,037658
4,18529	3,144411	4,133177	3,11235	4,081719	3,080754	4,030905	3,049618
4,200635	3,157229	4,147715	3,124652	4,09695	3,093465	4,046809	3,062723
4,215103	3,169445	4,162131	3,136819	4,111315	3,105582	4,06112	3,074791
4,22878	3,181116	4,176515	3,148907	4,124898	3,117162	4,07392	3,085874
4,243273	3,193234	4,188686	3,159578	4,137035	3,127797	4,088224	3,097824
4,257133	3,204907	4,203994	3,172127	4,152264	3,140279	4,101904	3,109339
4,270427	3,216181	4,217231	3,18335	4,165444	3,151451	4,115025	3,12046
4,283219	3,227096	4,230725	3,194682	4,178872	3,162727	4,127649	3,131226
4,294802	3,237215	4,242264	3,204761	4,190365	3,172766	4,139094	3,141222
4,309063	3,248946	4,255687	3,215958	4,203715	3,183902	4,153109	3,152752
4,321455	3,259478	4,268017	3,226437	4,215982	3,194328	4,165311	3,163125
4,33356	3,269791	4,280059	3,236697	4,22796	3,204535	4,177225	3,173279
4,346191	3,280389	4,292617	3,247236	4,240445	3,215014	4,189636	3,183698
4,357852	3,290348	4,304214	3,257142	4,251977	3,224867	4,201101	3,193497

\* Подовження додатку Е

$\varphi=73^\circ$		$\varphi=74^\circ$		$\varphi=75^\circ$		$\varphi=76^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,769335	2,037126	2,721944	2,008469	2,675561	1,980503	2,630146	1,953202
2,825617	2,080978	2,779761	2,053336	2,732687	2,025046	2,688639	1,99866
2,877334	2,121261	2,830872	2,093311	2,785297	2,065977	2,740577	2,039241
2,922985	2,157116	2,877953	2,13008	2,831146	2,102064	2,787741	2,076164
2,967959	2,191797	2,92134	2,163856	2,875553	2,136497	2,830572	2,109703
3,006408	2,221862	2,961843	2,19518	2,91546	2,167494	2,872389	2,141866
3,042468	2,249714	2,997037	2,222497	2,95234	2,195809	2,908356	2,169636
3,07549	2,276072	3,031284	2,24959	2,98776	2,223601	2,942535	2,196689
3,109538	2,302894	3,063753	2,275506	3,018688	2,248635	2,974324	2,222267
3,139225	2,326795	3,093751	2,299596	3,049444	2,273174	3,006266	2,247504
3,194159	2,370961	3,148099	2,343393	3,102748	2,316329	3,060304	2,291076
3,242706	2,410277	3,197609	2,383266	3,153177	2,356729	3,111565	2,33195
3,289878	2,447967	3,245455	2,421342	3,199482	2,39387	3,156321	2,368158
3,333404	2,482896	3,287264	2,455238	3,243927	2,429337	3,201164	2,403855
3,371782	2,514267	3,328179	2,488126	3,283031	2,461126	3,240627	2,435832
3,410416	2,545349	3,364961	2,518062	3,320132	2,491224	3,278003	2,466071
3,444904	2,573522	3,399695	2,546365	3,355088	2,519645	3,31315	2,494595
3,478203	2,600639	3,433162	2,57357	3,388705	2,546928	3,344817	2,520704
3,509361	2,62617	3,464445	2,599165	3,420099	2,572579	3,376311	2,546403
3,540744	2,651567	3,493774	2,623315	3,449512	2,596768	3,405798	2,570625
3,569788	2,67531	3,522874	2,647077	3,478657	2,620543	3,43498	2,594407
3,595673	2,696922	3,550934	2,669985	3,504649	2,642195	3,461015	2,616071
3,621573	2,718332	3,576861	2,691397	3,530597	2,663603	3,486977	2,637472
3,648308	2,740053	3,602315	2,712329	3,557306	2,685271	3,513256	2,658861
3,672258	2,759912	3,625421	2,731663	3,581255	2,705096	3,535546	2,677675
3,694057	2,778327	3,649332	2,751339	3,603045	2,72348	3,559393	2,697276
3,716101	2,796738	3,671356	2,769722	3,625046	2,741831	3,581372	2,715595
3,739325	2,815716	3,692415	2,787373	3,646082	2,759449	3,602386	2,733181
3,760161	2,833111	3,713647	2,804987	3,668117	2,777525	3,62355	2,75071
3,779968	2,84975	3,733428	2,82159	3,687873	2,794092	3,643694	2,767489
3,799743	2,866244	3,752746	2,837785	3,707022	2,810164	3,662539	2,783356
3,817274	2,881257	3,770261	2,85277	3,725922	2,825964	3,680024	2,798282
3,837176	2,897597	3,790112	2,869055	3,743621	2,840926	3,699771	2,814458
3,853987	2,911956	3,806902	2,883381	3,760388	2,855218	3,716515	2,828716
3,872255	2,927099	3,825122	2,898473	3,778561	2,870259	3,734641	2,843708
3,88932	2,941418	3,842147	2,912747	3,796247	2,884913	3,751585	2,857892
3,905368	2,955029	3,858162	2,926319	3,811524	2,898019	3,767528	2,871383
3,922009	2,968918	3,874754	2,940158	3,828769	2,912234	3,783326	2,884703
3,937952	2,982303	3,890651	2,953496	3,844619	2,925525	3,799127	2,897945
3,953335	2,995271	3,905987	2,966417	3,859203	2,937972	3,812974	2,90993
3,968277	3,0079	3,920883	2,979001	3,874756	2,950937	3,829164	2,923264
3,982892	3,020262	3,935449	2,991316	3,888565	2,962776	3,842232	2,934637
3,998005	3,032864	3,950501	3,003864	3,903555	2,975268	3,857857	2,947498
4,012261	3,044882	3,963985	3,015394	3,917698	2,987186	3,871941	2,959364
4,025745	3,056369	3,978133	3,027272	3,931076	2,998579	3,884562	2,970284
4,037806	3,06693	3,990154	3,037796	3,945183	3,010361	3,8986	2,982008
4,052876	3,079281	4,005144	3,05008	3,957962	3,021281	3,912023	2,993307
4,065937	3,09035	4,018144	3,061098	3,970899	3,032247	3,924895	3,004219
4,077044	3,100173	4,029208	3,070883	3,981917	3,041993	3,937276	3,014784
4,090629	3,111468	4,042717	3,082117	3,995349	3,053165	3,948514	3,024606
4,103831	3,122484	4,055121	3,09263	4,008399	3,064059	3,962196	3,03587
4,115967	3,132803	4,06719	3,102895	4,020401	3,07427	3,974147	3,04603
4,127815	3,142903	4,079695	3,113385	4,032125	3,084266	3,985823	3,055977
4,139417	3,152812	4,091235	3,123242	4,043618	3,094074	3,997266	3,065737
4,150815	3,162557	4,102583	3,132937	4,054917	3,103721	4,008514	3,075337

Подовження додатку Е

$\varphi=77^\circ$		$\varphi=78^\circ$		$\varphi=79^\circ$		$\varphi=80^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,58566	1,926544	2,542066	1,900506	2,49933	1,875068	2,45742	1,850209
2,643448	1,971676	2,600472	1,946091	2,558302	1,921062	2,519068	1,897846
2,696684	2,013083	2,653591	1,987488	2,613479	1,963742	2,571866	1,939193
2,745088	2,050792	2,703164	2,025933	2,661946	2,001573	2,621414	1,977699
2,788952	2,084988	2,748005	2,060748	2,705213	2,035499	2,665592	2,0122
2,830013	2,11673	2,788312	2,092073	2,747267	2,067883	2,706861	2,044149
2,86745	2,145378	2,824793	2,120168	2,785107	2,096798	2,745989	2,073844
2,90035	2,171674	2,858791	2,147115	2,8201	2,12433	2,77971	2,100628
2,932926	2,197741	2,892125	2,173647	2,851907	2,149975	2,812258	2,126716
2,96373	2,222294	2,922262	2,197796	2,882265	2,174242	2,842826	2,151092
3,018469	2,266259	2,977227	2,241869	2,936564	2,217898	2,898561	2,195566
3,068379	2,30631	3,027922	2,282365	2,988006	2,258814	2,948618	2,235649
3,115866	2,34413	3,073844	2,31925	3,034442	2,295996	2,995533	2,273109
3,15896	2,378785	3,117319	2,35412	3,076238	2,329854	3,037716	2,307165
3,198784	2,41094	3,157486	2,386443	3,116718	2,362335	3,078468	2,339785
3,236409	2,44131	3,193298	2,415725	3,154778	2,392935	3,114714	2,369308
3,269672	2,468702	3,228783	2,444428	3,18839	2,420522	3,14848	2,396979
3,303537	2,496111	3,262751	2,471886	3,222449	2,448022	3,182622	2,424515
3,335115	2,521849	3,292381	2,496457	3,252171	2,472637	3,212427	2,449168
3,364665	2,546096	3,32199	2,520724	3,281828	2,496919	3,242128	2,47346
3,391834	2,568663	3,351227	2,544505	3,309089	2,519512	3,269427	2,49606
3,419947	2,591552	3,377329	2,56618	3,337212	2,542368	3,297549	2,518895
3,445919	2,612942	3,403307	2,587556	3,363194	2,563728	3,321559	2,539069
3,470548	2,633327	3,428339	2,608163	3,38742	2,583837	3,347361	2,56009
3,49244	2,651888	3,451857	2,627676	3,409731	2,602614	3,370068	2,579085
3,516254	2,671449	3,473619	2,645994	3,433477	2,622092	3,391807	2,597351
3,538209	2,689734	3,49555	2,664243	3,455384	2,640307	3,41369	2,615527
3,559201	2,707286	3,516519	2,681759	3,476331	2,657788	3,434612	2,632971
3,580331	2,724772	3,538019	2,699443	3,496594	2,67471	3,456036	2,65056
3,600034	2,741264	3,557696	2,715897	3,516245	2,691126	3,47566	2,666937
3,619265	2,757341	3,576492	2,731692	3,534882	2,706804	3,494404	2,682657
3,636732	2,772237	3,593942	2,746557	3,553648	2,722436	3,511815	2,697459
3,654377	2,787124	3,611558	2,761406	3,571237	2,737249	3,529373	2,712233
3,673148	2,802582	3,63028	2,776812	3,587903	2,751403	3,547995	2,727536
3,689171	2,816286	3,646277	2,790482	3,605882	2,766242	3,563938	2,741137
3,707443	2,83125	3,66449	2,80539	3,622696	2,78029	3,581369	2,755535
3,721975	2,843872	3,678999	2,817981	3,638522	2,793656	3,596489	2,768462
3,739789	2,85839	3,696746	2,832438	3,654187	2,806843	3,613434	2,782399
3,754853	2,871169	3,711766	2,845175	3,669835	2,819941	3,628364	2,795049
3,769354	2,883534	3,726224	2,857498	3,683574	2,831818	3,643396	2,807687
3,78479	2,896393	3,741599	2,870304	3,699562	2,844976	3,657981	2,819987
3,79851	2,908148	3,755273	2,882017	3,712512	2,856239	3,672224	2,832014
3,814064	2,920949	3,77007	2,894344	3,727919	2,868918	3,686219	2,843829
3,827396	2,932345	3,784033	2,906107	3,741819	2,880629	3,700056	2,855489
3,840662	2,943642	3,797241	2,917356	3,75429	2,891421	3,711801	2,865832
3,854631	2,955311	3,81114	2,928967	3,768117	2,902974	3,725557	2,877328
3,867293	2,966134	3,823741	2,939741	3,781337	2,914108	3,739396	2,888813
3,8801	2,976993	3,836482	2,950548	3,793345	2,924453	3,752037	2,899521
3,893114	2,98793	3,847367	2,960176	3,806245	2,935282	3,763534	2,909485
3,904305	2,99771	3,860591	2,971169	3,817364	2,944982	3,774614	2,919145
3,917224	3,008487	3,873452	2,981892	3,830164	2,95565	3,788027	2,930167
3,929125	3,018599	3,88461	2,991536	3,841961	2,965666	3,79977	2,940136
3,940751	3,028498	3,896184	3,001387	3,853482	2,975471	3,811237	2,949894
3,952143	3,038211	3,908215	3,011474	3,864766	2,985091	3,822466	2,959468
3,963338	3,047763	3,919357	3,02098	3,875853	2,99455	3,833497	2,968882

Подовження додатку Е

$\varphi=81^\circ$		$\varphi=82^\circ$		$\varphi=83^\circ$		$\varphi=84^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,416303	1,825911	2,375951	1,802154	2,338206	1,780016	2,299267	1,757267
2,478382	1,873851	2,438417	1,850364	2,401196	1,828569	2,362561	1,806003
2,533111	1,91641	2,492885	1,89285	2,455401	1,870978	2,417672	1,849047
2,581545	1,954297	2,54232	1,931356	2,505972	1,910174	2,467939	1,888093
2,626587	1,98934	2,588179	1,966909	2,550352	1,944896	2,513089	1,92329
2,667074	2,02086	2,630179	1,999338	2,591549	1,976884	2,555714	1,95613
2,707426	2,051296	2,669403	2,029147	2,631908	2,007386	2,594926	1,986006
2,739897	2,077352	2,702815	2,055753	2,666223	2,034517	2,630111	2,013639
2,773165	2,103861	2,734614	2,081403	2,69869	2,060549	2,661157	2,03884
2,803933	2,128338	2,76641	2,106461	2,729384	2,084948	2,693253	2,064028
2,858984	2,172385	2,821986	2,150789	2,78546	2,12954	2,749394	2,108632
2,909744	2,212864	2,873379	2,191622	2,835471	2,169555	2,799999	2,14898
2,957105	2,250581	2,919148	2,228405	2,881672	2,206577	2,846601	2,186214
2,999672	2,284826	2,962093	2,262829	2,924967	2,241171	2,888283	2,219847
3,038695	2,316415	3,001367	2,294556	2,964472	2,273026	2,928002	2,251819
3,077105	2,347201	3,03798	2,324282	3,001244	2,302838	2,964921	2,281711
3,111005	2,374945	3,07395	2,353229	3,03539	2,330709	2,999173	2,309633
3,143261	2,401359	3,106292	2,379682	3,067815	2,357198	3,031672	2,33615
3,175096	2,427193	3,13624	2,404395	3,099739	2,383048	3,063632	2,362002
3,202882	2,450343	3,166012	2,428693	3,12763	2,406229	3,091569	2,385193
3,232164	2,474093	3,193372	2,451295	3,155016	2,428827	3,118977	2,407785
3,258333	2,495756	3,219556	2,472948	3,181214	2,450468	3,145185	2,429411
3,282361	2,515924	3,245529	2,494241	3,207179	2,471734	3,171141	2,450649
3,308142	2,536911	3,269744	2,514284	3,232149	2,492198	3,195339	2,47064
3,330844	2,555883	3,292053	2,533006	3,253691	2,51045	3,217638	2,489317
3,352572	2,574122	3,313769	2,551216	3,277303	2,529753	3,23933	2,507469
3,37443	2,592261	3,335604	2,569318	3,299115	2,547817	3,261117	2,525494
3,39533	2,609668	3,35648	2,586687	3,318058	2,564025	3,281947	2,542789
3,416325	2,626978	3,377441	2,603952	3,339749	2,581696	3,302462	2,559742
3,435921	2,643316	3,39701	2,620251	3,358907	2,597729	3,321595	2,575739
3,454378	2,658844	3,415442	2,635743	3,377569	2,613337	3,340101	2,591234
3,472421	2,674002	3,433456	2,650864	3,394915	2,628042	3,358687	2,606651
3,489948	2,688738	3,450951	2,665561	3,412376	2,6427	3,376115	2,621271
3,506557	2,70282	3,46753	2,679607	3,430843	2,657846	3,392629	2,635245
3,524433	2,717556	3,485353	2,694292	3,446692	2,671342	3,408443	2,648704
3,541155	2,731512	3,502028	2,708202	3,463959	2,685586	3,426288	2,66327
3,556896	2,744793	3,517724	2,721441	3,478967	2,6984	3,440618	2,67567
3,573122	2,758282	3,533894	2,734879	3,495078	2,711787	3,457305	2,689381
3,588003	2,770889	3,548726	2,747442	3,509859	2,724305	3,472033	2,701855
3,601662	2,78269	3,562342	2,759205	3,523429	2,736029	3,486835	2,714297
3,617509	2,79573	3,578116	2,772185	3,53913	2,74895	3,501184	2,7264
3,630371	2,806916	3,590932	2,783333	3,551897	2,760057	3,515186	2,738228
3,645626	2,819473	3,60611	2,795828	3,567002	2,772491	3,528949	2,749841
3,659397	2,831079	3,619164	2,80699	3,580662	2,783994	3,541919	2,760913
3,671762	2,841782	3,632148	2,818043	3,592954	2,794614	3,554172	2,771493
3,685464	2,853224	3,645796	2,829432	3,606546	2,80595	3,567708	2,782777
3,69858	2,864254	3,658202	2,840018	3,618906	2,816493	3,580664	2,793661
3,710506	2,874513	3,670743	2,85063	3,631395	2,827059	3,593101	2,804182
3,723295	2,885239	3,681496	2,860119	3,642112	2,836513	3,605073	2,814375
3,734335	2,894862	3,694475	2,870893	3,655026	2,847235	3,615985	2,823886
3,747012	2,905425	3,706428	2,881006	3,666924	2,857301	3,628474	2,834294
3,758701	2,915347	3,718061	2,890882	3,678501	2,867132	3,639996	2,84408
3,770112	2,92506	3,729417	2,900549	3,689802	2,876754	3,651242	2,853658
3,781287	2,934588	3,740536	2,910032	3,700865	2,886193	3,66225	2,863053
3,792262	2,943957	3,751455	2,919356	3,711728	2,895472	3,673058	2,872288

# Подовження додатку Е

$\varphi=85^\circ$		$\varphi=86^\circ$		$\varphi=87^\circ$		$\varphi=88^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,261013	1,735011	2,225197	1,714259	2,188214	1,692921	2,153567	1,673017
2,326557	1,785109	2,291115	1,764596	2,254293	1,743374	2,219949	1,723666
2,381046	1,827828	2,347099	1,808225	2,311568	1,78778	2,276573	1,767719
2,432681	1,8677	2,397928	1,847677	2,361541	1,826798	2,327785	1,80751
2,478653	1,903398	2,442439	1,882558	2,408959	1,863366	2,373737	1,843257
2,520371	1,935736	2,48551	1,915695	2,451117	1,896	2,41718	1,876643
2,558446	1,964999	2,524559	1,945561	2,491096	1,926441	2,455996	1,906468
2,594467	1,993111	2,559281	1,972925	2,524543	1,953077	2,492248	1,934699
2,626173	2,018679	2,591631	1,998847	2,557519	1,979336	2,52383	1,960142
2,657988	2,043685	2,623168	2,023671	2,589174	2,004205	2,555982	1,985273
2,713777	2,08806	2,678599	2,067818	2,645769	2,048998	2,611415	2,029382
2,764945	2,128722	2,730298	2,108776	2,69605	2,089135	2,66219	2,069795
2,810029	2,165048	2,775793	2,145304	2,741947	2,125854	2,710331	2,107754
2,853927	2,199947	2,819951	2,180338	2,784489	2,159951	2,751267	2,140928
2,893835	2,232023	2,858166	2,211434	2,824744	2,192216	2,791674	2,173274
2,930883	2,261983	2,895343	2,241459	2,862034	2,222295	2,827249	2,202361
2,96523	2,289949	2,929783	2,269465	2,894721	2,249281	2,861855	2,230432
2,995921	2,315404	2,962409	2,296024	2,927406	2,275854	2,894592	2,257015
3,027914	2,341254	2,99258	2,3208	2,957623	2,300637	2,924851	2,281801
3,055894	2,364452	3,020599	2,344002	2,987508	2,324894	2,952939	2,305003
3,083322	2,387034	3,048044	2,366572	3,01314	2,346396	2,980412	2,327544
3,109537	2,408644	3,074266	2,388164	3,039366	2,367967	3,006641	2,349094
3,135483	2,429853	3,100199	2,409342	3,065286	2,389113	3,030738	2,369165
3,159297	2,449598	3,124005	2,429061	3,089448	2,409017	3,05561	2,389454
3,181962	2,468469	3,146658	2,447903	3,111722	2,427618	3,077149	2,407611
3,203641	2,486591	3,168325	2,465994	3,133376	2,445678	3,098791	2,425639
3,225405	2,504578	3,190066	2,483943	3,155093	2,463587	3,120483	2,443508
3,246212	2,521835	3,208997	2,500082	3,175851	2,480768	3,141216	2,460651
3,265948	2,538309	3,230562	2,517601	3,195541	2,497171	3,161244	2,477227
3,28543	2,554489	3,249643	2,533524	3,214594	2,513057	3,180269	2,493077
3,303659	2,5698	3,268215	2,549017	3,233135	2,528511	3,198412	2,50828
3,320954	2,584438	3,285484	2,563622	3,250375	2,543082	3,215622	2,522816
3,338345	2,599018	3,302838	2,578162	3,267691	2,557582	3,232898	2,537276
3,356704	2,61406	3,31928	2,59206	3,284095	2,571442	3,249261	2,551097
3,372483	2,627484	3,336884	2,60654	3,30164	2,58587	3,266747	2,565472
3,389007	2,641252	3,353355	2,620262	3,318056	2,599544	3,283106	2,579098
3,404559	2,65436	3,368857	2,633326	3,333506	2,612564	3,298501	2,592072
3,42055	2,667644	3,384161	2,646191	3,348753	2,625381	3,313688	2,604841
3,435224	2,680072	3,398779	2,658573	3,363314	2,637717	3,328202	2,617129
3,448699	2,691717	3,412832	2,670546	3,377325	2,649644	3,342174	2,629011
3,464254	2,704519	3,427701	2,682918	3,391522	2,661599	3,35694	2,64128
3,476942	2,715546	3,440984	2,694278	3,405386	2,673283	3,370143	2,652558
3,491293	2,727486	3,454654	2,705796	3,419009	2,684755	3,383717	2,663986
3,504855	2,738891	3,468167	2,717155	3,432472	2,696069	3,397129	2,675255
3,517705	2,749811	3,47971	2,727286	3,44398	2,706168	3,408602	2,685323
3,529274	2,759911	3,493132	2,738471	3,457345	2,717305	3,42191	2,696413
3,542813	2,771126	3,505979	2,749261	3,470138	2,72805	3,434648	2,707113
3,555197	2,781602	3,51831	2,759693	3,482416	2,738439	3,446873	2,717458
3,566478	2,791371	3,530179	2,769801	3,494234	2,748505	3,458639	2,727483
3,579267	2,80199	3,541002	2,77924	3,505014	2,757909	3,469375	2,736851
3,590411	2,811584	3,553366	2,789547	3,517317	2,768168	3,481617	2,747062
3,601878	2,821325	3,564778	2,799245	3,528675	2,777822	3,492921	2,756673
3,613068	2,830859	3,575914	2,808735	3,539757	2,78727	3,50395	2,766078
3,624021	2,84021	3,586813	2,818043	3,550603	2,796536	3,514743	2,775302
3,634774	2,849402	3,597512	2,827192	3,561249	2,805642	3,525337	2,784366



# Подовження додатку Е

$\varphi=89^\circ$		$\varphi=90^\circ$		$\varphi=91^\circ$		$\varphi=92^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
2,119462	1,65351	2,084215	1,633441	2,051168	1,614712	2,018612	1,596347
2,186114	1,704335	2,152771	1,685372	2,119905	1,666766	2,087501	1,64851
2,244108	1,749183	2,210101	1,729846	2,178536	1,711975	2,147386	1,694417
2,294492	1,788566	2,261648	1,76996	2,230855	1,752592	2,198879	1,734631
2,341162	1,824738	2,309008	1,806533	2,277261	1,788637	2,245913	1,771043
2,383688	1,857618	2,352684	1,840078	2,320021	1,821679	2,289775	1,804715
2,423379	1,887984	2,391157	1,869802	2,359323	1,851915	2,329824	1,835409
2,458351	1,915488	2,42683	1,897699	2,395674	1,880189	2,364874	1,862953
2,492499	1,942361	2,459603	1,923766	2,429003	1,906541	2,396866	1,888527
2,52357	1,966858	2,491537	1,94873	2,460248	1,931097	2,429312	1,913737
2,579345	2,011143	2,547631	1,99318	2,516265	1,975489	2,48524	1,958066
2,630562	2,051802	2,599282	2,034067	2,566536	2,01557	2,535954	1,998362
2,677218	2,088868	2,644468	2,070268	2,613866	2,052958	2,583575	2,035898
2,720218	2,123219	2,687681	2,104737	2,657267	2,087533	2,625392	2,069579
2,75895	2,154605	2,726567	2,136205	2,69629	2,119072	2,664554	2,101188
2,794644	2,18375	2,764159	2,166415	2,732201	2,148315	2,700569	2,130474
2,829324	2,211845	2,797125	2,193518	2,765252	2,175449	2,735446	2,158619
2,862111	2,238435	2,829958	2,220113	2,79813	2,202044	2,766621	2,184229
2,892409	2,263222	2,858518	2,243887	2,828499	2,226825	2,797023	2,209003
2,920528	2,28642	2,888441	2,268089	2,856674	2,250009	2,825224	2,232177
2,948012	2,308945	2,914162	2,289583	2,882421	2,271497	2,852733	2,254642
2,972451	2,329445	2,940392	2,311086	2,90865	2,292974	2,877222	2,275108
2,998342	2,350524	2,966266	2,332131	2,932752	2,312983	2,903062	2,296081
3,022475	2,370364	2,989675	2,351532	2,957907	2,333358	2,926451	2,315427
3,044727	2,388911	3,01085	2,36944	2,979079	2,351245	2,94762	2,333294
3,066357	2,406909	3,034241	2,388424	3,000682	2,369178	2,969209	2,351195
3,088025	2,42474	3,054109	2,405196	3,0223	2,386931	2,990802	2,368908
3,106939	2,440808	3,074791	2,422262	3,042955	2,403959	3,011429	2,385898
3,127655	2,45776	3,094759	2,43876	3,062541	2,420215	3,030986	2,402118
3,14665	2,473572	3,113724	2,454534	3,081473	2,435952	3,049885	2,417817
3,165243	2,489018	3,131804	2,469664	3,099873	2,451249	3,067663	2,432739
3,183023	2,503868	3,148949	2,484131	3,116984	2,465681	3,08532	2,44747
3,200258	2,518288	3,16614	2,498509	3,13413	2,480018	3,102421	2,461766
3,216581	2,532072	3,182419	2,512252	3,150364	2,493722	3,118608	2,47543
3,232198	2,545345	3,199781	2,526523	3,165888	2,506916	3,134083	2,488584
3,249102	2,559272	3,216023	2,540052	3,183254	2,521078	3,150801	2,502347
3,263836	2,571848	3,231309	2,552934	3,19731	2,533224	3,165414	2,514793
3,279576	2,58492	3,245801	2,565255	3,212952	2,54619	3,181007	2,527711
3,29405	2,597161	3,260834	2,577801	3,227938	2,558689	3,195358	2,539824
3,307374	2,608646	3,274726	2,589601	3,240598	2,569757	3,208579	2,551205
3,322696	2,621221	3,288787	2,601422	3,255804	2,582228	3,223137	2,563284
3,33525	2,632104	3,302511	2,612976	3,268287	2,593046	3,236175	2,574413
3,349384	2,643846	3,315989	2,624319	3,282312	2,604695	3,250147	2,586017
3,362746	2,655071	3,328695	2,635149	3,295572	2,615835	3,262763	2,596771
3,375407	2,665826	3,340702	2,645509	3,308137	2,626511	3,275875	2,607753
3,386822	2,675792	3,353897	2,656507	3,319474	2,636413	3,287173	2,617624
3,400118	2,686807	3,365919	2,666763	3,33265	2,647331	3,300291	2,628496
3,412291	2,697111	3,378039	2,677025	3,344719	2,657551	3,311712	2,638328
3,423391	2,706733	3,388486	2,686254	3,355731	2,667102	3,323278	2,648192
3,434083	2,716066	3,400964	2,696625	3,366337	2,676367	3,333843	2,657423
3,446881	2,726591	3,412476	2,706382	3,379006	2,686788	3,34585	2,667445
3,458132	2,73616	3,423675	2,715909	3,390153	2,696274	3,356946	2,67689
3,46849	2,745159	3,4346	2,725232	3,400421	2,7052	3,367772	2,686131
3,479231	2,754341	3,445291	2,734372	3,411061	2,7143	3,378364	2,695191
3,489773	2,763363	3,455783	2,743355	3,421503	2,723241	3,388759	2,704093

# Подовження додатку Е

$\varphi=93^\circ$		$\varphi=94^\circ$		$\varphi=95^\circ$		$\varphi=96^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,986532	1,578337	1,954915	1,560672	1,922198	1,542486	1,891484	1,525502
2,055546	1,630596	2,025766	1,613982	1,994645	1,596708	1,963934	1,579752
2,114731	1,676097	2,084399	1,659163	2,054446	1,642523	2,02486	1,626171
2,168889	1,717858	2,137716	1,700502	2,108467	1,684292	2,079563	1,668349
2,214953	1,753747	2,184369	1,736742	2,156155	1,72113	2,126272	1,704674
2,257901	1,786918	2,228375	1,770509	2,199185	1,754362	2,170323	1,738473
2,298717	1,818081	2,267974	1,801034	2,239477	1,785304	2,211286	1,769815
2,334424	1,845988	2,304316	1,829289	2,274544	1,812852	2,246931	1,797679
2,366966	1,871841	2,337394	1,85541	2,308145	1,839231	2,279211	1,823302
2,399456	1,897055	2,369558	1,880424	2,340702	1,864445	2,312146	1,848706
2,456342	1,941909	2,425954	1,924994	2,397643	1,90931	2,367871	1,89289
2,507468	1,982396	2,477511	1,965675	2,447866	1,949201	2,420243	1,933921
2,55359	2,019083	2,523904	2,002511	2,494513	1,986179	2,465411	1,970086
2,595592	2,052869	2,566083	2,036395	2,53686	2,020155	2,50792	2,004147
2,63488	2,084538	2,605491	2,068119	2,576384	2,051928	2,547556	2,035966
2,670989	2,11386	2,641691	2,097474	2,612673	2,081312	2,58393	2,065375
2,704196	2,141044	2,67497	2,124677	2,646022	2,108532	2,617347	2,092608
2,737154	2,167633	2,706256	2,150303	2,677359	2,134162	2,648734	2,11824
2,765862	2,191429	2,736717	2,175058	2,707847	2,158906	2,677573	2,14204
2,794087	2,214592	2,764963	2,198209	2,736113	2,182043	2,70586	2,165162
2,821602	2,237034	2,790779	2,219669	2,761948	2,203492	2,733386	2,18753
2,847825	2,258458	2,816998	2,241066	2,788162	2,224861	2,757922	2,207937
2,871926	2,278422	2,841097	2,261005	2,812258	2,244777	2,783686	2,228762
2,895648	2,297934	2,865485	2,28087	2,835949	2,264225	2,807027	2,24799
2,918192	2,316562	2,887328	2,299079	2,856765	2,281835	2,828174	2,265769
2,939766	2,334432	2,908888	2,316916	2,878309	2,29964	2,849702	2,283542
2,95961	2,351126	2,92872	2,333584	2,899821	2,317236	2,871186	2,301099
2,980208	2,368077	2,949288	2,350496	2,920359	2,33411	2,890014	2,316991
3,00008	2,384457	2,969468	2,36703	2,939483	2,350027	2,910114	2,33344
3,018599	2,399921	2,988296	2,382653	2,958273	2,365611	2,928864	2,348985
3,036919	2,415138	3,005888	2,397439	2,976281	2,380619	2,946379	2,363699
3,053955	2,429497	3,022882	2,411761	2,993802	2,395226	2,963287	2,377947
3,071006	2,443751	3,039883	2,425972	3,009046	2,408427	2,980187	2,392068
3,087144	2,457374	3,055971	2,439552	3,0268	2,422931	2,996197	2,405557
3,102575	2,470485	3,073092	2,453604	3,042161	2,435956	3,013218	2,419503
3,119242	2,484192	3,088558	2,466601	3,058158	2,449236	3,028606	2,432418
3,13382	2,496599	3,102525	2,47864	3,073239	2,461896	3,042515	2,444396
3,149365	2,509469	3,118598	2,491795	3,088116	2,47435	3,057915	2,457133
3,163674	2,521543	3,132866	2,503832	3,102343	2,48635	3,072101	2,469097
3,17686	2,532891	3,145438	2,514816	3,116033	2,497964	3,085182	2,480352
3,191366	2,544926	3,160473	2,52714	3,129864	2,509584	3,099535	2,492258
3,204363	2,55602	3,172848	2,537866	3,143354	2,520939	3,112408	2,503249
3,218281	2,567579	3,186712	2,54938	3,156013	2,531752	3,126167	2,514679
3,230852	2,578297	3,199821	2,560398	3,169073	2,542729	3,138607	2,52529
3,242145	2,588215	3,212246	2,570959	3,180874	2,552921	3,149794	2,535122
3,255172	2,599076	3,223467	2,580768	3,193794	2,563697	3,162659	2,545853
3,26764	2,609559	3,236469	2,591546	3,205581	2,573764	3,174975	2,556212
3,279607	2,619697	3,247801	2,601307	3,21687	2,583489	3,186797	2,566232
3,291125	2,629523	3,259271	2,611093	3,227711	2,592903	3,198175	2,575943
3,301649	2,638721	3,269754	2,620258	3,239903	2,603041	3,208581	2,585044
3,3136	2,648697	3,281649	2,630189	3,250579	2,612257	3,220371	2,594887
3,324647	2,658101	3,292648	2,639553	3,26153	2,621582	3,230698	2,603842
3,335425	2,667303	3,303378	2,648715	3,272214	2,630705	3,241336	2,612927
3,345372	2,675977	3,313876	2,657697	3,282667	2,63965	3,251745	2,621833
3,35572	2,684839	3,324178	2,666522	3,292925	2,648436	3,261959	2,630582



Подовження додатку Е

$\varphi=97^\circ$		$\varphi=98^\circ$		$\varphi=99^\circ$		$\varphi=100^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,861192	1,508837	1,832793	1,493296	1,803287	1,477233	1,774168	1,461469
1,935296	1,564025	1,90535	1,547668	1,877413	1,532494	1,849804	1,517582
1,995631	1,610102	1,966749	1,59431	1,939978	1,579752	1,911742	1,564483
2,050995	1,652669	2,022754	1,637247	1,994831	1,62208	1,967217	1,607163
2,098695	1,689565	2,070386	1,674131	2,043697	1,659654	2,016039	1,644727
2,14178	1,722838	2,113549	1,707452	2,087474	1,693315	2,059824	1,678402
2,181546	1,753554	2,15397	1,738551	2,126682	1,723779	2,099677	1,709235
2,21779	1,781741	2,190758	1,767029	2,163999	1,752537	2,137508	1,738261
2,252366	1,808591	2,224025	1,793135	2,197725	1,778863	2,169952	1,763869
2,284236	1,833396	2,256607	1,818315	2,229598	1,803646	2,20285	1,789195
2,340149	1,877664	2,31271	1,862656	2,285546	1,847866	2,260325	1,834196
2,391183	1,917921	2,3641	1,903083	2,337271	1,888457	2,310691	1,874041
2,438281	1,955156	2,411399	1,940433	2,383104	1,925015	2,356722	1,910715
2,480935	1,989291	2,452531	1,973728	2,426045	1,959287	2,399796	1,945046
2,519002	2,020228	2,492375	2,005621	2,464344	1,990317	2,438204	1,976114
2,555459	2,049659	2,527258	2,034164	2,500958	2,019781	2,47327	2,00471
2,588943	2,076904	2,560807	2,061418	2,534567	2,047041	2,506941	2,031974
2,620377	2,102536	2,592287	2,087049	2,56609	2,072668	2,538509	2,057598
2,649257	2,126334	2,622849	2,111748	2,595044	2,096458	2,567499	2,081381
2,677562	2,149439	2,649528	2,133931	2,623381	2,119529	2,595851	2,104433
2,705089	2,171782	2,677056	2,156247	2,649283	2,140924	2,623379	2,126695
2,729635	2,192172	2,70161	2,176619	2,67547	2,162174	2,647945	2,147031
2,753722	2,212036	2,725691	2,196458	2,699545	2,181988	2,672013	2,166818
2,778374	2,231973	2,750317	2,216354	2,722843	2,201126	2,695618	2,186102
2,799846	2,249914	2,771778	2,234269	2,743966	2,218835	2,716409	2,20361
2,821357	2,267655	2,79327	2,251978	2,765439	2,236511	2,737861	2,221253
2,84115	2,284243	2,813048	2,26854	2,785199	2,253046	2,759218	2,238653
2,861622	2,301039	2,833484	2,285297	2,805599	2,269763	2,777963	2,254437
2,881347	2,317259	2,853169	2,301477	2,825242	2,285902	2,797886	2,270715
2,900056	2,332765	2,871505	2,316758	2,843535	2,301146	2,816135	2,285921
2,917864	2,347631	2,889045	2,331461	2,86103	2,31581	2,833805	2,300659
2,934726	2,36184	2,906418	2,345936	2,878362	2,330234	2,850556	2,314736
2,951584	2,375913	2,923237	2,359961	2,895143	2,344215	2,8673	2,328675
2,967559	2,38936	2,939178	2,373369	2,91105	2,357586	2,883174	2,34201
2,982853	2,402308	2,95444	2,386283	2,92628	2,370466	2,898371	2,354859
2,999323	2,415818	2,970306	2,399435	2,942104	2,38358	2,9147	2,368239
3,013764	2,428085	2,985269	2,411984	2,957028	2,396094	2,929039	2,380413
3,028556	2,440463	3,00002	2,424325	2,971737	2,408399	2,943706	2,392683
3,042701	2,452391	3,014125	2,436219	2,985802	2,420259	2,957731	2,40451
3,056311	2,463936	3,027695	2,447732	2,999333	2,431739	2,971223	2,415957
3,07005	2,475481	3,041389	2,45924	3,012983	2,443211	2,984829	2,427393
3,083448	2,48676	3,053062	2,469532	3,024626	2,453479	2,998094	2,438563
3,09659	2,497826	3,067278	2,481194	3,038787	2,465095	3,010548	2,449208
3,108986	2,508402	3,079632	2,491735	3,051099	2,475603	3,022819	2,459681
3,120706	2,51853	3,091876	2,50215	3,0633	2,485982	3,034978	2,470025
3,133521	2,52922	3,102949	2,511839	3,074338	2,495642	3,045982	2,479656
3,145219	2,539214	3,115731	2,522437	3,087068	2,506196	3,05866	2,490167
3,156994	2,549195	3,127459	2,53238	3,098752	2,516101	3,0703	2,500034
3,167185	2,558218	3,138183	2,541695	3,109438	2,525385	3,080949	2,509286
3,179269	2,568266	3,148515	2,550733	3,119734	2,534392	3,091211	2,518263
3,189862	2,577412	3,160769	2,560812	3,131372	2,544106	3,103359	2,528251
3,200722	2,58666	3,171017	2,569699	3,142146	2,55328	3,113533	2,537073
3,211317	2,595707	3,18157	2,57871	3,152657	2,562254	3,124004	2,546011
3,221683	2,604577	3,191894	2,587543	3,162941	2,571052	3,134249	2,554774
3,231855	2,61329	3,202025	2,596219	3,173033	2,579693	3,144301	2,56338

Подовження додатку Е

$\varphi=101^\circ$		$\varphi=102^\circ$		$\varphi=103^\circ$		$\varphi=104^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,745424	1,445996	1,718456	1,431561	1,690415	1,416638	1,662719	1,401988
1,822514	1,502925	1,793956	1,48768	1,767296	1,473536	1,74093	1,459633
1,883825	1,549476	1,857936	1,535643	1,830615	1,521133	1,805271	1,507758
1,939905	1,592492	1,914302	1,578817	1,887556	1,564615	1,862475	1,551378
1,989918	1,630705	1,962839	1,61625	1,937256	1,602671	1,911927	1,589305
2,034278	1,6647	2,007604	1,650472	1,9822	1,636996	1,957046	1,623725
2,074722	1,695864	2,048249	1,681753	2,022042	1,667862	1,997818	1,655094
2,11128	1,724199	2,08531	1,71035	2,059594	1,696711	2,034127	1,683281
2,144174	1,750026	2,118641	1,736387	2,093348	1,72295	2,06829	1,709714
2,176697	1,77514	2,151124	1,761471	2,125784	1,748003	2,101002	1,734906
2,233677	1,819824	2,207286	1,805664	2,182772	1,792583	2,158474	1,779687
2,284355	1,859834	2,25826	1,845835	2,234011	1,832897	2,208371	1,819295
2,330576	1,896617	2,304665	1,882721	2,280583	1,869875	2,255115	1,856365
2,37378	1,931003	2,347995	1,917156	2,322439	1,903505	2,297108	1,890048
2,412296	1,962106	2,386617	1,948292	2,361165	1,93467	2,335937	1,92124
2,447449	1,990724	2,421855	1,976929	2,396487	1,963325	2,371342	1,94991
2,481176	2,017991	2,455638	2,004197	2,430325	1,990591	2,405235	1,977174
2,512785	2,043608	2,485701	2,02895	2,46044	2,015348	2,435401	2,001933
2,541808	2,067385	2,516343	2,053575	2,4911	2,039953	2,466077	2,026516
2,570174	2,090418	2,543137	2,075731	2,51792	2,062099	2,492921	2,048653
2,596102	2,111781	2,570661	2,097936	2,54544	2,084276	2,518882	2,069965
2,620674	2,132098	2,595236	2,118234	2,570019	2,104554	2,545019	2,091059
2,644734	2,151857	2,619288	2,137967	2,594061	2,124261	2,569051	2,110739
2,668958	2,171458	2,642854	2,157185	2,617293	2,143276	2,591954	2,129555
2,690702	2,189471	2,66363	2,17465	2,638375	2,16089	2,613335	2,147314
2,712133	2,207082	2,685037	2,192228	2,659758	2,178436	2,634692	2,164827
2,731854	2,223563	2,706323	2,209549	2,679432	2,194861	2,65434	2,181224
2,752178	2,240202	2,725016	2,225278	2,69967	2,21142	2,674534	2,197743
2,771088	2,255906	2,744839	2,241469	2,718811	2,22722	2,693318	2,213325
2,789293	2,271072	2,763002	2,256588	2,736936	2,24229	2,711095	2,22818
2,806817	2,285702	2,780066	2,27094	2,754077	2,256662	2,728311	2,242572
2,822999	2,299441	2,797287	2,285233	2,770207	2,270337	2,744943	2,256506
2,839706	2,313341	2,813962	2,299097	2,786847	2,284166	2,76155	2,270302
2,855547	2,326642	2,829772	2,312368	2,802625	2,297405	2,777298	2,283513
2,870713	2,33946	2,844908	2,325158	2,817729	2,310166	2,792372	2,296246
2,886995	2,352798	2,860609	2,338161	2,83392	2,323424	2,807993	2,309178
2,9013	2,364943	2,873808	2,349683	2,848159	2,335513	2,822727	2,321529
2,916468	2,37748	2,889468	2,362479	2,863238	2,347974	2,837233	2,333663
2,930454	2,389274	2,903414	2,37424	2,877146	2,359703	2,851104	2,34536
2,943363	2,400386	2,915751	2,385026	2,889989	2,370761	2,864444	2,356682
2,95747	2,412089	2,93035	2,396988	2,904003	2,382386	2,877882	2,367977
2,970146	2,422919	2,942447	2,407486	2,916603	2,393153	2,889384	2,378128
2,983107	2,433836	2,955905	2,418667	2,92948	2,403999	2,903281	2,389524
2,995338	2,444277	2,968097	2,429074	2,941633	2,414373	2,915398	2,399866
3,006907	2,454279	2,979088	2,438744	2,953132	2,424315	2,927396	2,410073
3,019524	2,464803	2,991656	2,449227	2,965656	2,434759	2,938272	2,419593
3,031055	2,474657	3,003691	2,45935	2,977109	2,444546	2,950758	2,429937
3,042652	2,484488	3,015247	2,469145	2,988084	2,454004	2,961698	2,439364
3,052715	2,4934	3,026374	2,478641	2,99863	2,463165	2,972749	2,448792
3,064599	2,503277	3,03657	2,487559	3,008794	2,472053	2,982883	2,457654
3,075038	2,512288	3,047521	2,496845	3,020791	2,481908	2,994294	2,467167
3,085731	2,52139	3,058174	2,505911	3,031407	2,49094	3,004335	2,475865
3,096163	2,530293	3,068568	2,51478	3,04122	2,499471	3,014656	2,484667
3,10637	2,539022	3,078738	2,523474	3,051354	2,508132	3,024755	2,493295
3,11583	2,547281	3,088167	2,531704	3,061297	2,516638	3,034665	2,501769

Подовження додатку Е

$\varphi=105^\circ$		$\varphi=106^\circ$		$\varphi=107^\circ$		$\varphi=108^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,636721	1,388319	1,609673	1,374187	1,584274	1,361	1,559156	1,348042
1,716377	1,446765	1,690562	1,43332	1,665019	1,420105	1,639743	1,407117
1,78018	1,4946	1,755338	1,481655	1,730737	1,468921	1,706374	1,456396
1,83764	1,538351	1,813044	1,52553	1,788683	1,512912	1,764551	1,500497
1,888035	1,576771	1,863184	1,563814	1,838569	1,551062	1,815342	1,539106
1,932135	1,61066	1,907462	1,597796	1,884181	1,585732	1,859957	1,573258
1,973818	1,642514	1,948346	1,629243	1,924796	1,617048	1,901457	1,605035
2,010578	1,670931	1,985579	1,657897	1,962459	1,645916	1,937911	1,633272
2,043463	1,696676	2,020494	1,684685	1,996099	1,672026	1,973526	1,660386
2,076462	1,721999	2,052488	1,70945	2,028745	1,697085	2,005541	1,685066
2,13279	1,766134	2,108925	1,753618	2,085264	1,741284	2,061803	1,729132
2,184542	1,806729	2,160911	1,79434	2,137476	1,782128	2,114234	1,770092
2,231444	1,843879	2,20641	1,830751	2,183141	1,818622	2,160062	1,806664
2,272	1,876785	2,248663	1,864526	2,225517	1,852436	2,201038	1,839725
2,310931	1,908	2,287688	1,895761	2,263106	1,882889	2,240256	1,870993
2,346418	1,936683	2,32325	1,924454	2,298748	1,911592	2,275972	1,899704
2,380364	1,963943	2,355711	1,9509	2,332795	1,938841	2,308558	1,926159
2,412126	1,989525	2,387509	1,97647	2,363106	1,963601	2,340422	1,951704
2,441273	2,013265	2,416684	2,000199	2,392309	1,987317	2,36965	1,975408
2,46814	2,035392	2,445103	2,023126	2,420736	2,010222	2,396579	1,997502
2,495652	2,05751	2,471079	2,044403	2,446719	2,03148	2,422568	2,01874
2,520234	2,077748	2,495662	2,06462	2,471301	2,051676	2,448652	2,039707
2,544255	2,097401	2,519672	2,084246	2,495298	2,071273	2,471132	2,058484
2,567143	2,116188	2,54285	2,103167	2,51876	2,090325	2,495173	2,077819
2,588509	2,13392	2,563893	2,12071	2,539485	2,107682	2,51679	2,095633
2,609838	2,151401	2,585192	2,138157	2,560753	2,125095	2,536517	2,112215
2,629458	2,167769	2,604782	2,154496	2,580309	2,141404	2,55755	2,12929
2,648054	2,183409	2,624883	2,170925	2,600366	2,157778	2,576055	2,144807
2,668041	2,199611	2,643286	2,186245	2,619046	2,173221	2,595009	2,160373
2,686099	2,214595	2,661314	2,201191	2,637046	2,188132	2,612982	2,175251
2,703288	2,228955	2,678477	2,215519	2,653878	2,202267	2,629994	2,18947
2,719892	2,242859	2,695055	2,229395	2,670429	2,216116	2,646015	2,203023
2,736467	2,256623	2,711598	2,243129	2,686942	2,22982	2,662495	2,216697
2,752185	2,269805	2,727286	2,256284	2,7026	2,242948	2,678124	2,229798
2,767231	2,282513	2,742302	2,268966	2,717586	2,255604	2,693081	2,242429
2,782811	2,295411	2,757844	2,28183	2,733089	2,268435	2,709055	2,255499
2,797509	2,30773	2,772506	2,294118	2,747715	2,280693	2,723136	2,267453
2,811454	2,319546	2,786416	2,305905	2,761592	2,292451	2,73749	2,279457
2,825286	2,331212	2,800212	2,31754	2,775352	2,304054	2,751215	2,29103
2,837539	2,341928	2,812439	2,328234	2,787552	2,314725	2,764414	2,302231
2,851987	2,353763	2,826839	2,340027	2,801904	2,326477	2,777696	2,31339
2,863989	2,36418	2,83881	2,350417	2,813846	2,336842	2,789096	2,323452
2,87731	2,375243	2,852087	2,361442	2,827079	2,347828	2,802287	2,3344
2,889389	2,385553	2,864131	2,371721	2,839088	2,358075	2,814777	2,344894
2,900291	2,395145	2,875006	2,381288	2,849937	2,367618	2,826631	2,354971
2,912726	2,405511	2,887398	2,391615	2,862287	2,377907	2,837393	2,364386
2,924635	2,415522	2,899268	2,401592	2,874119	2,387847	2,849187	2,37429
2,935542	2,424919	2,910142	2,410958	2,884961	2,397184	2,860517	2,383879
2,945492	2,433727	2,920067	2,419741	2,894861	2,405943	2,87143	2,393177
2,957194	2,443441	2,931726	2,429416	2,90648	2,41558	2,881453	2,401931
2,96803	2,452622	2,942527	2,438564	2,917246	2,424693	2,892185	2,411012
2,978574	2,461586	2,952506	2,447203	2,927196	2,433305	2,902627	2,419879
2,988326	2,47006	2,96276	2,455941	2,937417	2,442011	2,912817	2,428555
2,998391	2,478655	2,972793	2,464505	2,947418	2,450545	2,922266	2,436774
3,008268	2,487097	2,982637	2,472917	2,957231	2,458926	2,932049	2,445125

Подовження додатку Е

$\varphi=109^\circ$		$\varphi=110^\circ$		$\varphi=111^\circ$		$\varphi=112^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,533012	1,334644	1,508449	1,322142	1,484146	1,309857	1,460098	1,297786
1,616192	1,395096	1,591415	1,382538	1,568323	1,370916	1,545445	1,359484
1,682242	1,444076	1,658336	1,431959	1,634651	1,420042	1,61274	1,409099
1,740643	1,48828	1,716955	1,476261	1,69478	1,465089	1,671506	1,453448
1,791175	1,52675	1,768366	1,515167	1,745753	1,503765	1,723334	1,49254
1,837093	1,561561	1,814427	1,550042	1,791954	1,538699	1,76967	1,527531
1,878326	1,593205	1,855397	1,581555	1,832668	1,570084	1,811738	1,559592
1,915205	1,621653	1,892693	1,610206	1,870372	1,598931	1,848239	1,587826
1,949546	1,6481	1,927352	1,636806	1,905497	1,625755	1,883825	1,614867
1,982547	1,673225	1,959758	1,66156	1,937476	1,650228	1,915688	1,639221
2,040082	1,717954	2,016998	1,706151	1,994103	1,694527	1,972904	1,68384
2,091183	1,758232	2,06832	1,746546	2,045643	1,735035	2,024644	1,724447
2,137173	1,794877	2,114471	1,78326	2,091953	1,771812	2,06962	1,760534
2,178283	1,827981	2,155714	1,816406	2,134817	1,805752	2,112605	1,794498
2,217593	1,859263	2,195117	1,847698	2,172824	1,836299	2,150714	1,825064
2,253383	1,88798	2,230979	1,87642	2,208759	1,865024	2,18672	1,853791
2,286028	1,914438	2,263682	1,90288	2,241518	1,891484	2,219536	1,880252
2,317923	1,939969	2,294126	1,927632	2,272004	1,916232	2,250061	1,904995
2,347174	1,963661	2,323401	1,951309	2,301301	1,939897	2,279378	1,928646
2,374122	1,985743	2,351845	1,974145	2,328281	1,961953	2,306373	1,950688
2,400114	2,006963	2,377841	1,995346	2,355746	1,983891	2,332373	1,971849
2,424692	2,027117	2,402416	2,01548	2,380316	2,004003	2,358392	1,992687
2,448663	2,046659	2,426372	2,034995	2,40279	2,02273	2,380862	2,011397
2,47178	2,065487	2,448876	2,053484	2,426451	2,041801	2,404204	2,030283
2,492778	2,082958	2,470451	2,07124	2,446828	2,058918	2,42486	2,047531
2,513979	2,100305	2,49013	2,087774	2,467951	2,076184	2,445945	2,064745
2,533468	2,116536	2,511075	2,104738	2,487383	2,092324	2,465355	2,08085
2,551949	2,132014	2,529535	2,120184	2,507301	2,108513	2,483781	2,09624
2,571474	2,14786	2,548433	2,135678	2,525582	2,123666	2,503215	2,111977
2,589422	2,162709	2,566059	2,150342	2,543484	2,138461	2,5208	2,126594
2,606311	2,176849	2,583325	2,164669	2,560528	2,15266	2,537921	2,140821
2,623315	2,190915	2,599305	2,178181	2,576983	2,166413	2,553372	2,15404
2,638259	2,20376	2,615726	2,191801	2,591892	2,179225	2,569735	2,167605
2,653858	2,216835	2,631298	2,204851	2,60892	2,193031	2,58525	2,180605
2,670298	2,230246	2,646199	2,217432	2,623794	2,205589	2,600096	2,193137
2,685222	2,242742	2,661589	2,230165	2,638653	2,218028	2,615907	2,206063
2,698767	2,2544	2,676112	2,242332	2,652148	2,229641	2,62987	2,217913
2,713591	2,266643	2,689892	2,254006	2,666892	2,241813	2,644083	2,229791
2,72728	2,278185	2,703548	2,265518	2,680515	2,253294	2,657673	2,241243
2,739939	2,289084	2,715674	2,276123	2,693117	2,264142	2,670743	2,252326
2,753691	2,300482	2,729889	2,287753	2,70679	2,275468	2,683883	2,263355
2,766086	2,311069	2,741748	2,298041	2,719123	2,285997	2,695194	2,273331
2,778218	2,321433	2,754859	2,308916	2,731193	2,296303	2,708227	2,284133
2,790671	2,331893	2,766769	2,319071	2,743575	2,306696	2,720575	2,294493
2,80198	2,341663	2,777543	2,328542	2,754829	2,316411	2,730806	2,303654
2,812716	2,351052	2,789776	2,338721	2,765516	2,325751	2,742966	2,313762
2,824985	2,361198	2,800991	2,348285	2,777707	2,335822	2,75462	2,323532
2,836281	2,370753	2,812253	2,357808	2,788938	2,345314	2,765821	2,332993
2,846649	2,379743	2,822085	2,366498	2,799254	2,354251	2,775111	2,341373
2,856646	2,388471	2,833587	2,376024	2,809203	2,36293	2,78654	2,350827
2,867859	2,397798	2,843745	2,384767	2,820346	2,372188	2,797147	2,359784
2,878271	2,406635	2,854125	2,393573	2,830697	2,380964	2,806967	2,368263
2,887913	2,415	2,864254	2,402188	2,840291	2,389279	2,81704	2,376821
2,897854	2,423474	2,873654	2,410357	2,850174	2,397696	2,826897	2,385211
2,907608	2,431796	2,88338	2,418651	2,859873	2,405963	2,836569	2,39345

Подовження додатку Е

$\varphi=113^\circ$		$\varphi=114^\circ$		$\varphi=115^\circ$		$\varphi=116^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,436297	1,285925	1,412739	1,274271	1,389418	1,262822	1,366328	1,251575
1,521368	1,347542	1,498918	1,336493	1,47667	1,325627	1,454617	1,314942
1,58947	1,397564	1,566407	1,386224	1,545065	1,375814	1,523897	1,36557
1,649714	1,442629	1,628103	1,43198	1,606669	1,4215	1,584163	1,410585
1,701104	1,481493	1,680159	1,47116	1,658289	1,460454	1,637679	1,450444
1,747573	1,516537	1,726749	1,506252	1,705004	1,495594	1,68451	1,485626
1,789382	1,548464	1,767216	1,537511	1,746797	1,527498	1,726536	1,517635
1,82629	1,576892	1,806071	1,566891	1,784467	1,556283	1,764564	1,546583
1,861205	1,603579	1,839895	1,593021	1,819866	1,583167	1,798887	1,572922
1,894077	1,628379	1,872641	1,617703	1,851673	1,607339	1,831162	1,597279
1,951865	1,673308	1,929499	1,662196	1,908787	1,651985	1,888229	1,641928
2,002321	1,713271	1,981648	1,702995	1,961131	1,69287	1,939319	1,682187
2,048939	1,750161	2,026955	1,739209	2,006598	1,729139	1,986395	1,719217
2,090573	1,783411	2,070173	1,773213	2,048488	1,762447	2,028409	1,752548
2,128785	1,813993	2,10848	1,80381	2,086896	1,793058	2,06691	1,783172
2,164861	1,842722	2,143181	1,831817	2,123106	1,821786	2,101766	1,811197
2,197732	1,869182	2,176106	1,858276	2,15608	1,848243	2,134792	1,837651
2,228296	1,893921	2,208141	1,883731	2,186716	1,87297	2,165463	1,862371
2,257633	1,917556	2,236063	1,906628	2,216087	1,896575	2,19485	1,885961
2,284641	1,939585	2,264514	1,929369	2,243116	1,918578	2,221889	1,907949
2,310641	1,960726	2,290513	1,95049	2,269113	1,939679	2,247882	1,929029
2,336642	1,981532	2,315064	1,970537	2,293655	1,959704	2,272414	1,949032
2,359106	2,000225	2,337521	1,989213	2,317527	1,97908	2,296265	1,96837
2,382423	2,019078	2,360811	2,008031	2,339651	1,997278	2,318937	1,986816
2,403062	2,036299	2,381433	2,025219	2,359973	2,014291	2,340097	2,004232
2,424113	2,053462	2,402454	2,042334	2,380968	2,031365	2,359656	2,020555
2,443504	2,069534	2,421828	2,058377	2,400328	2,047382	2,379004	2,03655
2,461916	2,084901	2,440227	2,073723	2,418716	2,06271	2,398798	2,052578
2,481031	2,100456	2,459318	2,089251	2,43807	2,078356	2,416993	2,067622
2,498888	2,115202	2,477155	2,103974	2,4556	2,092911	2,434506	2,082158
2,515987	2,129407	2,493751	2,117909	2,472655	2,107073	2,451256	2,096154
2,531424	2,142611	2,509654	2,131347	2,488063	2,120249	2,46665	2,109316
2,547758	2,156151	2,52596	2,14486	2,504342	2,133736	2,482901	2,122777
2,563247	2,169126	2,541423	2,157812	2,519778	2,146662	2,498311	2,135679
2,578066	2,181634	2,556217	2,170296	2,534546	2,159123	2,513054	2,148116
2,593838	2,194525	2,571466	2,1829	2,550242	2,171942	2,528713	2,1609
2,607774	2,206349	2,585859	2,19495	2,564124	2,183717	2,542569	2,172648
2,621954	2,218197	2,59952	2,206515	2,577758	2,195254	2,556654	2,184404
2,635022	2,229363	2,613048	2,217908	2,591256	2,206618	2,570123	2,195739
2,648553	2,240674	2,625086	2,228428	2,603273	2,217117	2,583079	2,20671
2,661169	2,251414	2,639133	2,2399	2,617282	2,228551	2,595612	2,217367
2,672951	2,261628	2,650893	2,25009	2,629018	2,238717	2,607327	2,227511
2,685949	2,272395	2,663366	2,260566	2,641945	2,249414	2,62022	2,238173
2,69777	2,282462	2,675648	2,270861	2,653712	2,259425	2,631961	2,248157
2,708478	2,291865	2,686336	2,280242	2,664381	2,268785	2,642611	2,257495
2,720603	2,301939	2,698428	2,290282	2,67644	2,278792	2,654638	2,267469
2,731731	2,311416	2,709529	2,299731	2,687514	2,288213	2,665687	2,276863
2,742901	2,320846	2,720179	2,308873	2,69814	2,29733	2,676774	2,286206
2,752672	2,329471	2,730424	2,317736	2,708364	2,306169	2,686492	2,29477
2,764068	2,338891	2,740307	2,326344	2,718227	2,314755	2,69779	2,30409
2,774149	2,347554	2,751843	2,335761	2,729728	2,324136	2,707802	2,31268
2,784443	2,356273	2,761617	2,344192	2,73948	2,332543	2,718018	2,321317
2,793991	2,364539	2,771637	2,352695	2,749475	2,341021	2,727503	2,329516
2,803822	2,372902	2,781442	2,361032	2,759255	2,349331	2,73726	2,337801
2,813468	2,381115	2,791063	2,369219	2,76836	2,357235	2,746832	2,345939

# Подовження додатку Е

$\varphi=117^\circ$		$\varphi=118^\circ$		$\varphi=119^\circ$		$\varphi=120^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,343463	1,240526	1,320819	1,229675	1,299566	1,219574	1,277337	1,2091
1,432757	1,304436	1,411085	1,294107	1,389598	1,283954	1,369616	1,274594
1,502899	1,355491	1,482069	1,345577	1,461402	1,335825	1,440897	1,326236
1,563084	1,400447	1,543398	1,391056	1,522641	1,381238	1,502046	1,371584
1,616156	1,440075	1,59587	1,430383	1,575739	1,420846	1,555758	1,411463
1,663105	1,475301	1,642929	1,465648	1,622903	1,456149	1,603026	1,446801
1,704887	1,507181	1,684941	1,497629	1,665142	1,488226	1,645488	1,478971
1,743294	1,536298	1,723695	1,526897	1,704238	1,51764	1,683441	1,507832
1,778074	1,562836	1,758506	1,553429	1,739081	1,544166	1,71873	1,534544
1,810805	1,587374	1,790598	1,577625	1,770827	1,568168	1,751198	1,558861
1,867824	1,632024	1,84757	1,622275	1,828896	1,61336	1,808928	1,603908
1,919119	1,672373	1,899069	1,662707	1,880586	1,653867	1,860825	1,644491
1,966345	1,709441	1,946447	1,699811	1,9267	1,690328	1,907102	1,680993
2,008482	1,742795	1,987301	1,732505	1,967687	1,723052	1,949609	1,714405
2,045666	1,772738	2,025995	1,76315	2,006473	1,753705	1,9871	1,744405
2,082006	1,801462	2,062396	1,79187	2,042935	1,782422	2,022247	1,772458
2,115079	1,827913	2,095515	1,818318	2,074717	1,808195	2,055458	1,798896
2,145782	1,852626	2,126248	1,843023	2,105482	1,832892	2,08625	1,823585
2,175182	1,876201	2,154272	1,865901	2,134906	1,856434	2,115684	1,84711
2,202229	1,898175	2,181326	1,887859	2,161965	1,878379	2,142746	1,86904
2,228218	1,919235	2,207309	1,908898	2,187939	1,899389	2,16871	1,890012
2,252739	1,939213	2,231815	1,928837	2,212435	1,919292	2,193197	1,909882
2,275169	1,957812	2,255629	1,948096	2,234854	1,937838	2,215614	1,928406
2,298101	1,976361	2,277986	1,966334	2,258027	1,956455	2,238223	1,946722
2,318966	1,993606	2,298004	1,983139	2,278594	1,973516	2,259333	1,964033
2,338516	2,009906	2,318942	2,000114	2,298137	1,989781	2,278874	1,980286
2,359258	2,026587	2,338271	2,016072	2,31884	2,006407	2,298189	1,996213
2,377628	2,041883	2,356632	2,031353	2,337194	2,021676	2,317908	2,012144
2,396088	2,057049	2,375634	2,046778	2,355621	2,036803	2,33577	2,026983
2,413865	2,071708	2,393391	2,061417	2,373084	2,051284	2,353216	2,041446
2,430504	2,085639	2,40992	2,075283	2,389966	2,065317	2,370171	2,055505
2,446824	2,099262	2,425752	2,088652	2,406244	2,078899	2,385512	2,068612
2,46305	2,112699	2,441951	2,102062	2,421029	2,091592	2,40166	2,081972
2,478436	2,125578	2,457313	2,114916	2,436366	2,104422	2,416975	2,094778
2,493156	2,137992	2,472008	2,127306	2,45243	2,117483	2,431624	2,10712
2,507835	2,150263	2,487128	2,139785	2,466591	2,129467	2,446684	2,119537
2,521194	2,161746	2,499997	2,151011	2,480374	2,141141	2,460907	2,131417
2,535721	2,173712	2,51496	2,16318	2,49437	2,152806	2,474414	2,142824
2,548688	2,184777	2,527904	2,17422	2,507758	2,164057	2,487777	2,154047
2,561617	2,195721	2,540336	2,184897	2,520637	2,174947	2,499705	2,164447
2,5746	2,206594	2,553762	2,195979	2,533097	2,185524	2,51307	2,175463
2,585818	2,216471	2,565908	2,206317	2,544752	2,195601	2,525171	2,18575
2,599155	2,227343	2,578265	2,216672	2,557551	2,206163	2,537476	2,196047
2,610871	2,2373	2,589958	2,226603	2,56922	2,216067	2,549123	2,205926
2,622459	2,247109	2,601047	2,236143	2,57982	2,225346	2,560173	2,215421
2,633022	2,256313	2,611591	2,245326	2,591757	2,235224	2,570685	2,224564
2,644525	2,265927	2,623542	2,255153	2,602736	2,244541	2,582575	2,234326
2,655107	2,274995	2,634102	2,264197	2,613747	2,253801	2,593096	2,243324
2,664809	2,28354	2,644741	2,273212	2,623421	2,262311	2,60369	2,25229
2,676076	2,292828	2,65455	2,281736	2,634628	2,271537	2,613465	2,260775
2,686547	2,301643	2,665472	2,290769	2,644578	2,280058	2,623864	2,269512
2,696257	2,310005	2,675163	2,299109	2,65425	2,288377	2,633986	2,278048
2,706204	2,318431	2,685087	2,307511	2,664151	2,296755	2,643865	2,286403
2,715937	2,326693	2,694319	2,315502	2,673839	2,304969	2,653062	2,294356
2,725004	2,334555	2,703846	2,323591	2,68287	2,312793	2,662546	2,302401

# Подовження додатку Е

$\varphi=121^\circ$		$\varphi=122^\circ$		$\varphi=123^\circ$		$\varphi=124^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,256469	1,199353	1,234699	1,189277	1,214029	1,1798	1,193533	1,170492
1,348474	1,264777	1,327505	1,255133	1,308	1,246246	1,288642	1,237508
1,42055	1,316808	1,400358	1,30754	1,380318	1,298432	1,361844	1,290117
1,482808	1,362645	1,462519	1,353306	1,443564	1,344664	1,424744	1,336164
1,535927	1,402233	1,516242	1,393156	1,497727	1,384697	1,478323	1,375917
1,583296	1,437605	1,564738	1,429033	1,545287	1,420132	1,526989	1,411839
1,626654	1,470179	1,607808	1,461456	1,588288	1,452503	1,569717	1,444066
1,664273	1,498872	1,645909	1,490364	1,626838	1,481606	1,608766	1,473381
1,699593	1,525575	1,680592	1,51675	1,661727	1,508068	1,644032	1,500001
1,731992	1,549838	1,712918	1,540961	1,694256	1,532359	1,675718	1,523898
1,789107	1,594609	1,770832	1,586113	1,752681	1,577749	1,733272	1,568891
1,841211	1,635264	1,82313	1,626831	1,803797	1,617895	1,785976	1,609731
1,887653	1,671804	1,869726	1,663404	1,85056	1,6545	1,832894	1,646366
1,930283	1,705232	1,911104	1,696205	1,892071	1,687325	1,874528	1,679211
1,967875	1,735249	1,950154	1,726877	1,93121	1,718002	1,912411	1,709273
2,004454	1,763956	1,985433	1,75494	1,966555	1,746069	1,94782	1,737343
2,036344	1,78974	2,017373	1,780728	1,999885	1,77249	1,981188	1,763758
2,067162	1,814421	2,048216	1,805401	2,029411	1,796524	2,012074	1,788412
2,096604	1,837929	2,077665	1,828892	2,058863	1,819993	2,040198	1,811226
2,123667	1,859836	2,104725	1,850764	2,085922	1,841826	2,06726	1,833025
2,149623	1,880769	2,129328	1,871017	2,111872	1,862695	2,093211	1,853867
2,172745	1,899953	2,153806	1,89083	2,13501	1,881847	2,11636	1,873008
2,19652	1,919114	2,177573	1,909965	2,158771	1,900958	2,140116	1,892095
2,218846	1,937273	2,199891	1,9281	2,181084	1,919072	2,162423	1,910189
2,23886	1,954033	2,219907	1,944848	2,201101	1,935809	2,182444	1,926917
2,259762	1,970936	2,240799	1,961732	2,221986	1,952675	2,203322	1,943766
2,279071	1,98685	2,260104	1,977634	2,241286	1,968565	2,222618	1,959646
2,297411	2,002095	2,278437	1,992868	2,259614	1,98379	2,240941	1,97486
2,316351	2,017451	2,297088	2,008071	2,278248	1,998972	2,259558	1,990022
2,333782	2,031896	2,314503	2,022498	2,295647	2,013382	2,276942	2,004414
2,350536	2,045846	2,33106	2,036342	2,312189	2,027208	2,29347	2,018223
2,36632	2,059163	2,347279	2,049861	2,32839	2,040707	2,309652	2,0317
2,382444	2,072497	2,36338	2,06317	2,343123	2,05334	2,324373	2,044319
2,397736	2,08528	2,37865	2,075929	2,35837	2,066073	2,3396	2,057028
2,412365	2,097599	2,393258	2,088225	2,374305	2,078999	2,355504	2,06992
2,426938	2,109761	2,407808	2,100361	2,388381	2,090889	2,369562	2,081787
2,44022	2,121161	2,421073	2,11174	2,40208	2,102467	2,383241	2,093342
2,45462	2,132994	2,434989	2,123319	2,415972	2,114017	2,397109	2,104864
2,467959	2,14419	2,448304	2,134487	2,428813	2,124939	2,409932	2,115763
2,480332	2,154799	2,461115	2,145298	2,442054	2,135946	2,421805	2,126089
2,493207	2,165555	2,473509	2,155801	2,454429	2,146424	2,435506	2,137196
2,504367	2,175359	2,485113	2,165814	2,466017	2,156417	2,447079	2,147169
2,517567	2,186086	2,497825	2,17628	2,47825	2,16663	2,45929	2,157356
2,529193	2,195941	2,50943	2,18611	2,489835	2,176436	2,470857	2,167139
2,539302	2,204952	2,519988	2,195335	2,500834	2,185867	2,48184	2,176549
2,551184	2,214769	2,531844	2,205122	2,512665	2,195626	2,492294	2,185618
2,562584	2,224268	2,542761	2,214367	2,523108	2,204623	2,504074	2,195258
2,573085	2,233244	2,553244	2,223321	2,534029	2,213781	2,514975	2,204393
2,582731	2,24172	2,563338	2,23201	2,544107	2,222452	2,525037	2,213046
2,593883	2,250886	2,573082	2,240458	2,553836	2,230882	2,534753	2,221459
2,603794	2,259365	2,583896	2,249376	2,564625	2,239774	2,545518	2,230324
2,613895	2,267878	2,593975	2,257866	2,574227	2,248014	2,555103	2,238547
2,623287	2,275975	2,60335	2,265945	2,584043	2,256303	2,5649	2,246814
2,632932	2,284144	2,612975	2,274093	2,593648	2,26443	2,574031	2,254697
2,642395	2,292168	2,622417	2,282095	2,602612	2,272183	2,583432	2,262659



Подовження додатку Е

$\varphi=125^\circ$		$\varphi=126^\circ$		$\varphi=127^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,173204	1,161352	1,153037	1,152378	1,133025	1,143567
1,26815	1,228351	1,249084	1,219919	1,230156	1,211635
1,342092	1,281316	1,323879	1,273285	1,30579	1,265391
1,406056	1,327808	1,387497	1,319593	1,369067	1,311521
1,460068	1,36774	1,441939	1,359699	1,423932	1,351795
1,507811	1,403233	1,489768	1,395219	1,471846	1,387342
1,551278	1,43577	1,533761	1,427965	1,515572	1,419944
1,589969	1,464908	1,572153	1,456956	1,554458	1,449138
1,625424	1,491599	1,607969	1,483796	1,589612	1,475675
1,657303	1,51558	1,639285	1,507526	1,621658	1,499732
1,715376	1,560804	1,697602	1,552851	1,679948	1,545032
1,768278	1,601698	1,749356	1,593193	1,731914	1,585432
1,814009	1,637748	1,796601	1,62988	1,779317	1,622141
1,855775	1,670615	1,83849	1,662765	1,821327	1,655044
1,895082	1,701299	1,876558	1,692853	1,859483	1,685144
1,930551	1,729372	1,912088	1,720928	1,895069	1,713221
1,962631	1,755171	1,945524	1,747329	1,927234	1,739026
1,993537	1,779815	1,976444	1,771954	1,958163	1,763615
2,021668	1,802592	2,004585	1,794698	1,986321	1,786332
2,048737	1,824363	2,031664	1,816447	2,013414	1,80806
2,074692	1,845182	2,056317	1,836641	2,039383	1,828841
2,099172	1,86493	2,080801	1,856372	2,062575	1,847962
2,121607	1,883379	2,103243	1,87481	2,086323	1,866987
2,144174	1,901578	2,126067	1,89311	2,108363	1,884909
2,165252	1,918792	2,146881	1,910187	2,128657	1,901732
2,184806	1,935006	2,16644	1,926396	2,149519	1,918537
2,2041	1,950876	2,18573	1,942257	2,168806	1,934388
2,222417	1,96608	2,204042	1,95745	2,187114	1,949572
2,241281	1,981346	2,22315	1,972816	2,205163	1,964432
2,258388	1,995596	2,240507	1,987173	2,222506	1,978771
2,275341	2,009595	2,256918	2,000905	2,239078	1,992566
2,291065	2,022843	2,272629	2,014134	2,254343	2,005576
2,307098	2,036075	2,28864	2,027341	2,270333	2,018757
2,322306	2,048762	2,303829	2,040004	2,285503	2,031396
2,336856	2,06099	2,318361	2,052208	2,300017	2,043577
2,350895	2,072834	2,332821	2,064238	2,314893	2,055784
2,364556	2,084365	2,346025	2,075537	2,327648	2,06686
2,378401	2,095859	2,359848	2,087004	2,341885	2,078504
2,391651	2,106949	2,373078	2,098068	2,355096	2,089543
2,404401	2,117686	2,385809	2,108781	2,367374	2,100026
2,41674	2,128118	2,39813	2,119189	2,380115	2,110619
2,428299	2,138072	2,409677	2,129124	2,391212	2,120328
2,440488	2,148232	2,422287	2,139471	2,403799	2,130646
2,452037	2,157992	2,433819	2,149209	2,415314	2,140362
2,463005	2,167383	2,44433	2,158368	2,425815	2,149506
2,473447	2,176435	2,45609	2,168044	2,437552	2,159155
2,485202	2,186046	2,466934	2,1772	2,448379	2,168291
2,496083	2,195158	2,477351	2,186075	2,459222	2,177358
2,50613	2,203792	2,487385	2,194692	2,468801	2,185747
2,515833	2,21219	2,497074	2,203074	2,478478	2,194114
2,526573	2,221028	2,507791	2,211888	2,48917	2,202902
2,536142	2,229234	2,517344	2,220076	2,499151	2,211286
2,545919	2,237481	2,527102	2,228303	2,508448	2,219282
2,555035	2,245347	2,536203	2,236154	2,517976	2,227331
2,564417	2,25329	2,545566	2,244077	2,52732	2,235237



	$\varphi=128^\circ$		$\varphi=129^\circ$		$\varphi=130^\circ$		$\varphi=131^\circ$	
	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
$\beta=0,1$	1,113164	1,134918	1,093448	1,12643	1,074721	1,118459	1,055276	1,110282
$\beta=0,2$	1,211362	1,203497	1,192701	1,195506	1,174169	1,187661	1,155765	1,179962
$\beta=0,3$	1,286445	1,257042	1,268604	1,249432	1,250881	1,241957	1,233274	1,234619
$\beta=0,4$	1,350763	1,303592	1,332584	1,295805	1,315652	1,288635	1,297708	1,281125
$\beta=0,5$	1,406046	1,344028	1,388279	1,336397	1,370631	1,328905	1,353099	1,321549
$\beta=0,6$	1,454045	1,3796	1,436362	1,371996	1,418796	1,364528	1,402314	1,357601
$\beta=0,7$	1,498292	1,412404	1,480346	1,404659	1,463294	1,397384	1,446353	1,390239
$\beta=0,8$	1,536884	1,441454	1,519428	1,433904	1,502913	1,42684	1,485683	1,419555
$\beta=0,9$	1,572392	1,468139	1,555285	1,460732	1,538289	1,453456	1,521404	1,44631
$\beta=1$	1,604143	1,492071	1,586738	1,484546	1,569713	1,47727	1,553061	1,470238
$\beta=1,2$	1,662415	1,537347	1,645001	1,529798	1,629033	1,52295	1,611847	1,515662
$\beta=1,4$	1,714593	1,577803	1,697394	1,570305	1,681626	1,563503	1,664659	1,556261
$\beta=1,6$	1,762156	1,614532	1,745117	1,607054	1,728199	1,599706	1,711402	1,592491
$\beta=1,8$	1,804287	1,647452	1,787368	1,639989	1,77057	1,632657	1,753892	1,625455
$\beta=2$	1,842529	1,677563	1,825695	1,670111	1,80898	1,662788	1,792384	1,655597
$\beta=2,2$	1,87817	1,705641	1,860102	1,697622	1,843447	1,690311	1,826909	1,68313
$\beta=2,4$	1,910372	1,731449	1,893623	1,72399	1,876984	1,716646	1,860457	1,709419
$\beta=2,6$	1,941308	1,755994	1,923287	1,74792	1,906675	1,74055	1,890181	1,733305
$\beta=2,8$	1,969486	1,77869	1,951491	1,7706	1,934907	1,763219	1,918444	1,755967
$\beta=3$	1,996595	1,800403	1,978618	1,792299	1,962054	1,784908	1,945613	1,777648
$\beta=3,2$	2,021285	1,820584	2,004608	1,813051	1,986788	1,805084	1,97037	1,797823
$\beta=3,4$	2,045781	1,840286	2,027835	1,832165	2,011301	1,824761	1,994892	1,817489
$\beta=3,6$	2,068242	1,858708	2,051583	1,851155	2,033783	1,843169	2,017386	1,835892
$\beta=3,8$	2,090797	1,876849	2,073626	1,869049	2,056589	1,861389	2,039938	1,853982
$\beta=4$	2,111868	1,894017	2,09393	1,885855	2,077405	1,878414	2,059751	1,87055
$\beta=4,2$	2,131439	1,91022	2,113507	1,902055	2,096988	1,894612	2,080596	1,887302
$\beta=4,4$	2,150723	1,926061	2,132789	1,917887	2,116268	1,910434	2,099875	1,903115
$\beta=4,6$	2,169026	1,941234	2,152364	1,933629	2,134562	1,925586	2,118165	1,918256
$\beta=4,8$	2,18758	1,956314	2,170391	1,948456	2,153339	1,940738	2,136424	1,933161
$\beta=5$	2,204909	1,970635	2,187709	1,962758	2,170391	1,954907	2,153717	1,947425
$\beta=5,2$	2,221382	1,984372	2,204254	1,976516	2,186839	1,968607	2,169985	1,961032
$\beta=5,4$	2,237497	1,997764	2,219501	1,989497	2,202924	1,981958	2,185217	1,973985
$\beta=5,6$	2,252177	2,010323	2,235453	2,002628	2,217588	1,994487	2,201133	1,987064
$\beta=5,8$	2,267329	2,022938	2,250589	2,01522	2,232707	2,007054	2,216237	1,999609
$\beta=6$	2,281826	2,035096	2,265071	2,027356	2,247174	2,019168	2,230691	2,011701
$\beta=6,2$	2,29711	2,047474	2,279474	2,039308	2,262408	2,031482	2,245481	2,023794
$\beta=6,4$	2,310721	2,058938	2,292641	2,050552	2,275989	2,042901	2,258206	2,03481
$\beta=6,6$	2,32407	2,070148	2,306403	2,061938	2,289308	2,054067	2,272354	2,046336
$\beta=6,8$	2,337263	2,081163	2,319578	2,072928	2,302467	2,065034	2,285075	2,057088
$\beta=7$	2,349094	2,091423	2,33226	2,083572	2,314282	2,075264	2,297728	2,067688
$\beta=7,2$	2,36225	2,102194	2,344534	2,093915	2,327395	2,085978	2,309975	2,077989
$\beta=7,4$	2,374207	2,112297	2,356046	2,103797	2,339324	2,096041	2,321468	2,087839
$\beta=7,6$	2,385903	2,122179	2,368159	2,113858	2,350992	2,105883	2,33397	2,098049
$\beta=7,8$	2,397403	2,131874	2,379643	2,123533	2,362463	2,115538	2,345427	2,107685
$\beta=8$	2,408766	2,141415	2,390558	2,132851	2,373794	2,125038	2,355895	2,116776
$\beta=8,2$	2,419174	2,150421	2,400957	2,141842	2,384184	2,134016	2,366275	2,125739
$\beta=8,4$	2,430421	2,159743	2,412616	2,151343	2,395393	2,143292	2,37789	2,13519
$\beta=8,6$	2,440809	2,168581	2,423423	2,160368	2,405754	2,152097	2,388663	2,144175
$\beta=8,8$	2,450379	2,176958	2,433417	2,168937	2,415306	2,160452	2,398634	2,152715
$\beta=9$	2,461355	2,185934	2,44307	2,177276	2,426236	2,169379	2,408264	2,161028
$\beta=9,2$	2,47115	2,194283	2,453285	2,185813	2,436003	2,177697	2,418442	2,169528
$\beta=9,4$	2,481112	2,202647	2,463228	2,194159	2,445498	2,185823	2,42835	2,177838
$\beta=9,6$	2,490395	2,210628	2,472496	2,202125	2,455184	2,193977	2,43759	2,185777
$\beta=9,8$	2,499904	2,218659	2,481988	2,210139	2,464226	2,201772	2,447046	2,193758
$\beta=10$	2,508791	2,226337	2,491295	2,21801	2,473514	2,209626	2,455889	2,201397

$\varphi=132^\circ$		$\varphi=133^\circ$		$\varphi=134^\circ$		$\varphi=135^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
1,0368	1,1026071	1,01761	1,09473718	0,999371	1,08735567	0,981243	1,080117017
1,1375	1,1724091	1,120536	1,16549166	1,102491	1,15822147	1,084565	1,151097759
1,2158	1,2274181	1,19973	1,22089275	1,182449	1,21395579	1,165277	1,207156853
1,281	1,2742143	1,26328	1,26698241	1,246778	1,26033365	1,230377	1,253812312
1,3366	1,3147298	1,319337	1,30764374	1,303092	1,30107928	1,286947	1,294639621
1,385	1,3504004	1,368701	1,34372736	1,352529	1,33717839	1,336457	1,330754234
1,4303	1,383541	1,413553	1,3766527	1,396929	1,36989657	1,381159	1,363571846
1,4694	1,4127433	1,45318	1,40605631	1,437081	1,39949423	1,421082	1,393058008
1,5046	1,4392964	1,487962	1,43241465	1,472375	1,42605909	1,455918	1,419436252
1,5362	1,4632244	1,520062	1,4565598	1,503714	1,44991428	1,487988	1,443607247
1,5961	1,509056	1,57913	1,50203224	1,56358	1,49567187	1,54813	1,489430349
1,6478	1,5491546	1,632367	1,54271429	1,61575	1,53586789	1,600516	1,529670174
1,6947	1,5854082	1,679439	1,57898885	1,662992	1,57216399	1,647916	1,565984719
1,7373	1,618386	1,720892	1,61144952	1,705821	1,60516568	1,689607	1,598487816
1,7759	1,648537	1,759543	1,6416095	1,743297	1,63481553	1,728403	1,628663859
1,8105	1,6760787	1,79542	1,66967431	1,779201	1,66284669	1,76309	1,656137564
1,844	1,7023118	1,827746	1,69532804	1,811563	1,68847014	1,795498	1,681740963
1,8738	1,7261859	1,857551	1,71919637	1,841417	1,71233807	1,825403	1,705612896
1,9021	1,7488444	1,885884	1,74185405	1,869787	1,73499763	1,853814	1,728276802
1,9293	1,7705197	1,9131	1,76352464	1,897029	1,75666488	1,881082	1,749941545
1,9541	1,7906946	1,937906	1,783701	1,921861	1,77684334	1,90594	1,770122842
1,9786	1,8103507	1,96245	1,80334768	1,946417	1,79648035	1,930508	1,789750534
2,0011	1,8287487	1,984969	1,82174046	1,96895	1,81486876	1,953056	1,808134624
2,0234	1,8467136	2,007274	1,83969162	1,991257	1,83280636	1,975367	1,826057841
2,0435	1,8633876	2,027356	1,85636104	2,011349	1,8494708	1,995469	1,842717802
2,0643	1,8801267	2,046959	1,87255075	2,030959	1,86565717	2,016303	1,859415685
2,0836	1,8959297	2,066234	1,88834242	2,050233	1,88143822	2,034358	1,874670697
2,1019	1,9110595	2,085754	1,90399764	2,069739	1,89707126	2,053852	1,890280702
2,1199	1,9258356	2,103494	1,91864834	2,087473	1,91170586	2,07158	1,904899214
2,1372	1,940081	2,120765	1,93287442	2,104488	1,92580671	2,088831	1,919086429
2,1537	1,9537813	2,137099	1,94648302	2,121058	1,93950333	2,105147	1,932658708
2,1689	1,9667197	2,152732	1,95958785	2,136683	1,95259039	2,120764	1,945727951
2,1848	1,9797741	2,168615	1,97261715	2,152551	1,96559489	2,136618	1,958707458
2,1999	1,9922965	2,183692	1,98511744	2,166384	1,97753631	2,150449	1,970636853
2,2143	2,0043674	2,198121	1,99716737	2,180801	1,98956361	2,164855	1,98264348
2,2287	2,0162458	2,212044	2,00883834	2,195946	2,00175271	2,17998	1,994802241
2,2418	2,0274359	2,225588	2,02019489	2,209479	2,01308925	2,193503	2,006119324
2,2555	2,0387456	2,238867	2,0312959	2,222746	2,02416989	2,20676	2,017179851
2,2682	2,0494776	2,251982	2,04219446	2,235436	2,03486519	2,219441	2,027857675
2,2801	2,059679	2,263778	2,05238282	2,24764	2,04522244	2,231637	2,038199286
2,2931	2,070339	2,276832	2,06301672	2,260264	2,05564873	2,244247	2,048604173
2,305	2,0803632	2,288725	2,0730233	2,27132	2,06527157	2,255301	2,058217245
2,3171	2,0903574	2,300356	2,08280941	2,283765	2,07540602	2,267728	2,068327946
2,3285	2,0999751	2,311788	2,09240873	2,295185	2,0849879	2,279137	2,07789363
2,3394	2,1092452	2,321826	2,1012893	2,305634	2,09404526	2,28958	2,086941042
2,3498	2,1181967	2,333441	2,11079167	2,317231	2,10352583	2,30116	2,096400557
2,361	2,1274304	2,34418	2,1198173	2,327957	2,1125355	2,311463	2,105213465
2,3713	2,1362042	2,354921	2,12876496	2,338268	2,1212808	2,322173	2,114126645
2,3808	2,1445382	2,36445	2,13709024	2,348205	2,12978283	2,332099	2,122617148
2,3917	2,1534184	2,374058	2,14537973	2,357803	2,13806173	2,341688	2,130886441
2,4015	2,1617065	2,384621	2,1540332	2,368345	2,14669503	2,351797	2,139316954
2,4113	2,1699994	2,394494	2,16230973	2,377785	2,15476926	2,361636	2,147562493
2,4206	2,1779264	2,403707	2,17022449	2,386985	2,16267252	2,37081	2,155446122
2,43	2,1858912	2,413126	2,17817353	2,396373	2,17059591	2,380163	2,163340889
2,4388	2,1935183	2,421924	2,18577743	2,405557	2,17836262	2,388903	2,170896488

$\varphi=136^\circ$		$\varphi=137^\circ$		$\varphi=138^\circ$		$\varphi=139^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,9632224	1,073021	0,9453074	1,066068	0,927495	1,059258	0,909783	1,052591
1,0679377	1,144582	1,0512346	1,138126	1,034601	1,131793	1,018062	1,125592
1,1495207	1,201004	1,1325527	1,194472	1,116982	1,188567	1,101499	1,182782
1,214075	1,247419	1,1978711	1,241154	1,182835	1,235424	1,166817	1,229411
1,2708995	1,288326	1,2549491	1,282138	1,239095	1,276077	1,223336	1,270144
1,320484	1,324456	1,3046092	1,318283	1,288832	1,312239	1,274071	1,306666
1,3654848	1,357369	1,349905	1,351289	1,334419	1,345332	1,319026	1,339501
1,405183	1,386748	1,3893824	1,380566	1,374463	1,374812	1,358853	1,368882
1,4405271	1,413326	1,4252309	1,407336	1,410029	1,401467	1,394921	1,395719
1,4720968	1,437321	1,4568186	1,431362	1,441374	1,425426	1,426278	1,419711
1,53278	1,483309	1,5162627	1,476813	1,50112	1,470943	1,487325	1,46567
1,5853838	1,523589	1,5703523	1,517627	1,555421	1,511784	1,540591	1,506062
1,6316981	1,559422	1,6168318	1,553486	1,602066	1,547668	1,5874	1,54197
1,6747439	1,592445	1,6587536	1,58603	1,644096	1,580231	1,629536	1,574552
1,7123778	1,62213	1,6976834	1,616217	1,681857	1,60992	1,667336	1,604212
1,7470886	1,649551	1,7324176	1,643583	1,716634	1,637242	1,702166	1,631506
1,7795516	1,675143	1,7649373	1,669171	1,74922	1,662833	1,73482	1,657105
1,8095113	1,699023	1,79495	1,693062	1,779293	1,686738	1,764949	1,681025
1,8379628	1,721693	1,8234406	1,715739	1,807827	1,709423	1,793524	1,703719
1,8652591	1,743356	1,8495597	1,73691	1,835178	1,731085	1,819718	1,724911
1,8901439	1,76354	1,8756737	1,757588	1,860117	1,751275	1,845869	1,745574
1,9147256	1,783159	1,8990678	1,776707	1,884726	1,770876	1,869309	1,764696
1,9372876	1,801539	1,9216452	1,795082	1,907318	1,789247	1,891918	1,783063
1,9598448	1,819549	1,944445	1,813175	1,929406	1,807034	1,914485	1,801025
1,9797164	1,836103	1,9652879	1,830121	1,949779	1,823776	1,934398	1,817572
2,0005473	1,852787	1,9849187	1,846297	1,969417	1,839946	1,955221	1,83421
2,0198182	1,868546	2,0041887	1,862043	1,988687	1,85568	1,973312	1,849457
2,038093	1,883627	2,0224615	1,877111	2,006958	1,870734	1,99276	1,864972
2,0560556	1,89833	2,0406561	1,891895	2,025381	1,885594	2,010466	1,879523
2,0730563	1,912396	2,0576501	1,905943	2,042369	1,899623	2,027449	1,893534
2,0893652	1,92595	2,0741123	1,919546	2,058586	1,913108	2,043582	1,90697
2,1049749	1,939001	2,0893159	1,932412	2,073787	1,92596	2,059569	1,920128
2,1208153	1,951956	2,1051435	1,945342	2,089602	1,938865	2,074193	1,932528
2,1346447	1,963874	2,1201732	1,957752	2,104623	1,951254	2,089204	1,944895
2,1490414	1,97586	2,1345617	1,96972	2,119003	1,963201	2,103577	1,956823
2,164147	1,987989	2,1484473	1,981313	2,133278	1,974941	2,117842	1,96854
2,1776614	1,999286	2,1619534	1,992592	2,146379	1,986036	2,13094	1,97962
2,1909078	2,010327	2,1751904	2,003613	2,160006	1,997205	2,144555	1,990768
2,2035809	2,020988	2,187856	2,014257	2,172665	2,007833	2,157602	2,001544
2,2157702	2,031314	2,2000389	2,024569	2,184444	2,017964	2,168986	2,011501
2,228367	2,041698	2,2126234	2,034933	2,197415	2,028476	2,181942	2,02199
2,239418	2,051302	2,2236725	2,044528	2,20926	2,0384	2,193779	2,0319
2,2518287	2,06139	2,2360666	2,054593	2,220841	2,048107	2,205352	2,041592
2,2632262	2,070939	2,2474538	2,064127	2,23182	2,057457	2,216719	2,051097
2,2736649	2,079978	2,2578879	2,073157	2,242249	2,06648	2,227937	2,060444
2,2852272	2,089416	2,2694331	2,082575	2,253778	2,075878	2,238262	2,069326
2,295521	2,098218	2,2797184	2,091366	2,264455	2,084829	2,248927	2,078264
2,3062168	2,107115	2,2903994	2,100247	2,274722	2,093525	2,259579	2,087116
2,3161322	2,115595	2,3003048	2,108717	2,284617	2,101985	2,269068	2,0954
2,3257109	2,123854	2,3098738	2,116968	2,294174	2,110226	2,278595	2,103619
2,3358034	2,13227	2,3199443	2,125364	2,304206	2,118592	2,288991	2,112124
2,3452087	2,140315	2,329315	2,133383	2,313949	2,126758	2,298306	2,120095
2,3547586	2,148352	2,338833	2,141392	2,323037	2,134569	2,307773	2,128057
2,3636705	2,156039	2,3477219	2,149059	2,331907	2,142218	2,316628	2,135689
2,3727984	2,163755	2,3568279	2,156753	2,340994	2,149893	2,325299	2,143176

$\varphi=140^\circ$		$\varphi=141^\circ$		$\varphi=142^\circ$		$\varphi=143^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,892168	1,046068	0,875443	1,039977	0,858013	1,033738	0,84146	1,027919
1,001615	1,119523	0,985665	1,113735	0,9698	1,108075	0,954016	1,102543
1,086102	1,177118	1,070791	1,171575	1,055563	1,166155	1,040418	1,160858
1,150894	1,223528	1,136116	1,218158	1,121419	1,212903	1,10576	1,207403
1,208589	1,264678	1,193012	1,258997	1,178435	1,25377	1,16394	1,248659
1,258481	1,300871	1,243894	1,295536	1,228489	1,289995	1,214075	1,284902
1,303727	1,333794	1,289241	1,328478	1,274121	1,32302	1,259807	1,317943
1,344114	1,363368	1,329462	1,357974	1,314896	1,352699	1,300418	1,347546
1,379906	1,390095	1,364985	1,384595	1,350157	1,37922	1,336341	1,374295
1,411526	1,414213	1,396862	1,408834	1,382285	1,403575	1,368046	1,398525
1,472373	1,460036	1,457519	1,454527	1,442765	1,449144	1,429328	1,44432
1,525861	1,500461	1,511232	1,494983	1,496702	1,489628	1,482273	1,484399
1,572833	1,536393	1,558365	1,530937	1,543997	1,525605	1,529727	1,520396
1,615074	1,568992	1,600709	1,563555	1,58644	1,55824	1,572264	1,553045
1,652901	1,598607	1,638555	1,59311	1,623117	1,587279	1,608965	1,582015
1,687798	1,625885	1,672346	1,619928	1,658189	1,614555	1,644135	1,609305
1,719336	1,651035	1,705151	1,645559	1,691071	1,640207	1,677096	1,63498
1,749528	1,674974	1,735402	1,669517	1,721382	1,664184	1,707468	1,658978
1,778148	1,697678	1,764065	1,69223	1,750088	1,686907	1,735065	1,681283
1,805557	1,719339	1,790336	1,713442	1,776396	1,708129	1,762563	1,702941
1,830552	1,739536	1,816525	1,734091	1,80145	1,728331	1,787645	1,723146
1,855189	1,759119	1,840014	1,753215	1,826118	1,747895	1,812329	1,742699
1,877814	1,777481	1,862656	1,771571	1,848777	1,766246	1,835005	1,761045
1,899683	1,795151	1,885233	1,789502	1,870898	1,783984	1,856907	1,778686
1,920312	1,811972	1,905176	1,806043	1,891317	1,800699	1,877566	1,795479
1,939965	1,828131	1,925995	1,822647	1,910984	1,816844	1,897241	1,811616
1,959234	1,843838	1,944105	1,837888	1,930254	1,832522	1,916512	1,82728
1,977502	1,858864	1,963532	1,853352	1,948522	1,847518	1,93478	1,842261
1,995672	1,873583	1,980999	1,867777	1,966678	1,862193	1,952703	1,856827
2,01265	1,887577	1,997974	1,881752	1,983649	1,87615	1,969443	1,870678
2,029092	1,901121	2,014333	1,895245	2,000082	1,889654	1,985948	1,884192
2,044292	1,913945	2,030306	1,908362	2,015282	1,902451	2,00153	1,897122
2,060086	1,926802	2,04493	1,920735	2,031058	1,915262	2,016157	1,90947
2,073918	1,938676	2,059926	1,933061	2,044897	1,927116	2,031141	1,921755
2,088285	1,950584	2,074287	1,944952	2,059252	1,938987	2,045494	1,93361
2,102931	1,962439	2,088535	1,956627	2,073876	1,950794	2,059727	1,945246
2,116808	1,973823	2,101628	1,967681	2,086584	1,961683	2,072818	1,956275
2,129631	1,984632	2,115223	1,978788	2,100554	1,972922	2,086396	1,967344
2,142669	1,99539	2,127866	1,989372	2,113193	1,983493	2,099032	1,977902
2,154838	2,005662	2,139643	1,999476	2,12574	1,993895	2,11081	1,987991
2,166997	2,015808	2,152184	2,009765	2,137886	2,004014	2,123332	1,998246
2,178435	2,025544	2,16323	2,019333	2,149318	2,013731	2,13438	2,007805
2,190392	2,035384	2,175564	2,029314	2,161253	2,02354	2,146686	2,017749
2,201751	2,044876	2,186914	2,038794	2,17221	2,032853	2,15802	2,027206
2,212565	2,054047	2,197333	2,047797	2,183397	2,042161	2,168433	2,0362
2,222884	2,062921	2,208814	2,057141	2,193706	2,051023	2,178737	2,045056
2,233931	2,07201	2,219068	2,065897	2,204722	2,060081	2,190102	2,054239
2,244177	2,080684	2,229297	2,074557	2,214916	2,068716	2,200262	2,062848
2,253644	2,088954	2,239514	2,083124	2,224326	2,076943	2,209266	2,070904
2,264324	2,097641	2,248984	2,091298	2,233773	2,085098	2,219851	2,079502
2,273896	2,105787	2,258925	2,099584	2,244081	2,093518	2,229367	2,087591
2,28319	2,113738	2,268202	2,107518	2,253344	2,101436	2,238619	2,095495
2,292241	2,121514	2,277241	2,115279	2,262373	2,109184	2,247642	2,103232
2,30148	2,129298	2,286074	2,122884	2,271589	2,116937	2,25685	2,110971
2,310143	2,136773	2,295123	2,130511	2,280241	2,124392	2,265499	2,118418

$\varphi=144^\circ$		$\varphi=145^\circ$		$\varphi=146^\circ$		$\varphi=147^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,824206	1,021967	0,807819	1,016424	0,791509	1,011019	0,775276	1,005753
0,938313	1,097141	0,923089	1,092003	0,907542	1,086861	0,892862	1,082105
1,025354	1,155686	1,010372	1,15064	0,995468	1,145721	0,981876	1,141325
1,091226	1,202392	1,07677	1,1975	1,062391	1,192729	1,048088	1,188081
1,149525	1,243668	1,135189	1,238796	1,120932	1,234044	1,106754	1,229415
1,199745	1,279927	1,185497	1,275072	1,172214	1,270631	1,158125	1,266013
1,245575	1,312983	1,231425	1,308144	1,217359	1,303425	1,204072	1,299055
1,286026	1,342515	1,27172	1,337607	1,258247	1,333073	1,244851	1,328652
1,321694	1,369166	1,308046	1,364475	1,294481	1,359898	1,280997	1,355438
1,353891	1,393594	1,340068	1,388867	1,326328	1,384256	1,312915	1,379843
1,414765	1,439182	1,401503	1,434585	1,388324	1,430099	1,375231	1,425725
1,469134	1,479716	1,454897	1,47473	1,441934	1,470273	1,427889	1,465536
1,515555	1,515313	1,502651	1,510766	1,488668	1,505928	1,475936	1,501608
1,558158	1,54795	1,544122	1,542957	1,530161	1,538069	1,517434	1,533686
1,594909	1,576869	1,58211	1,572257	1,568245	1,567345	1,554481	1,56256
1,630184	1,60418	1,616338	1,599182	1,602597	1,594314	1,588963	1,589577
1,663226	1,62988	1,649463	1,62491	1,635805	1,62007	1,622255	1,615362
1,69366	1,653899	1,679958	1,648949	1,666362	1,64413	1,652873	1,639444
1,72131	1,676224	1,70766	1,671294	1,694117	1,666494	1,681797	1,662209
1,748837	1,69788	1,735217	1,692948	1,721704	1,688144	1,708299	1,683472
1,773948	1,718087	1,760357	1,713155	1,746875	1,708353	1,733499	1,70368
1,797512	1,737213	1,783947	1,732281	1,77049	1,727477	1,757141	1,722803
1,821341	1,75597	1,806661	1,750615	1,793223	1,745805	1,779894	1,741124
1,843029	1,773516	1,829263	1,768478	1,815832	1,76365	1,802511	1,758951
1,862793	1,789965	1,849271	1,785007	1,835858	1,780176	1,822555	1,775473
1,883608	1,806513	1,868962	1,801126	1,855558	1,796285	1,842263	1,791572
1,901749	1,82174	1,888236	1,816757	1,874833	1,8119	1,861541	1,807169
1,921149	1,837127	1,906507	1,831705	1,893107	1,826832	1,879818	1,822085
1,938616	1,851503	1,924872	1,846395	1,911466	1,841496	1,897951	1,836646
1,955583	1,865423	1,941838	1,860296	1,928209	1,855299	1,914917	1,850511
1,971933	1,87886	1,958037	1,873659	1,944631	1,868726	1,930972	1,863788
1,98676	1,891488	1,973244	1,886417	1,959843	1,881472	1,946555	1,876653
2,002521	1,904252	1,988999	1,899159	1,975592	1,894192	1,961198	1,888955
2,017501	1,916519	2,002854	1,910987	1,989453	1,906012	1,976168	1,901165
2,03185	1,928357	2,0172	1,922808	2,003798	1,917818	1,990512	1,912955
2,0457	1,93983	2,031796	1,934547	2,018386	1,929535	2,004726	1,924519
2,059169	1,950993	2,044514	1,945413	2,031109	1,940396	2,017821	1,935507
2,072362	1,961898	2,058451	1,956586	2,044665	1,95141	2,031372	1,946506
2,084994	1,972444	2,071082	1,967121	2,057294	1,961934	2,044	1,95702
2,097152	1,982672	2,082489	1,977056	2,069078	1,972007	2,055787	1,967089
2,109287	1,992767	2,095368	1,987424	2,081576	1,982218	2,068277	1,977287
2,120715	2,002469	2,107169	1,997262	2,092629	1,991769	2,079332	1,986837
2,13263	2,012249	2,1187	2,006886	2,104896	2,001662	2,091588	1,996714
2,143956	2,021695	2,130019	2,016322	2,116208	2,011089	2,102515	2,005992
2,154745	2,030833	2,140049	2,025165	2,12659	2,02006	2,113233	2,015079
2,165034	2,039679	2,151432	2,034421	2,136814	2,028862	2,123433	2,023861
2,175977	2,048679	2,161586	2,043102	2,148066	2,037946	2,134287	2,03278
2,18611	2,057265	2,171696	2,051667	2,157783	2,046352	2,144365	2,041311
2,195481	2,065459	2,181811	2,06014	2,167134	2,054522	2,153711	2,049473
2,204898	2,073582	2,191219	2,068251	2,176536	2,062622	2,16311	2,057564
2,215166	2,081956	2,200715	2,076311	2,186776	2,070956	2,172969	2,065741
2,224412	2,089848	2,209956	2,084193	2,196014	2,078828	2,182579	2,073745
2,23343	2,097575	2,219351	2,092058	2,205406	2,086682	2,191596	2,081449
2,24225	2,105151	2,228171	2,099627	2,214227	2,094246	2,200421	2,089008
2,251281	2,112743	2,236821	2,107062	2,22288	2,101675	2,209077	2,096434

$\varphi=148^\circ$		$\varphi=149^\circ$		$\varphi=150^\circ$		$\varphi=151^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,759887	1,000867	0,7438	0,995876	0,728546	0,991256	0,713357	0,986769
0,877857	1,077348	0,863314	1,072841	0,848838	1,068458	0,834427	1,064201
0,967123	1,136653	0,953666	1,132486	0,940272	1,128431	0,925733	1,124136
1,034874	1,183874	1,020715	1,179464	1,007633	1,175483	0,993615	1,171318
1,093532	1,225187	1,079504	1,220799	1,066422	1,2168	1,052541	1,212659
1,144117	1,261519	1,131058	1,25742	1,11807	1,253433	1,105152	1,249559
1,190166	1,294576	1,177031	1,290437	1,163971	1,286413	1,150986	1,282504
1,230796	1,32411	1,21756	1,319927	1,204401	1,315861	1,192046	1,312131
1,267596	1,351094	1,254277	1,34687	1,24104	1,342765	1,228761	1,339044
1,299582	1,375545	1,286571	1,371439	1,273639	1,367447	1,260787	1,36357
1,361043	1,421081	1,348126	1,416943	1,335294	1,412922	1,323702	1,409367
1,415102	1,46131	1,4024	1,457196	1,389782	1,453196	1,377248	1,449312
1,46214	1,497022	1,449579	1,492935	1,4371	1,488961	1,423578	1,484756
1,503631	1,529015	1,491055	1,524838	1,477424	1,5204	1,465013	1,516444
1,54082	1,557904	1,52839	1,553752	1,514933	1,549353	1,502691	1,545442
1,576559	1,585352	1,56313	1,580874	1,549809	1,576533	1,537695	1,572678
1,608811	1,610789	1,595476	1,606352	1,583346	1,602405	1,570218	1,598233
1,639492	1,63489	1,626218	1,630472	1,614145	1,626541	1,601078	1,622386
1,66846	1,657662	1,65523	1,653249	1,642108	1,648972	1,630175	1,645171
1,695001	1,678931	1,681811	1,674523	1,669816	1,670601	1,656833	1,666452
1,720232	1,699139	1,707074	1,694729	1,695107	1,690805	1,682157	1,686653
1,745	1,718633	1,73186	1,714211	1,718829	1,709921	1,705908	1,705765
1,767771	1,736947	1,754651	1,732516	1,741641	1,728218	1,728742	1,724054
1,789519	1,754457	1,776633	1,750089	1,763854	1,745849	1,751396	1,741806
1,809362	1,7709	1,79628	1,766457	1,784385	1,762501	1,771517	1,758312
1,82908	1,786988	1,817092	1,7829	1,804122	1,778565	1,791264	1,774363
1,848361	1,802567	1,835292	1,798095	1,82341	1,794109	1,810557	1,789888
1,86664	1,817466	1,853576	1,812976	1,841699	1,808975	1,828851	1,804736
1,88499	1,832081	1,871922	1,827565	1,859182	1,823252	1,846553	1,819066
1,901739	1,84585	1,888674	1,841319	1,875939	1,83699	1,863315	1,832788
1,917797	1,859113	1,905098	1,854691	1,892149	1,850271	1,879672	1,846101
1,933383	1,871963	1,920326	1,867401	1,907385	1,862971	1,89456	1,858673
1,948031	1,884254	1,934981	1,879682	1,923121	1,875608	1,910295	1,871289
1,963	1,896447	1,949949	1,891859	1,937016	1,887403	1,924201	1,883079
1,977344	1,908222	1,964293	1,90362	1,951361	1,899151	1,938547	1,894815
1,991554	1,919769	1,9785	1,915151	1,965566	1,910666	1,952752	1,906315
2,004652	1,93075	1,991603	1,926124	1,978672	1,921632	1,965862	1,917275
2,017834	1,941601	2,004783	1,936964	1,991851	1,932462	1,979395	1,928215
2,030461	1,952107	2,017409	1,947461	2,004478	1,942952	1,992023	1,938697
2,042615	1,962304	2,029564	1,957652	2,016633	1,953137	2,003824	1,948759
2,055098	1,972489	2,041679	1,967699	2,028746	1,963176	2,016289	1,958912
2,066156	1,982039	2,053101	1,977376	2,040164	1,972849	2,027327	1,968449
2,078034	1,991769	2,064954	1,987086	2,051975	1,98253	2,039101	1,978102
2,089295	2,001158	2,075815	1,99632	2,062808	1,991744	2,049913	1,987298
2,099983	2,010222	2,086841	2,005493	2,072732	2,000517	2,0609	1,996429
2,110164	2,018988	2,097008	2,014245	2,083969	2,009634	2,07105	2,005158
2,12063	2,02775	2,107461	2,02299	2,094413	2,018365	2,081488	2,013875
2,130697	2,036266	2,117522	2,031493	2,10411	2,026729	2,091188	2,022234
2,14041	2,044556	2,127233	2,039774	2,114183	2,035129	2,10126	2,030623
2,149809	2,052639	2,136634	2,047851	2,123588	2,043202	2,110671	2,038692
2,159664	2,060805	2,146122	2,055874	2,133079	2,051218	2,120168	2,046703
2,168903	2,068662	2,155365	2,063726	2,142327	2,059065	2,129421	2,054546
2,177924	2,076362	2,164755	2,071553	2,151359	2,066757	2,13846	2,062235
2,186753	2,083917	2,17359	2,079105	2,16056	2,074434	2,147665	2,069907
2,195782	2,091475	2,182257	2,086525	2,169233	2,081853	2,156346	2,077324

$\varphi=152^\circ$		$\varphi=153^\circ$		$\varphi=154^\circ$		$\varphi=155^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,698232	0,982416	0,68317	0,9782	0,668918	0,974323	0,653974	0,97038
0,820467	1,060183	0,806569	1,056288	0,793114	1,052621	0,779333	1,048975
0,91247	1,120319	0,899269	1,116618	0,886128	1,113034	0,873046	1,10957
0,98087	1,167626	0,967725	1,163915	0,954645	1,160325	0,941948	1,156939
1,039752	1,208939	1,026944	1,205305	1,01421	1,201787	1,002122	1,198539
1,091452	1,245554	1,079529	1,242158	1,066822	1,238633	1,054186	1,235229
1,138075	1,278713	1,125239	1,275041	1,112478	1,27149	1,100458	1,268239
1,17904	1,308298	1,166112	1,304588	1,153975	1,301198	1,141909	1,29792
1,215684	1,335176	1,203554	1,331679	1,190639	1,328055	1,17866	1,324788
1,24825	1,359879	1,235791	1,356302	1,223644	1,352906	1,211573	1,349622
1,311034	1,40557	1,298451	1,401893	1,285954	1,398337	1,274669	1,395213
1,3648	1,445545	1,352436	1,441896	1,340158	1,438367	1,327965	1,43496
1,411234	1,481004	1,398929	1,477347	1,386672	1,473787	1,374467	1,470331
1,451567	1,512254	1,439332	1,508532	1,427184	1,504928	1,415125	1,501443
1,489441	1,541309	1,477392	1,537647	1,465437	1,534108	1,453576	1,530694
1,525672	1,568941	1,512662	1,565003	1,500834	1,561521	1,489099	1,558163
1,558279	1,594532	1,546433	1,590951	1,533615	1,587184	1,521962	1,583858
1,589195	1,618699	1,576337	1,614813	1,564647	1,611375	1,553049	1,608059
1,617261	1,641156	1,605519	1,637599	1,593869	1,63416	1,581266	1,630546
1,645029	1,662769	1,632257	1,658884	1,620645	1,655446	1,609127	1,652126
1,670382	1,682967	1,657643	1,679077	1,646062	1,675633	1,634575	1,672307
1,69416	1,702074	1,68145	1,698179	1,669897	1,69473	1,658438	1,691398
1,717015	1,720354	1,704328	1,716449	1,692797	1,71299	1,68136	1,709648
1,739042	1,737889	1,726793	1,734098	1,714858	1,730498	1,703024	1,727022
1,758761	1,754257	1,747166	1,750659	1,734626	1,746865	1,723231	1,743508
1,778518	1,770294	1,766934	1,766683	1,754406	1,762874	1,743023	1,759503
1,797817	1,785799	1,786239	1,78217	1,773717	1,77834	1,762341	1,77495
1,816117	1,800629	1,803498	1,796657	1,792032	1,793135	1,779634	1,789423
1,834246	1,815075	1,821837	1,811145	1,809956	1,807472	1,797975	1,803861
1,851014	1,828782	1,838822	1,824902	1,82674	1,821149	1,814767	1,817524
1,866953	1,841942	1,8547	1,838028	1,842904	1,834349	1,830871	1,83069
1,882908	1,85485	1,87031	1,850808	1,85783	1,846904	1,846496	1,843446
1,897587	1,867105	1,884999	1,863056	1,873565	1,859465	1,861207	1,855681
1,912558	1,879235	1,899972	1,875171	1,887506	1,871246	1,876185	1,86777
1,925854	1,890614	1,914324	1,886884	1,901862	1,882947	1,889522	1,879151
1,940408	1,902216	1,928179	1,898246	1,916066	1,894409	1,904068	1,890705
1,953173	1,913055	1,941648	1,909308	1,929193	1,905355	1,91686	1,901544
1,966703	1,923981	1,95448	1,92	1,942373	1,916151	1,930383	1,912438
1,979331	1,934458	1,96711	1,930472	1,955005	1,926619	1,943017	1,922903
1,991138	1,944521	1,978574	1,940423	1,967155	1,936788	1,954794	1,93295
2,003589	1,95466	1,991338	1,950651	1,97884	1,946658	1,966792	1,942906
2,014593	1,964179	2,001966	1,960041	1,990488	1,956367	1,978076	1,952489
2,026336	1,973806	2,014033	1,969757	2,001493	1,965728	1,989414	1,961944
2,037485	1,983103	2,024817	1,978923	2,012617	1,974992	2,000532	1,971193
2,048105	1,992099	2,035432	1,987906	2,022882	1,983854	2,010459	1,979944
2,058254	2,000819	2,045581	1,996619	2,033036	1,992561	2,02062	1,988646
2,068689	2,009523	2,056016	2,005313	2,04382	2,001356	2,031748	1,997536
2,078747	2,017997	2,066079	2,013779	2,053888	2,009816	2,041481	2,005884
2,088468	2,026258	2,075807	2,022036	2,063279	2,017959	2,050886	2,014028
2,097887	2,034324	2,085235	2,0301	2,072719	2,026022	2,060338	2,022092
2,107389	2,04233	2,095094	2,038218	2,082582	2,034133	2,070549	2,030303
2,11665	2,05017	2,104364	2,046056	2,091861	2,041969	2,079838	2,038137
2,125697	2,057858	2,113419	2,053742	2,100925	2,049654	2,088912	2,045822
2,134906	2,065524	2,122284	2,061288	2,110145	2,057311	2,097796	2,053368
2,143594	2,07294	2,130981	2,068704	2,11885	2,064727	2,106852	2,060891



$\varphi=156^\circ$		$\varphi=157^\circ$		$\varphi=158^\circ$		$\varphi=159^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,639834	0,966768	0,625746	0,963287	0,612448	0,960114	0,598461	0,956898
0,765991	1,045554	0,753084	1,04235	0,740228	1,039266	0,727424	1,036304
0,860705	1,106399	0,847996	1,103236	0,835669	1,10027	0,823398	1,097421
0,929627	1,153752	0,917052	1,150601	0,904851	1,147647	0,892709	1,14481
0,989527	1,195253	0,977569	1,192231	0,965673	1,189322	0,953275	1,186399
1,041619	1,231946	1,029952	1,228994	1,018346	1,226151	1,006462	1,223335
1,088506	1,2651	1,076622	1,262075	1,064807	1,259164	1,05306	1,256371
1,129914	1,294755	1,11799	1,291707	1,106139	1,288776	1,094359	1,285964
1,166755	1,321635	1,154924	1,318597	1,143167	1,315677	1,132317	1,313071
1,199808	1,346513	1,188119	1,343516	1,176505	1,340632	1,165192	1,337917
1,262339	1,391895	1,251206	1,388989	1,239044	1,385916	1,228065	1,383236
1,316954	1,431971	1,304925	1,428802	1,292981	1,425761	1,282199	1,423108
1,362321	1,466983	1,351335	1,464035	1,339316	1,460904	1,327372	1,457892
1,403159	1,498081	1,391287	1,494845	1,379512	1,491738	1,367834	1,488762
1,440746	1,527113	1,430142	1,524247	1,418571	1,521219	1,407097	1,518323
1,477459	1,554931	1,465913	1,551827	1,454463	1,548853	1,443109	1,546009
1,510402	1,580656	1,498937	1,57758	1,487565	1,574631	1,476289	1,571811
1,541544	1,604864	1,530132	1,601794	1,518814	1,598848	1,507591	1,59603
1,569811	1,627358	1,558449	1,624293	1,547181	1,621352	1,536008	1,618535
1,596667	1,648641	1,585345	1,645572	1,574116	1,642626	1,562983	1,639804
1,62215	1,668814	1,61086	1,665737	1,599664	1,662783	1,588564	1,65995
1,646045	1,687897	1,634784	1,684814	1,623619	1,681851	1,61255	1,67901
1,668992	1,706136	1,657754	1,703041	1,646613	1,700066	1,635569	1,697213
1,691294	1,723672	1,67987	1,720506	1,668546	1,717463	1,657323	1,714546
1,711933	1,740269	1,699718	1,736869	1,688622	1,733878	1,677625	1,731008
1,731736	1,756248	1,719535	1,752832	1,708453	1,749825	1,69747	1,746939
1,750042	1,771384	1,73887	1,768238	1,727797	1,765211	1,715831	1,762046
1,768373	1,786143	1,757211	1,78298	1,745147	1,779665	1,734194	1,776752
1,786308	1,800439	1,774747	1,797143	1,763295	1,793975	1,75215	1,790988
1,803109	1,814087	1,791559	1,810778	1,780118	1,807596	1,768984	1,804597
1,819291	1,827262	1,807482	1,823864	1,796121	1,820692	1,785198	1,817737
1,834247	1,839808	1,823125	1,836598	1,81111	1,833233	1,800204	1,830276
1,849985	1,852335	1,83786	1,848822	1,826854	1,845728	1,814966	1,842493
1,863953	1,864113	1,852848	1,860887	1,840852	1,857507	1,829965	1,854537
1,878318	1,875796	1,866214	1,872274	1,855229	1,869174	1,844348	1,866198
1,892186	1,887136	1,880757	1,8838	1,869439	1,880595	1,858234	1,877523
1,905665	1,898178	1,893571	1,894645	1,882595	1,891536	1,870742	1,888289
1,918511	1,908862	1,90709	1,905521	1,89544	1,902215	1,884215	1,899132
1,931134	1,919319	1,919348	1,915864	1,907994	1,912635	1,896739	1,909533
1,942539	1,929248	1,931401	1,925977	1,919358	1,922544	1,908421	1,919523
1,955189	1,939386	1,943352	1,935893	1,931627	1,932536	1,920347	1,929406
1,965781	1,948752	1,954616	1,945451	1,942555	1,941989	1,931609	1,938945
1,977451	1,958294	1,965943	1,954878	1,954214	1,951498	1,942937	1,948349
1,988566	1,96753	1,976721	1,964004	1,964999	1,960618	1,953733	1,957464
1,999184	1,976486	1,987009	1,972855	1,974968	1,969373	1,964048	1,966314
2,009354	1,985186	1,997192	1,981553	1,986162	1,978354	1,97426	1,97501
2,019803	1,993855	2,007984	1,990314	1,996296	1,986916	1,985066	1,983754
2,029549	2,002203	2,017745	1,998663	2,006404	1,995362	1,994859	1,992106
2,03863	2,010247	2,027517	2,006912	2,015526	2,003421	2,004659	2,000356
2,04911	2,01862	2,036995	2,014977	2,02502	2,011488	2,014167	2,008425
2,058647	2,026614	2,046877	2,02307	2,03524	2,019669	2,024064	2,016507
2,067946	2,034448	2,056187	2,030903	2,044561	2,027503	2,033396	2,02434
2,077031	2,042133	2,065282	2,038588	2,053667	2,035188	2,042513	2,032026
2,085924	2,049679	2,074186	2,046134	2,062581	2,042735	2,051438	2,039574
2,094648	2,057095	2,083253	2,05365	2,071654	2,050248	2,06019	2,046993



$\varphi=160^\circ$		$\varphi=161^\circ$		$\varphi=162^\circ$		$\varphi=163^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,585257	0,953981	0,572099	0,951192	0,559711	0,948679	0,546638	0,946148
0,714672	1,033466	0,702343	1,030832	0,690061	1,02832	0,678198	1,026004
0,811182	1,09469	0,79902	1,09208	0,78723	1,089657	0,775808	1,087415
0,880934	1,142161	0,869216	1,139628	0,857555	1,137213	0,846255	1,134978
0,942063	1,183853	0,930348	1,181296	0,919246	1,178975	0,907648	1,176659
0,994823	1,220666	0,983254	1,218108	0,971756	1,215665	0,960959	1,213465
1,041383	1,253697	1,029775	1,251143	1,018876	1,248845	1,00804	1,246658
1,08334	1,283428	1,071703	1,280853	1,060819	1,278544	1,050001	1,276348
1,120705	1,310381	1,109168	1,307815	1,098524	1,305543	1,087946	1,303381
1,153955	1,335315	1,143014	1,332876	1,132146	1,330548	1,121353	1,328335
1,21716	1,380666	1,206329	1,378208	1,195573	1,375864	1,184892	1,373634
1,271488	1,420565	1,259789	1,417895	1,249229	1,415585	1,238742	1,41339
1,315507	1,455003	1,304794	1,452489	1,293093	1,449848	1,282536	1,447564
1,356255	1,485921	1,345818	1,483458	1,334434	1,480881	1,324177	1,478662
1,395723	1,515563	1,384448	1,51294	1,374285	1,510676	1,363203	1,508321
1,431852	1,543298	1,420692	1,540721	1,410631	1,538496	1,399658	1,53618
1,465108	1,569121	1,455026	1,566789	1,444029	1,564351	1,433129	1,562047
1,496463	1,593338	1,485431	1,590776	1,474495	1,588345	1,464638	1,586249
1,52493	1,615845	1,513948	1,613282	1,504048	1,611064	1,493251	1,608749
1,551946	1,637106	1,541005	1,634535	1,531143	1,632309	1,520388	1,629983
1,577561	1,657242	1,566654	1,654659	1,555845	1,652203	1,545135	1,649875
1,601578	1,676292	1,590703	1,673699	1,579927	1,671232	1,56925	1,668893
1,624622	1,694483	1,613774	1,691876	1,603024	1,689395	1,592375	1,687041
1,6464	1,711804	1,635576	1,709186	1,624851	1,706693	1,61442	1,704368
1,666727	1,728261	1,655928	1,725636	1,64523	1,723137	1,634634	1,720764
1,686587	1,744175	1,675803	1,741533	1,665122	1,739016	1,654542	1,736625
1,704967	1,759272	1,694204	1,756621	1,683544	1,754095	1,672987	1,751694
1,723342	1,773961	1,712592	1,771293	1,701945	1,76875	1,691402	1,766333
1,74111	1,788128	1,730372	1,785444	1,719544	1,782839	1,709016	1,780408
1,757958	1,801725	1,747038	1,798981	1,736419	1,796412	1,725906	1,793971
1,774053	1,814821	1,763019	1,812037	1,752416	1,809463	1,74192	1,807016
1,789402	1,827443	1,778706	1,824735	1,768116	1,822154	1,756686	1,819485
1,804179	1,839658	1,793498	1,836949	1,782923	1,834367	1,772457	1,831915
1,819184	1,851693	1,807545	1,848735	1,796988	1,846158	1,786539	1,843712
1,8326	1,863096	1,821943	1,860386	1,811394	1,857806	1,800954	1,855357
1,847141	1,874586	1,836163	1,871786	1,825296	1,869123	1,814838	1,866666
1,85998	1,885443	1,849305	1,882719	1,83872	1,880119	1,82728	1,877427
1,873085	1,896177	1,862055	1,893352	1,851127	1,89066	1,840621	1,888177
1,885585	1,90656	1,874535	1,903719	1,863594	1,901012	1,852763	1,898441
1,897585	1,916626	1,885881	1,913609	1,875264	1,910976	1,864755	1,908472
1,909178	1,926409	1,898123	1,923546	1,887184	1,920819	1,876364	1,918231
1,919791	1,935767	1,909074	1,932988	1,89847	1,930339	1,887032	1,927598
1,931452	1,945248	1,920417	1,942374	1,909504	1,939639	1,89903	1,937119
1,94226	1,954359	1,931239	1,951483	1,920342	1,948746	1,909886	1,946225
1,952268	1,963124	1,941591	1,960335	1,931032	1,957679	1,920593	1,955157
1,963473	1,972081	1,951839	1,969034	1,941299	1,96638	1,93088	1,963861
1,973637	1,980643	1,962662	1,977762	1,951816	1,975023	1,941098	1,972426
1,983772	1,989085	1,972812	1,986203	1,961981	1,983463	1,951279	1,980867
1,992939	1,997161	1,982322	1,994372	1,971826	1,991716	1,960516	1,988974
2,002463	2,005233	1,991862	2,002446	1,981382	1,999794	1,970089	1,997055
2,012693	2,013397	2,001776	2,010519	1,990989	2,007784	1,980332	2,005193
2,022036	2,021231	2,011131	2,018353	2,000356	2,015619	1,989711	2,013029
2,031165	2,028917	2,020271	2,026041	2,009507	2,023308	1,998873	2,020718
2,0401	2,036467	2,029217	2,033591	2,018463	2,030859	2,00784	2,028271
2,049184	2,043972	2,038306	2,041094	2,027244	2,03828	2,01694	2,035767

$\varphi=164^\circ$		$\varphi=165^\circ$		$\varphi=166^\circ$		$\varphi=167^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,53433	0,943883	0,52206	0,941742	0,509827	0,939729	0,498347	0,937954
0,666379	1,023806	0,65498	1,021794	0,643267	1,019843	0,632333	1,01813
0,764121	1,08523	0,753113	1,083277	0,741839	1,081387	0,730927	1,079667
0,83501	1,132859	0,824121	1,130911	0,812985	1,129029	0,802503	1,127363
0,896658	1,174571	0,885722	1,1726	0,875384	1,170838	0,864556	1,169103
0,949595	1,211254	0,938926	1,209281	0,928318	1,207423	0,917771	1,205684
0,997268	1,244585	0,986559	1,242628	0,975915	1,240788	0,965335	1,239069
1,03925	1,274266	1,028567	1,272301	1,017952	1,270455	1,007405	1,26873
1,076629	1,301177	1,06619	1,299247	1,055819	1,297433	1,045517	1,295737
1,110851	1,326278	1,100423	1,324333	1,090282	1,322541	1,080213	1,32086
1,174287	1,371522	1,16376	1,36953	1,153309	1,367659	1,14397	1,366081
1,228103	1,411266	1,217514	1,409253	1,207616	1,407466	1,197174	1,405684
1,272058	1,445396	1,261663	1,443345	1,250326	1,441227	1,240112	1,439432
1,312994	1,47636	1,302922	1,474395	1,292939	1,472554	1,283047	1,47084
1,353218	1,506304	1,343317	1,504406	1,332526	1,50246	1,322806	1,500819
1,389769	1,534196	1,378987	1,532148	1,369272	1,530411	1,359642	1,528792
1,423305	1,560072	1,412593	1,55803	1,402941	1,556294	1,393372	1,554675
1,453888	1,584072	1,444201	1,58221	1,43364	1,580291	1,424126	1,578668
1,482552	1,606566	1,472912	1,604696	1,462403	1,602769	1,452937	1,601136
1,509731	1,627787	1,50013	1,625906	1,489665	1,623964	1,480238	1,622315
1,535484	1,647871	1,524964	1,645791	1,515489	1,644016	1,505163	1,642192
1,55963	1,666877	1,549146	1,664785	1,538762	1,662825	1,529412	1,661159
1,581826	1,684816	1,571379	1,68272	1,561971	1,680928	1,55172	1,679085
1,604086	1,702167	1,593851	1,700091	1,583902	1,698176	1,573866	1,696351
1,624139	1,718518	1,613748	1,716402	1,604391	1,714592	1,5942	1,712727
1,644065	1,734362	1,633693	1,732227	1,623425	1,730223	1,614183	1,728517
1,662533	1,749422	1,653121	1,747467	1,642869	1,745443	1,632724	1,743551
1,680964	1,764044	1,670632	1,761884	1,660407	1,759856	1,651205	1,758127
1,698782	1,778147	1,688465	1,775972	1,678439	1,773965	1,668519	1,772087
1,715499	1,791659	1,7052	1,789477	1,695194	1,787464	1,685294	1,785581
1,731531	1,8047	1,72125	1,802515	1,711386	1,800523	1,701322	1,798603
1,746321	1,817175	1,736993	1,81519	1,726838	1,813136	1,716794	1,811217
1,762099	1,829595	1,751851	1,827408	1,741714	1,825357	1,731689	1,823443
1,7762	1,841399	1,765971	1,83922	1,755854	1,837178	1,745842	1,835273
1,790623	1,853042	1,780386	1,850858	1,770241	1,848807	1,760191	1,84689
1,804471	1,864338	1,794199	1,86214	1,784025	1,860074	1,773953	1,858142
1,816895	1,875093	1,806612	1,872891	1,796431	1,870822	1,786358	1,868887
1,829905	1,885753	1,81961	1,883535	1,809425	1,88145	1,799351	1,879501
1,84236	1,896078	1,832067	1,893847	1,821579	1,89169	1,811819	1,889792
1,854357	1,9061	1,843143	1,903665	1,832985	1,901574	1,822944	1,899621
1,865978	1,915853	1,855399	1,913544	1,845251	1,911441	1,835222	1,909477
1,876669	1,925225	1,866424	1,922988	1,8563	1,920889	1,846297	1,918928
1,888363	1,934663	1,878131	1,932417	1,868021	1,930309	1,857733	1,928283
1,899238	1,943768	1,889027	1,941522	1,878938	1,939415	1,868974	1,937448
1,909343	1,95256	1,899159	1,950323	1,889099	1,948225	1,879164	1,946268
1,920583	1,961478	1,909491	1,959035	1,899453	1,956941	1,88954	1,954988
1,930819	1,970045	1,920359	1,967736	1,910333	1,965636	1,900433	1,963678
1,940707	1,978416	1,930572	1,976178	1,920563	1,974079	1,91068	1,972121
1,950277	1,986603	1,940163	1,984371	1,930174	1,982279	1,920311	1,980328
1,959866	1,994687	1,949768	1,992459	1,939796	1,99037	1,929949	1,988423
1,970114	2,002818	1,959717	2,000515	1,949752	1,998422	1,939914	1,996471
1,979198	2,010584	1,96912	2,008352	1,959167	2,00626	1,949044	2,004252
1,988371	2,018275	1,978304	2,016044	1,968361	2,013953	1,958249	2,011946
1,997654	2,025898	1,98729	2,023598	1,977357	2,021508	1,967255	2,019501
2,006453	2,033321	1,996098	2,031021	1,986174	2,028931	1,976376	2,026983

$\varphi=168^\circ$		$\varphi=169^\circ$		$\varphi=170^\circ$		$\varphi=171^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,486899	0,936297	0,475483	0,93476	0,464098	0,933348	0,452744	0,932061
0,621442	1,016533	0,610592	1,015054	0,599782	1,013696	0,58937	1,012501
0,720064	1,078066	0,709558	1,076627	0,699099	1,075305	0,688993	1,074137
0,791774	1,125766	0,781397	1,124332	0,771366	1,123051	0,761093	1,121851
0,854321	1,167569	0,843603	1,166079	0,834006	1,164848	0,823929	1,163664
0,907287	1,204066	0,897475	1,202657	0,887111	1,201285	0,877415	1,200113
0,955438	1,237562	0,944986	1,236082	0,93521	1,234805	0,925492	1,233641
0,997582	1,267224	0,98782	1,265829	0,977476	1,264465	0,967844	1,263303
1,036068	1,294277	1,025899	1,292812	1,015801	1,29147	1,006542	1,290344
1,070217	1,319293	1,060503	1,317871	1,050862	1,316562	1,041499	1,315393
1,133668	1,364447	1,123445	1,362941	1,114312	1,361697	1,104242	1,36044
1,187419	1,40412	1,177736	1,402668	1,167529	1,401252	1,158	1,400041
1,229989	1,437763	1,220957	1,436371	1,211013	1,434949	1,201166	1,433661
1,273247	1,469253	1,263541	1,467797	1,253928	1,466473	1,244411	1,465283
1,313174	1,499304	1,30363	1,497915	1,294175	1,496654	1,284809	1,495523
1,350096	1,527295	1,340635	1,52592	1,330328	1,524551	1,321973	1,523544
1,382943	1,553031	1,373551	1,551661	1,364244	1,550412	1,355023	1,549285
1,414696	1,57716	1,40442	1,575637	1,395168	1,574376	1,386003	1,573236
1,443555	1,599616	1,433332	1,598078	1,424129	1,596802	1,415012	1,595645
1,469967	1,620633	1,46072	1,619223	1,451558	1,617929	1,441581	1,616641
1,495865	1,640651	1,485737	1,639087	1,47662	1,637786	1,467592	1,636601
1,519226	1,659455	1,510057	1,658025	1,500073	1,656583	1,491089	1,655395
1,542493	1,677526	1,532443	1,675941	1,5234	1,67462	1,513556	1,673301
1,564297	1,694716	1,554641	1,693175	1,545265	1,691787	1,535987	1,690524
1,584114	1,710997	1,575039	1,709541	1,565159	1,708071	1,556273	1,706856
1,604119	1,726767	1,595063	1,725295	1,585207	1,723807	1,576342	1,722574
1,622687	1,741793	1,613657	1,740314	1,60383	1,738818	1,594993	1,737579
1,641186	1,756354	1,631279	1,754718	1,622368	1,753351	1,612675	1,751982
1,658886	1,770371	1,649356	1,768782	1,63993	1,767322	1,63061	1,765994
1,6755	1,783829	1,665993	1,782239	1,656592	1,780779	1,647296	1,779452
1,69167	1,796872	1,682124	1,795272	1,672686	1,793805	1,663355	1,792474
1,706862	1,809437	1,697044	1,807797	1,688218	1,80643	1,678621	1,805066
1,721777	1,821669	1,711979	1,820037	1,70316	1,818677	1,693552	1,817319
1,73682	1,833661	1,726988	1,83202	1,717256	1,83052	1,707627	1,829164
1,75024	1,84511	1,740392	1,843469	1,73153	1,842098	1,721887	1,840727
1,763985	1,856347	1,754422	1,854739	1,74467	1,85322	1,735321	1,851882
1,776395	1,867091	1,766544	1,865433	1,757688	1,864048	1,74806	1,862662
1,78969	1,877743	1,779842	1,876067	1,770406	1,874578	1,760794	1,873184
1,80187	1,887971	1,79204	1,886291	1,782624	1,884798	1,773324	1,883441
1,813024	1,897808	1,804111	1,896282	1,794425	1,89474	1,784864	1,893344
1,825316	1,907653	1,815828	1,90602	1,806167	1,904477	1,796921	1,90312
1,836419	1,917108	1,826665	1,915431	1,817039	1,913898	1,808399	1,912631
1,848172	1,926513	1,838436	1,924829	1,828828	1,92329	1,819635	1,921937
1,859136	1,935622	1,849424	1,933941	1,839841	1,932404	1,830672	1,931054
1,869355	1,944453	1,859674	1,942782	1,850121	1,941256	1,84155	1,939997
1,879755	1,953178	1,870097	1,951512	1,861429	1,950124	1,852019	1,948737
1,89066	1,961862	1,881015	1,960191	1,871785	1,958709	1,862396	1,957326
1,900923	1,970306	1,891295	1,968636	1,881796	1,967111	1,872709	1,965773
1,910575	1,97852	1,900967	1,976856	1,891488	1,975338	1,88214	1,973968
1,920229	1,986618	1,910638	1,984958	1,901175	1,983444	1,891842	1,982076
1,930202	1,994662	1,920619	1,992997	1,911164	1,991478	1,901838	1,990106
1,939348	2,002448	1,929779	2,000789	1,920623	1,999318	1,911308	1,997946
1,948563	2,010142	1,939005	2,008483	1,929858	2,007013	1,920553	2,005641
1,957579	2,017699	1,948317	2,016088	1,938891	2,01457	1,929595	2,013198
1,966703	2,025176	1,957158	2,023513	1,947741	2,021995	1,938452	2,020623

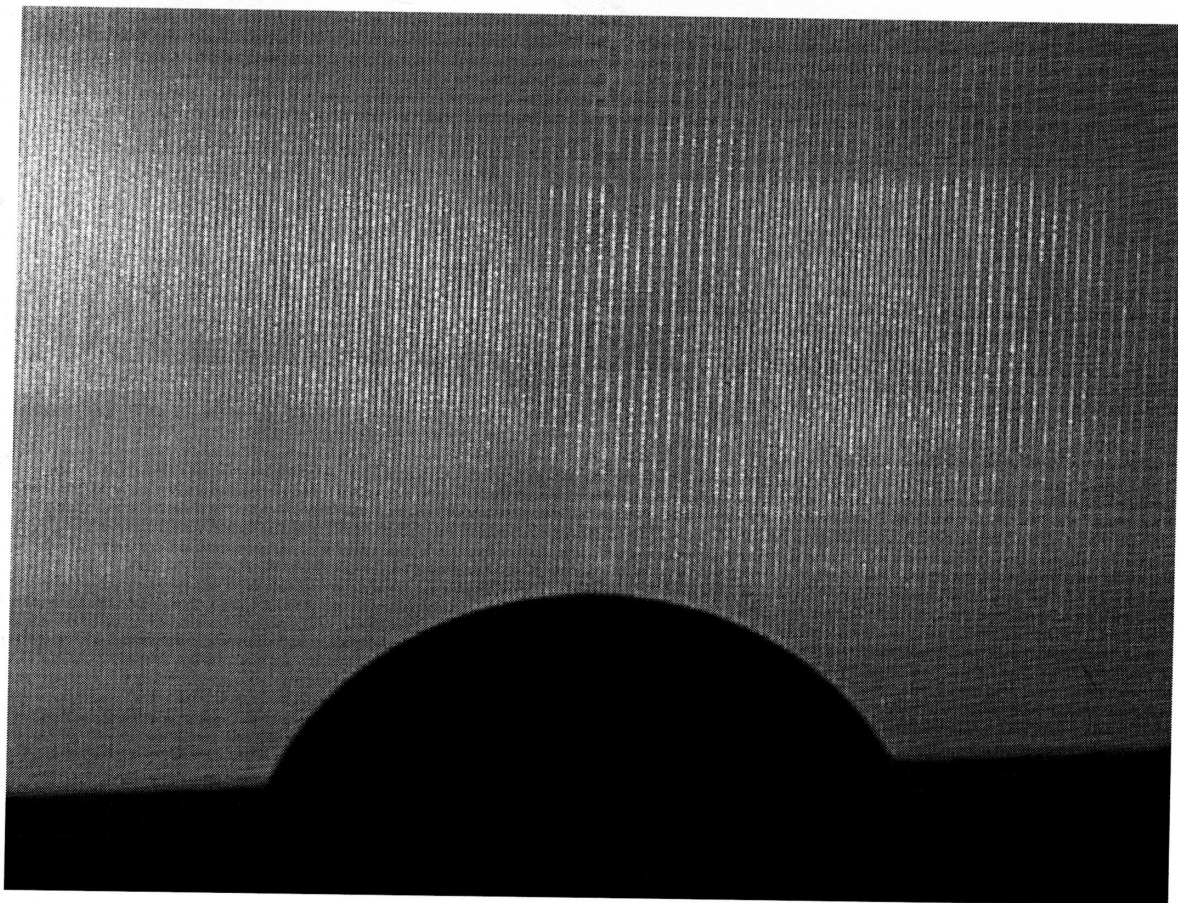
$\varphi=172^\circ$		$\varphi=173^\circ$		$\varphi=174^\circ$		$\varphi=175^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,442422	0,931003	0,431924	0,930044	0,42169	0,929226	0,411719	0,928544
0,578995	1,011425	0,569011	1,010502	0,559062	1,009695	0,549502	1,00903
0,678934	1,073085	0,668921	1,072151	0,659258	1,071362	0,649642	1,070689
0,751166	1,120804	0,741581	1,119901	0,732046	1,119113	0,722562	1,118442
0,813905	1,162603	0,804481	1,161712	0,795068	1,160934	0,785727	1,160273
0,867774	1,199059	0,858191	1,198128	0,848666	1,197321	0,8392	1,196642
0,915825	1,232581	0,906208	1,231625	0,896645	1,230778	0,887731	1,230089
0,958277	1,262259	0,948774	1,261333	0,939964	1,260579	0,93059	1,25989
0,996581	1,289248	0,98745	1,288352	0,978615	1,287589	0,969289	1,286893
1,032001	1,314314	1,022985	1,313393	1,013836	1,312567	1,00496	1,311874
1,095248	1,359426	1,086321	1,358523	1,077462	1,357734	1,067697	1,356993
1,148547	1,39895	1,139757	1,398039	1,130459	1,39719	1,121242	1,396469
1,19142	1,432511	1,182735	1,431594	1,173185	1,430741	1,16468	1,430039
1,23499	1,46423	1,226595	1,463401	1,21736	1,462632	1,208225	1,461966
1,275534	1,494524	1,266351	1,493657	1,258165	1,492993	1,249157	1,492385
1,312778	1,522545	1,303581	1,521675	1,294639	1,520935	1,285708	1,520327
1,345889	1,548282	1,335843	1,547405	1,327886	1,546654	1,319901	1,546087
1,376924	1,572216	1,367933	1,57132	1,359031	1,570548	1,35022	1,569902
1,405983	1,594607	1,397043	1,593691	1,388191	1,592897	1,379431	1,592228
1,432604	1,615595	1,423716	1,614669	1,414918	1,613865	1,406211	1,613183
1,457763	1,635434	1,448923	1,634498	1,440173	1,633684	1,431515	1,632992
1,482194	1,654324	1,473391	1,653372	1,464678	1,65254	1,456059	1,65183
1,504701	1,672224	1,495938	1,671266	1,487267	1,670427	1,47869	1,669711
1,526806	1,689387	1,517899	1,688396	1,509089	1,687529	1,500376	1,68679
1,547478	1,705758	1,537911	1,704686	1,529312	1,703837	1,520808	1,703111
1,566698	1,721354	1,558029	1,720369	1,549455	1,719504	1,540134	1,718693
1,58538	1,736352	1,57674	1,735361	1,568196	1,734492	1,55891	1,733676
1,603961	1,750861	1,594486	1,749766	1,585974	1,748898	1,57756	1,748153
1,621396	1,7648	1,612462	1,763759	1,603633	1,762851	1,595076	1,762091
1,638281	1,778281	1,6292	1,777222	1,620397	1,776318	1,611702	1,775549
1,654135	1,791279	1,645308	1,790255	1,636587	1,789364	1,627972	1,788609
1,66914	1,803849	1,660609	1,802873	1,651323	1,801945	1,642973	1,801236
1,684044	1,816108	1,675491	1,815136	1,666185	1,81421	1,657823	1,8135
1,698966	1,828057	1,689544	1,826979	1,681077	1,826129	1,671874	1,825339
1,712355	1,839501	1,70379	1,838514	1,694481	1,83757	1,686123	1,836843
1,726082	1,850681	1,716955	1,849619	1,708222	1,848723	1,699323	1,847937
1,738551	1,861422	1,730014	1,860422	1,720742	1,859465	1,712424	1,858726
1,751591	1,871972	1,742506	1,870898	1,733819	1,869992	1,724972	1,869198
1,763858	1,882186	1,7548	1,88111	1,746141	1,880203	1,737325	1,879408
1,775432	1,892095	1,766969	1,891088	1,757784	1,890125	1,74955	1,889382
1,787796	1,901902	1,778793	1,900825	1,769914	1,89989	1,761161	1,899098
1,799018	1,91138	1,78977	1,910278	1,781477	1,909408	1,772483	1,908597
1,810564	1,920724	1,801617	1,919652	1,792795	1,918724	1,7841	1,917939
1,821626	1,929844	1,812705	1,928776	1,803909	1,927851	1,795239	1,927069
1,832247	1,938754	1,823076	1,937661	1,814039	1,936721	1,80594	1,935999
1,84274	1,9475	1,833593	1,946413	1,825394	1,945557	1,816503	1,944762
1,853416	1,956127	1,84456	1,95507	1,83583	1,954156	1,827225	1,953386
1,863466	1,96454	1,85463	1,963487	1,845919	1,962578	1,837334	1,961813
1,872922	1,972746	1,864656	1,971765	1,85569	1,970832	1,846859	1,970052
1,883471	1,980963	1,874388	1,97988	1,865438	1,97895	1,856621	1,978173
1,89292	1,988918	1,884125	1,98787	1,875454	1,986966	1,866908	1,986203
1,902399	1,996757	1,893614	1,995709	1,884684	1,994777	1,876151	1,994019
1,911654	2,004453	1,902605	2,003374	1,893956	2,002472	1,885432	2,001713
1,920704	2,01201	1,911663	2,01093	1,903022	2,010028	1,894506	2,009269
1,929568	2,019434	1,920535	2,018354	1,911901	2,017451	1,903391	2,01669

$\varphi=176^\circ$		$\varphi=177^\circ$		$\varphi=178^\circ$		$\varphi=179^\circ$	
d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z	d/z	S/z*z
0,402005	0,927993	0,392317	0,927559	0,382886	0,927253	0,373708	0,92707
0,539974	1,00848	0,530481	1,008048	0,521374	1,007746	0,512301	1,00756
0,640371	1,070153	0,631146	1,069732	0,621968	1,069429	0,613132	1,069252
0,713416	1,117906	0,704319	1,117486	0,695273	1,117183	0,68656	1,117005
0,77644	1,159731	0,767208	1,15931	0,758541	1,159025	0,749926	1,158854
0,830381	1,196123	0,821614	1,195721	0,812903	1,195439	0,804248	1,195279
0,878282	1,229469	0,869481	1,229001	0,860157	1,228626	0,851479	1,228395
0,921901	1,25936	0,912656	1,258917	0,904074	1,258613	0,895532	1,258415
0,960539	1,286343	0,95134	1,28588	0,942715	1,285558	0,934154	1,285351
0,996355	1,311307	0,987621	1,310844	0,979156	1,310508	0,970957	1,310292
1,058982	1,356451	1,051002	1,356058	1,042448	1,355744	1,033965	1,355548
1,112677	1,395913	1,104187	1,395474	1,095214	1,395137	1,086883	1,394948
1,155333	1,429433	1,147014	1,429015	1,138787	1,42872	1,130651	1,428551
1,200089	1,461508	1,192035	1,461169	1,183184	1,460933	1,175307	1,460849
1,241131	1,491956	1,232303	1,491613	1,22444	1,491425	1,215795	1,491352
1,277748	1,519893	1,268991	1,51954	1,26119	1,519339	1,252612	1,519247
1,311116	1,545581	1,302422	1,545207	1,294677	1,544984	1,286162	1,544864
1,341499	1,569384	1,33373	1,569027	1,325186	1,568756	1,316736	1,568617
1,370762	1,591684	1,362186	1,591269	1,353704	1,590982	1,346152	1,590836
1,397597	1,612627	1,389076	1,612197	1,380651	1,611896	1,37315	1,611735
1,422951	1,632424	1,414481	1,631982	1,406106	1,631667	1,398652	1,631495
1,446686	1,651192	1,439103	1,650782	1,430769	1,650449	1,422532	1,650243
1,470207	1,669118	1,46182	1,66865	1,45353	1,668309	1,445338	1,668096
1,491763	1,686178	1,483416	1,685705	1,475167	1,685358	1,467017	1,68514
1,5124	1,702507	1,50409	1,702028	1,495878	1,701676	1,487765	1,701452
1,531762	1,718086	1,523489	1,717604	1,515315	1,71725	1,507242	1,717024
1,55057	1,733066	1,54233	1,732581	1,534191	1,732225	1,526153	1,731999
1,568418	1,747479	1,560213	1,746999	1,552109	1,746649	1,544109	1,74643
1,586459	1,761451	1,578114	1,760958	1,569875	1,760601	1,561903	1,760384
1,60328	1,77493	1,594963	1,774445	1,586754	1,774097	1,578645	1,773892
1,619453	1,787993	1,611027	1,78752	1,6027	1,78719	1,594472	1,787005
1,634713	1,800655	1,625734	1,800167	1,617672	1,799863	1,609708	1,799692
1,649554	1,812918	1,640571	1,812426	1,632509	1,812116	1,62455	1,811939
1,663611	1,824753	1,654639	1,824257	1,64659	1,823942	1,638647	1,82376
1,677046	1,836189	1,668904	1,835729	1,660071	1,835373	1,652155	1,835187
1,690816	1,847314	1,682422	1,846828	1,674145	1,84648	1,665986	1,846272
1,703398	1,858059	1,695306	1,857588	1,686533	1,857221	1,678676	1,857025
1,71652	1,868567	1,707919	1,868059	1,699708	1,867709	1,691618	1,867499
1,728904	1,878776	1,720336	1,878268	1,712158	1,877918	1,704103	1,877709
1,740621	1,888713	1,732622	1,88824	1,723954	1,887871	1,716195	1,887675
1,752803	1,898471	1,744302	1,897968	1,73619	1,897624	1,728201	1,897421
1,764425	1,907995	1,755691	1,907482	1,747872	1,907155	1,739404	1,906947
1,775798	1,917318	1,767356	1,916823	1,759301	1,916485	1,75137	1,916289
1,786698	1,926434	1,778546	1,92596	1,770516	1,925626	1,762609	1,925433
1,797161	1,935354	1,789298	1,934904	1,780781	1,934561	1,77316	1,934387
1,807747	1,944122	1,799906	1,943677	1,792179	1,943362	1,783812	1,94317
1,818748	1,952761	1,810658	1,952297	1,802434	1,951965	1,794591	1,951786
1,829138	1,961211	1,820804	1,960734	1,812853	1,960414	1,804773	1,960232
1,838947	1,969477	1,830373	1,968994	1,822697	1,968692	1,814385	1,968512
1,848722	1,9776	1,840163	1,97712	1,832499	1,976819	1,824201	1,976641
1,858488	1,985586	1,850195	1,985116	1,842283	1,984802	1,834243	1,984625
1,868005	1,993423	1,859721	1,992952	1,851564	1,992628	1,843784	1,992457
1,877033	2,001099	1,869017	2,000644	1,860868	2,000319	1,853095	2,000145
1,886114	2,008653	1,878105	2,008197	1,869963	2,00787	1,862197	2,007695
1,895006	2,016074	1,887003	2,015615	1,878867	2,015287	1,870858	2,015107

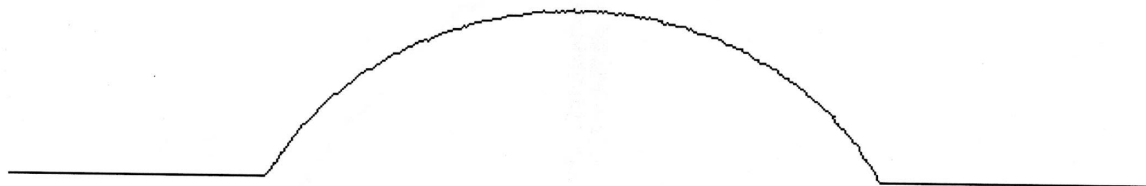
$\varphi=180^\circ$	
d/z	S/z*z
0,364784	0,927004
0,503265	1,007494
0,604634	1,069191
0,677898	1,116942
0,741364	1,158798
0,79565	1,195243
0,842865	1,228286
0,887035	1,258327
0,925659	1,285263
0,962633	1,310189
1,025553	1,355472
1,078631	1,394883
1,122609	1,428509
1,167515	1,460888
1,208099	1,491412
1,244974	1,519284
1,278579	1,544873
1,309214	1,568606
1,337853	1,5908
1,364908	1,611682
1,390463	1,631428
1,414395	1,650169
1,437247	1,668014
1,459128	1,685052
1,479754	1,701358
1,499271	1,71693
1,518219	1,731905
1,536212	1,746344
1,553879	1,760302
1,570632	1,773834
1,586609	1,786967
1,601846	1,799655
1,616695	1,811895
1,630812	1,82371
1,644349	1,835134
1,657946	1,846206
1,670933	1,856962
1,683651	1,867432
1,696172	1,877642
1,708552	1,887613
1,720337	1,897361
1,731828	1,906899
1,743562	1,916237
1,754826	1,925384
1,765654	1,934348
1,776326	1,943135
1,786872	1,95175
1,79707	1,9602
1,806948	1,968488
1,816777	1,976619
1,826577	1,984597
1,836126	1,992427
1,845199	2,000115
1,854307	2,007662
1,863222	2,015075

## Додаток Ж

## Профілі крапель на підкладці

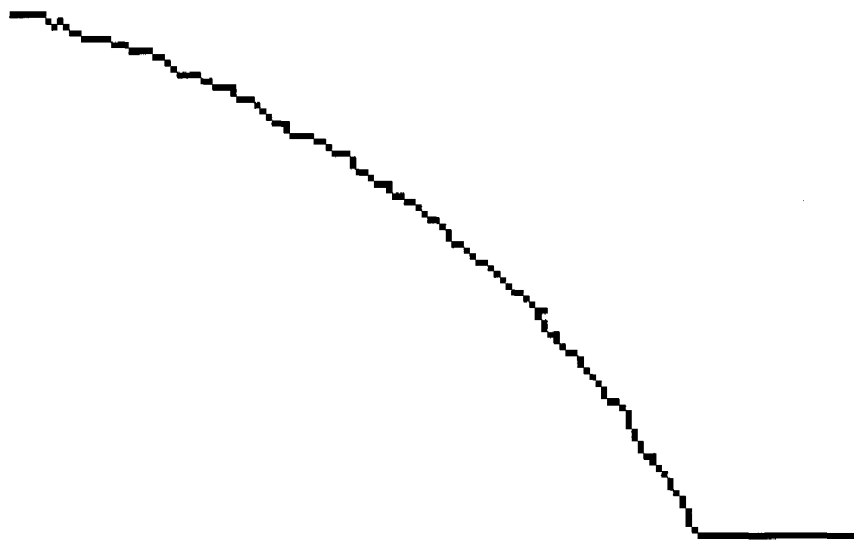


**Рисунок Ж.1** — Профіль краплі, що змочує поверхню

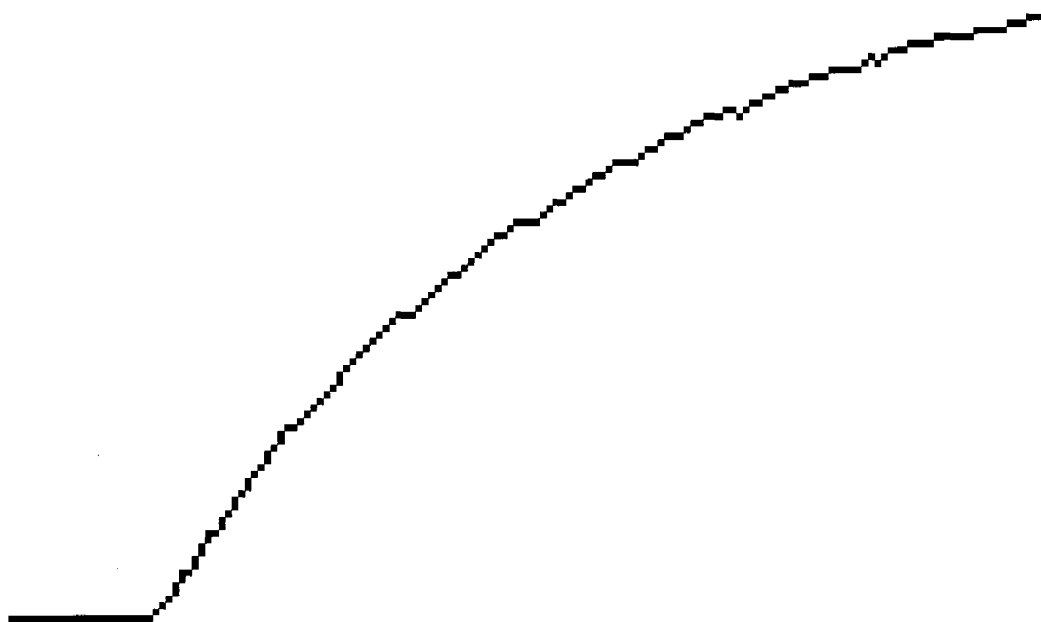


**Рисунок Ж.2** — Контур краплі з рисунку Б.1

## Продовження додатку Ж



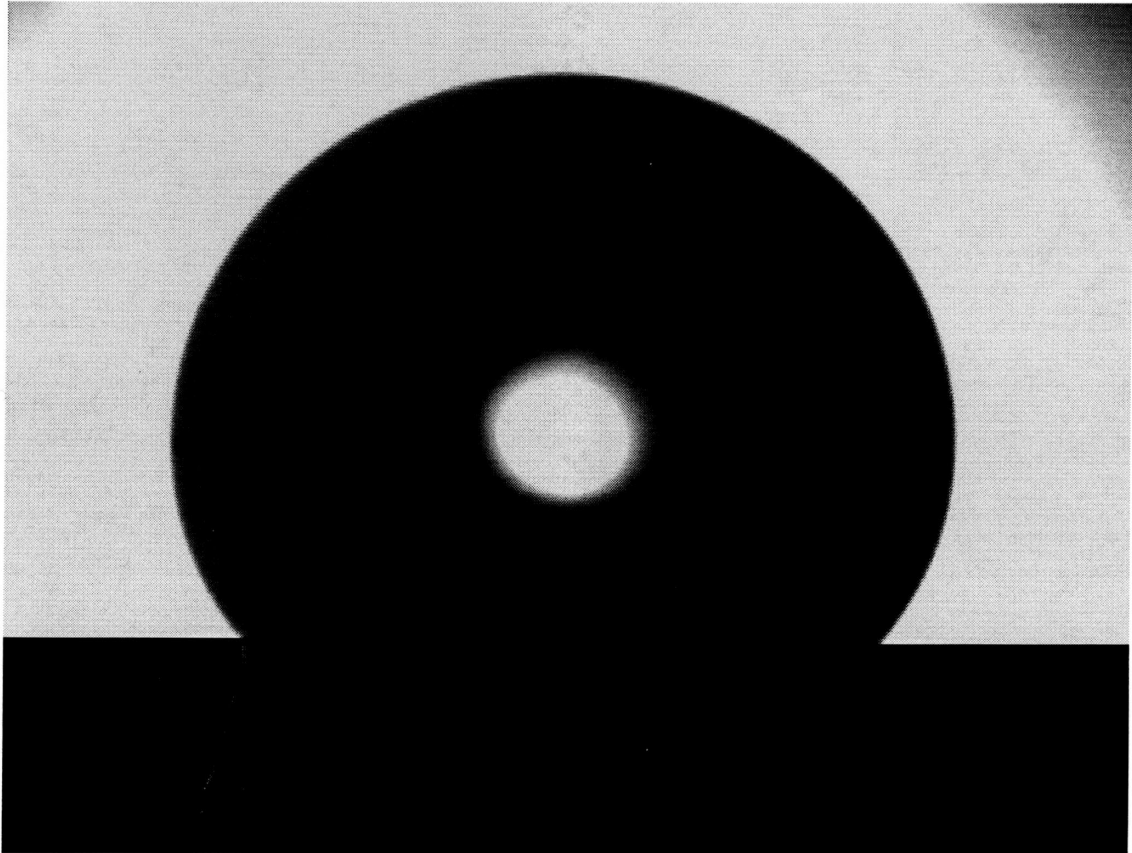
**Рисунок Ж.3** — Контур краплі з рисунку Б.2 в околі точки контакту трьох фаз



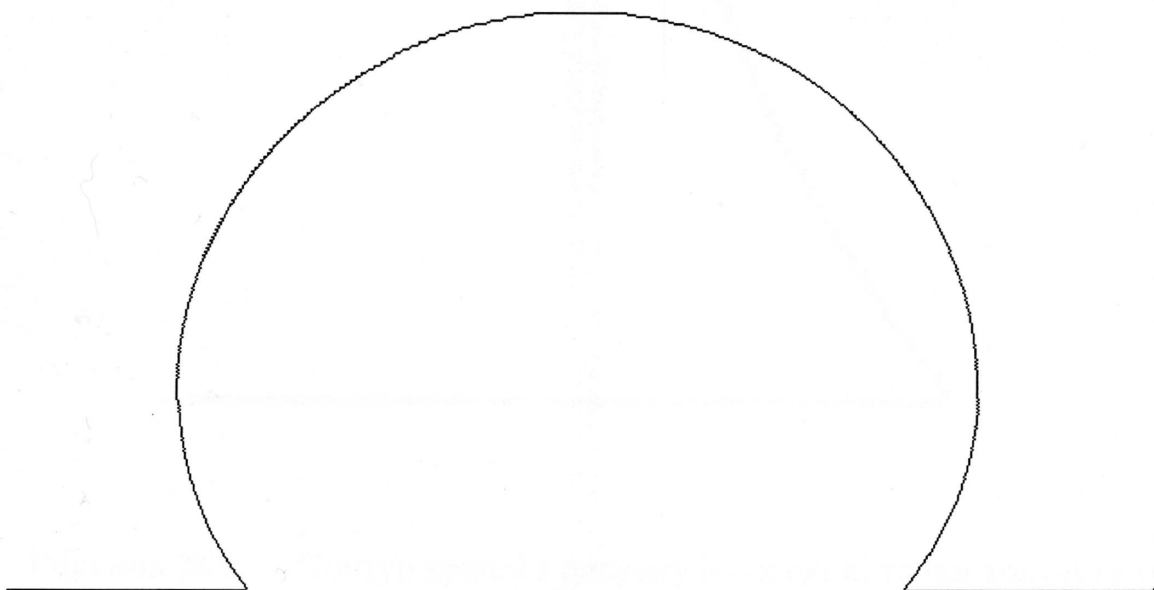
**Рисунок Ж.4** — Контур краплі з рисунку Б.2 в околі точки контакту трьох фаз



Продовження додатку Ж

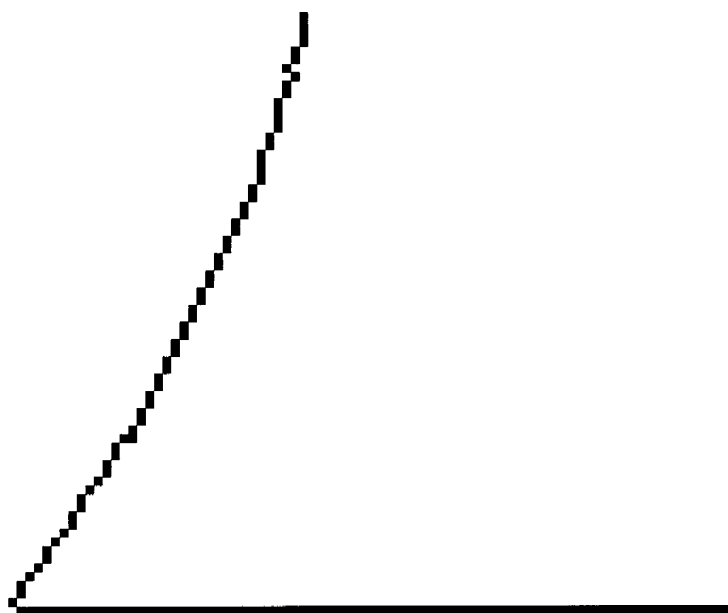


**Рисунок Ж.5** — Профіль краплі, що не змочує поверхню

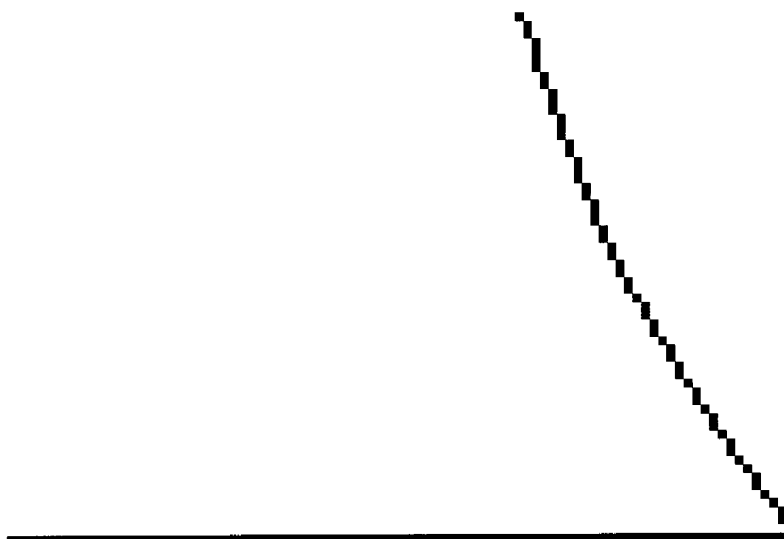


**Рисунок Ж.6** — Контур краплі з рисунку Б.5

## Продовження додатку Ж



**Рисунок Ж.7** — Контур краплі з рисунку Б.6 в околі точки контакту трьох фаз



**Рисунок Ж.8** — Контур краплі з рисунку Б.6 в околі точки контакту трьох фаз

## Додаток К

## Результати обробки зображення

**Таблиця К.1** — Результат виділення контуру (рис Б.8) краплі, що не змочує поверхню

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	134	358	21	120	338	41	110	318
2	133	357	22	120	337	42	109	317
3	133	356	23	119	336	43	109	316
4	132	355	24	118	335	44	109	315
5	131	354	25	118	334	45	108	314
6	130	353	26	117	333	46	108	313
7	130	352	27	117	332	47	107	312
8	129	351	28	116	331	48	107	311
9	128	350	29	115	330	51	106	308
10	127	349	30	115	329	52	106	307
11	127	348	31	114	328	53	105	306
12	126	347	32	114	327	54	105	305
13	125	346	33	113	326	55	104	304
14	125	345	34	113	325	56	104	303
15	124	344	35	112	324	57	104	302
16	123	343	36	112	323	58	104	301
17	123	342	37	111	322			
18	122	341	38	111	321			
19	121	340	39	111	320			
20	121	339	40	110	319			

## Продовження додатку К

**Таблиця К.2** — Результат виділення контуру (рис Б.7) краплі, що не змочує поверхню

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	500	358	22	515	337	43	525	316
2	501	357	23	515	336	44	526	315
3	501	356	24	516	335	45	526	314
4	502	355	25	516	334	46	527	313
5	503	354	26	517	333	47	527	312
6	504	353	27	517	332	48	528	311
7	504	352	28	518	331	49	528	310
8	505	351	29	518	330	50	529	309
9	506	350	30	519	329	51	529	308
10	507	349	31	519	328	52	529	307
11	507	348	32	520	327	53	529	306
12	508	347	33	520	326	54	530	305
13	509	345	34	521	325	55	530	304
14	509	345	35	521	324	56	531	303
15	510	344	36	522	323	57	531	302
16	511	343	37	522	322	58	531	301
17	511	342	38	523	321	59	531	300
18	512	341	39	523	320	60	532	299
19	512	340	40	524	319	61	532	298
20	513	339	41	524	318	62	533	297
21	514	338	42	525	317	63	532	296

**Таблиця К.3** — Результат обробки таблиці К.1

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	134	358	11	124	344	21	114	327,5
2	133	356,5	12	123	342,5	22	113	325,5
3	132	355	13	122	341	23	112	323
4	131	354	14	121	339,5	24	111	321
5	130	352,5	15	120	337,5	25	110	318,5
6	129	351	16	119	336	26	109	316
7	128	350	17	118	334,5	27	108	313,5
8	127	348,5	18	117	332,5	28	107	310
9	126	347	19	116	331	29	106	308
10	125	345,5	20	115	329,5	30	105	305,5
						31	104	302,5

## Продовження додатку К

Таблиця К.4 — Результат обробки таблиці К.2

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	500	358	12	512	340,5	23	523	320,5
2	501	356,5	13	513	339	24	524	318,5
3	502	355	14	514	338	25	525	316,5
4	503	354	15	515	336,5	26	526	314,5
5	504	352,5	16	516	334,5	27	527	312,5
6	505	351	17	517	332,5	28	528	310,5
7	506	350	18	518	330,5	29	529	307,5
8	507	348,5	19	519	328,5	30	530	304,5
9	508	346,5	20	520	326,5	31	531	301,5
10	510	344	21	521	324,5	32	532	297,5
11	511	342,5	22	522	322,5			

Таблиця К.5 — Результат виділення контуру (рис Ж.4) краплі, що змочує поверхню

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	145	407	18	157	390	35	171	374
2	146	406	19	158	289	36	172	373
3	147	405	20	159	388	37	173	372
4	148	404	21	159	387	38	173	371
5	148	403	22	160	386	39	174	370
6	149	402	23	161	385	40	175	369
7	150	401	24	162	384	41	176	368
8	151	400	25	162	383	42	177	367
9	151	399	26	163	382	43	178	366
10	152	398	27	164	381	44	179	365
11	152	397	28	164	380	45	180	364
12	153	396	29	165	379	46	181	363
13	154	395	30	166	379	47	182	362
14	155	394	31	167	378	48	183	362
15	155	393	32	168	377	49	184	362
16	156	392	33	169	376	50	185	361
17	157	391	34	170	375	51	186	360

## Продовження додатку К

**Таблиця К.6** — Результат виділення контуру (рис Ж.3) краплі, що змочує поверхню

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	486	407	19	475	389	37	461	373
2	485	406	20	475	388	38	460	372
3	485	405	21	474	387	39	460	371
4	485	404	22	473	386	40	459	370
5	484	403	23	472	386	41	458	369
6	484	402	24	471	385	42	457	368
7	483	401	25	471	384	43	456	368
8	482	400	26	470	383	44	455	367
9	482	399	27	469	382	45	454	366
10	481	398	28	468	381	46	453	365
11	480	397	29	467	380	47	452	364
12	479	396	30	467	379	48	451	363
13	478	395	31	466	378	49	450	363
14	477	394	32	465	378	50	449	362
15	477	393	33	464	377	51	448	361
16	476	392	34	463	376	52	447	360
17	476	391	35	462	375	53	446	360
18	475	390	36	461	374	54	445	359

**Таблиця К.7** — Результат обробки таблиці К.5

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	145	407	15	160	386	29	173	371,5
2	146	406	16	155	393,5	30	174	370
3	147	405	17	161	385	31	175	369
4	148	403,5	18	162	383,5	32	176	368
5	149	402	19	163	382	33	177	367
6	150	401	20	164	380,5	34	178	366
7	151	399,5	21	165	379,3	35	179	365
8	152	397,5	22	166	378,6	36	180	364
9	153	396	23	167	378	37	181	363
10	154	395	24	168	377	38	182	362,5
11	155	393,5	25	169	376	39	183	362
12	156	392	26	170	375	40	184	361,5
13	157	390,5	27	171	374	41	185	361
14	158	389	28	172	373	42	186	360

## Продовження додатку К

Таблиця К.8 — Результат обробки таблиці К.6

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	486	407	15	472	385,6	29	457	368,3
2	485	405	16	471	384,5	30	456	367,6
3	484	402,5	17	470	383	31	455	367
4	483	401	18	469	382	32	454	366
5	482	399,5	19	468	381	33	453	365
6	481	398	20	467	379,5	34	452	364
7	480	397	21	466	378,3	35	451	363,3
8	479	396	22	465	377,6	36	450	362,6
9	478	395	23	464	377	37	449	362
10	477	393,5	24	463	376	38	448	361
11	476	391,5	25	462	375	39	447	360,3
12	475	389	26	461	373,5	40	446	359,6
13	474	387	27	459	370	41	445	359
14	473	386,3	28	458	369			

## Додаток Л

Вихідні дані для розрахунку крайового кута змочування

Таблиця Л.1 — Результат обробки таблиці К.3

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	30	55,5	11	20	41,5	21	10	25
2	29	54	12	19	40	22	9	23
3	28	52,5	13	18	38,5	23	8	20,5
4	27	51,5	14	17	37	24	7	18,5
5	26	50	15	16	35	25	6	16
6	25	48,5	16	15	33,5	26	5	13,5
7	24	47,5	17	14	32	27	4	11
8	23	46	18	13	30	28	3	7,5
9	22	44,5	19	12	28,5	29	2	5,5
10	21	43	20	11	27	30	1	3
						31	0	0

Таблиця Л.2 — Результат обробки таблиці К.4

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	0	0	11	12	-17,5	21	23	-37,5
2	1	-1,5	12	13	-19	22	24	-39,5
3	2	-3	13	14	-20	23	25	-41,5
4	3	-4	14	15	-21,5	24	26	-43,5
5	4	-5,5	15	16	-23,5	25	27	-45,5
6	5	-7	16	17	-25,5	26	28	-47,5
7	6	-8	17	18	-27,5	27	29	-50,5
8	7	-9,5	18	19	-29,5	28	30	-53,5
9	8	-11,5	19	20	-31,5	29	31	-56,5
10	10	-14	20	21	-33,5	30	32	-60,5
11	11	-15,5	21	22	-35,5			



## Продовження додатку Л

Таблиця Л.3 — Результат обробки таблиці К.7

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	0	0	15	15	-21	29	28	-35,5
2	1	-1	16	10	-13,5	30	29	-37
3	2	-2	17	16	-22	31	30	-38
4	3	-3,5	18	17	-23,5	32	31	-39
5	4	-5	19	18	-25	33	32	-40
6	5	-6	20	19	-26,5	34	33	-41
7	6	-7,5	21	20	-27,7	35	34	-42
8	7	-9,5	22	21	-28,4	36	35	-43
9	8	-11	23	22	-29	37	36	-44
10	9	-12	24	23	-30	38	37	-44,5
11	10	-13,5	25	24	-31	39	38	-45
12	11	-15	26	25	-32	40	39	-45,5
13	12	-16,5	27	26	-33	41	40	-46
14	13	-18	28	27	-34	42	41	-47

Таблиця Л.4 — Результат обробки таблиці К.8

№	X	Y	№	X	Y	№	X	Y
1	41	48	15	27	26,6	29	12	9,3
2	40	46	16	26	25,5	30	11	8,6
3	39	43,5	17	25	24	31	10	8
4	38	42	18	24	23	32	9	7
5	37	40,5	19	23	22	33	8	6
6	36	39	20	22	20,5	34	7	5
7	35	38	21	21	19,3	35	6	4,3
8	34	37	22	20	18,6	36	5	3,6
9	33	36	23	19	18	37	4	3
10	32	34,5	24	18	17	38	3	2
11	31	32,5	25	17	16	39	2	1,3
12	30	30	26	16	14,5	40	1	0,6
13	29	28	27	14	11	41	0	0
14	28	27,3	28	13	10			

## Додаток М

Таблиця М.1. — Результати обробки зображень

Параметр	Рисунок Ж.1	Рисунок Ж.2
Рівняння контуру краплі справа	$y = -0,677 + 1,641 \cdot x + 0,013 \cdot x^2 + 2,454 \cdot 10^{-5} \cdot x^3$	$y = 0,016 - 1,387 \cdot x + 2,225 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 5,244 \cdot 10^{-4} \cdot x^3$
Рівняння контуру краплі зліва	$y = 0,759 - 1,499 \cdot x + 3,766 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 1,053 \cdot 10^{-4} \cdot x^3$	$y = 7,525 \cdot 10^{-3} + 1,419 \cdot x + 0,011 \cdot x^2 + 8,43 \cdot 10^{-4} \cdot x^3$
Рівняння для визначення ККЗ справа	$\Theta_c = \left  \arctg(1,641 + 0,013 \cdot x + 2,454 \cdot 10^{-5} \cdot x^2) \right $	$\Theta_c = 180 + \arctg(-1,387 + 2,225 \cdot 10^{-3} \cdot x - 5,244 \cdot 10^{-4} \cdot x^2)$
Рівняння для визначення ККЗ зліва	$\Theta_z = \left  \arctg(-1,499 + 3,766 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,053 \cdot 10^{-4} \cdot x^2) \right $	$\Theta_z = 180 - \arctg(1,419 + 0,011 \cdot x + 8,43 \cdot 10^{-4} \cdot x^2)$
$\Theta_c$	58,65	125,79
$\Theta_z$	56,28	125,18
$\Theta$	57,47	125,48



**АКТ**  
**впровадження приладів ВКЗ-1 і ВЗПТ-1 для контролю**  
**змочуваності гірських порід**

Ми, що нижче підписалися, представники науково-дослідного інституту нафтогазових технологій ІФНТУНГ: науковий керівник госпдоговірної теми № 8/2000 "Розробка методики підбору компонентів розчинів поверхнево-активних речовин для проведення обробок привибійних зон пластів газових і газоконденсатних свердловин" проф. Кісіль І. С. та відповідальний виконавець Боднар Р. Т. склали даний акт про те, що наукові дослідження при виконанні вищевказаної теми проводилися з використанням розроблених пристроїв ВКЗ-1 та ВЗПТ-1, які є частиною дисертаційної роботи Боднара Р. Т.

Застосування і впровадження запропонованих методів і пристроїв дозволило оптимізувати компонентний склад розчинів поверхнево-активних речовин, для обробки привибійних зон пластів газових і газоконденсатних свердловин.

Видані рекомендації щодо подальшої експлуатації розроблених методів і приладів ВКЗ-1 і ВЗПТ-1, які в свою чергу дають можливість підвищити дебіти нафти і газу конкретних експлуатаційних свердловин.

Керівник г/т № 8/2000  
д.т.н., професор  
Відповідальний виконавець  
г/т № 8/2000

Two handwritten signatures are present. The top signature is in dark ink and appears to be "І. С. Кісіль". The bottom signature is in lighter ink and appears to be "Р. Т. Боднар".

Кісіль І. С.

Боднар Р. Т.