

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 532.612.3

### МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ЯКІСНОГО І КІЛЬКІСНОГО КОНТРОЛЮ СКЛАДУ СЕРЕДОВИЩА ТА РЕЧОВИН ПО ЗМІНІ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ

© Малько О. Г., Дранчук М. М., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Розглянуті фізико-хімічні параметри структур поверхні розділу фаз на предмет обґрунтування методології вимірювання, контролю та діагностики якісного та кількісного складу доквілля, речовин та виробів за динамічними характеристиками міжфазного натягу поверхні при їх контакті з рідинними менісками. В основу методу покладено вплив на динаміку міжфазного натягу (від моменту утворення поверхні розділу фаз до стану рівноваги) фізичних і хімічних властивостей контактуючих фаз.*

Багато задач вимірювання, контролю та діагностики можуть бути вирішені на основі капілярних методів. У їх основі лежить вплив на міжфазний натяг фізичних і хімічних властивостей контактуючих фаз у процесі адсорбції (хемосорбції) складових цих фаз. Тобто чутливим елементом є поверхня розділу фаз рідинного меніска. В першу чергу це стосується визначення концентрації шкідливих включень у повітряному і водному середовищах, якісного та кількісного складу природного газу, контролю технологічних процесів, де використовуються поверхнево-активні речовини, аналізу стану поверхні твердих тіл, якості покриттів тощо.

В основу більшості методів визначення динамічних характеристик міжфазного натягу покладено вимірювання фізичних, або обумовлених ними геометричних параметрів рідинних менісків. Спектр таких методів досить широкий [1, 2] і багато з них дозволяють реалізувати процес вимірювання в автоматичному режимі у реальному масштабі часу. Це в першу чергу обумовлено можливістю застосування новітніх мікропроцесорних засобів і програмних продуктів у вимірювальних системах.

Перевагою капілярних методів є:

- можливість оперативного контролю у реальному масштабі часу;
- можливість розміщення первинних перетворювачів безпосередньо у зоні контролю;
- універсальність конструкції первинних перетворювачів щодо компонентів, що підлягають дослідженню (під конкретні компоненти підбираються тільки програмне забезпечення обробки результатів

вимірювання та індикаторна рідина);

- оновлення чутливого елемента – поверхні розділу фаз при кожному вимірюванні;

- можливість створення єдиної автоматизованої системи контролю доквілля з розподіленими у просторі точками вимірювання.

Для реалізації запропонованої методології необхідно вирішити три основні проблеми:

- обґрунтувати та визначити відображення властивостей, що підлягають контролю (як правило - це концентрація і якісний склад різних включень у рідинному, газовому середовищах та на твердих поверхнях), у динамічні характеристики міжфазного натягу;

- так як прямі методи виміру міжфазного натягу практично реалізувати неможливо, необхідно визначитись у оптимальній методології вимірювань міжфазного натягу;

- розробити відповідне програмне забезпечення та апаратну реалізацію.

Термодинамічні аспекти взаємозв'язку міжфазного натягу з фізико-хімічними властивостями контактуючих фаз досить детально описані раніше у роботі [3] і тому це питання у даній публікації не розглядається.

Важливим фактором, що обумовлюють взаємозв'язок міжфазного натягу з фізико-хімічними властивостями контактуючих фаз, є структура поверхні розділу фаз.

#### 1. Структура поверхні розділу фаз рідина-газ

Поверхневу енергію можна розглядати як роботу по переносу молекули із об'єму рідини на по-

верхню. Ця робота пов'язана з тим, що в середині фази результуюча сила, яка діє на молекулу, дорівнює нулю, тоді як при наближенні молекули до поверхні ця сила направлена до середини фази. Якщо розглядати взаємодію молекули тільки з ближніми сусідами, то її молярна енергія визначається виразом [1]

$$E = (N_A \varepsilon / 2)(n_i - n_j), \quad (1)$$

де  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул/моль – число Авагадро;  $\varepsilon$  – енергія взаємодії;  $n_i, n_j$  кількість сусідніх молекул в об'ємі і на поверхні рідини. Виходячи з цього енергія випаровування повинна бути рівною  $\varepsilon n_i / 2$ . Якщо відома залежність потенційної енергії від температури, то можна також знайти поверхневу вільну енергію. Товщина поверхневого шару (області незбалансованих сил) в основному залежить від радіуса дії міжмолекулярних сил. При відсутності на поверхні рідини іонів взаємодія молекул в основному обумовлена вандерваальсовими силами. Сили цього типу зменшуються пропорційно сьомій степені відстані між молекулами і тому має значення тільки взаємодія з одним – двома шарами сусідніх молекул, тому товщина поверхневого шару має такий самий порядок.

Поверхневий шар перебуває у стані рівноваги із своїм паром, тобто існує двостороннє збалансоване перенесення молекул з газової фази на поверхню і навпаки (конденсація і випаровування). Виходячи з кінетичної теорії газів, кількість молекул  $Z$ , які взаємодіють з одиницею площі поверхні за одиницю часу, дорівнює

$$Z = P(2\pi MRT)^{-1/2}, \quad (2)$$

де  $P$  – тиск парів,  $M$  – молярна маса,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – температура. Так для парів насичених відносно води при кімнатній температурі  $Z$  приблизно дорівнює 200 (моль/м<sup>2</sup>)/с, або біля  $1,2 \cdot 10^{26}$  (молекул/м<sup>2</sup>)/с. Таким чином, на площу в  $10 \text{ \AA}^2$ , яка відповідає площі однієї молекули води, за одну секунду попадає  $1,2 \cdot 10^7$  молекул. Звідси, середня тривалість перебування молекули на поверхні повинна бути порядку  $10^{-10}$  с.

З іншого боку, між поверхневим шаром і суміжними шарами також відбувається перенесення молекул. При кімнатній температурі коефіцієнт дифузії більшої рідин дорівнює приблизно  $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Коефіцієнт дифузії  $D$  пов'язаний з часом  $t$  і сумарним зміщенням  $x$  рівнянням Ейнштейна

$$D = x^2 / 2t. \quad (3)$$

Якщо  $x$  прийняти рівним  $100 \text{ \AA}$ , то відповідно  $t$  складе біля  $10^6$  с. Таким чином, за рахунок броунівського руху здійснюється досить швидкий взаємний обмін молекул між поверхнею і сусідніми шарами рідини.

З наведеного вище можна зробити висновки, що у напрямку ортогональному поверхні розділу,

область зміни міжмолекулярної взаємодії має відстань в декілька молекулярних діаметрів, а зовні цієї області проявляються властивості об'ємної фази. Однак є припущення, що на поверхні розділу існують і далекодіючі сили, які розповсюджуються на  $10 \dots 100$  молекулярних діаметрів, хоча експериментальні докази існування таких сил ще недавно викликали дискусії [2]. "Спокійна" поверхня рідини на молекулярному рівні фактично знаходиться у збуреному стані, при якому молекули постійно рухаються між поверхнею і газовою або рідинною фазами. Середня густина поверхневого шару неперервним чином змінюється від густини рідини до густини парової фази. При загальному аналізі типів взаємодії на поверхні розділу фаз, у першому наближенні, достатньо врахувати тільки сили Лондонна (Лондонна – Ван-Дер-Ваальса), ефекти відштовхування, а також електростатичні сили, які виникають при взаємодії між іонами і постійними диполями.

Поверхневий натяг на границі розділу рідини – газ  $\gamma^{LV}$  – пряма міра міжмолекулярних сил ( $L$  – рідина,  $V$  – газ). Якщо діють тільки дисперсні сили, то  $\gamma^{LV} = {}^d\gamma^L$  ( ${}^d\gamma^L$  – дисперсна складова сили). Однак поведінка багатьох рідин не відповідає цьому випадку, так для води ( $W$ ) додатково діють деякі типи міжмолекулярних сил, які також вносять вклад у величину поверхневого натягу  $\gamma^{WV}$ . Фоукс [2] запропонував співвідношення

$$\gamma^{WV} = {}^d\gamma^L + {}^h\gamma^W, \quad (4)$$

де  ${}^h\gamma^W$  – складова, яка обумовлена водневими зв'язками та взаємодією диполів. Для ртуті ( $M$ ) додаткова складова обумовлена металевими зв'язками ( $m$ ), тобто

$$\gamma^{MV} = {}^d\gamma^M + {}^m\gamma^W. \quad (5)$$

Одним з напрямків якісного і кількісного діагностування поверхнево-активних речовин (ПАР) є їх селекція по типу поверхневих адсорбційних плівок, які вони утворюють.

Мономолекулярний шар ПАР на поверхні рідини може формуватись як шляхом адсорбції ПАР з об'ємної фази, так і шляхом нанесення ПАР безпосередньо на поверхню з подальшим розтіканням. При невеликих концентраціях поверхневі плівки ПАР ведуть себе у двомірному просторі аналогічно молекулам газу. В загальному, в залежності від оточуючих умов і виду ПАР, утворюються поверхневі плівки, які за властивостями подібні речовинам трьох агрегатних станів: газ, рідина, тверде тіло.

Можливість довільного утворення плівок на поверхні розділу фаз визначається співвідношенням між роботою адгезії плівки до поверхні і роботою когезії речовини плівки. При відсутності взаємного насичення фаз (об'ємної, плівки) мономолекулярний шар може утворитися лише в тому випадку, якщо робота адгезії є більшою від роботи когезії речови-

ни, що розтікається (коефіцієнт розтікання додатний). Якщо існує взаємне насичення фаз, то розтікання може не відбутися і плівка збереться в лінзу. В цьому випадку поверхневий натяг водної фази буде відповідати моношару насиченого розчину у воді. Якщо поверхнева концентрація мала і молекули ПАР слабо взаємодіють між собою в поверхневому шарі (великий коефіцієнт розтікання), то молекули ПАР рухаються по поверхні практично незалежно одна від одної. Така поведінка нагадує поведінку газу, а плівку називають газоподібною. Її можна описати рівнянням стану ідеального двомірного газу [1]

$$\pi S = RT, \quad (6)$$

де  $\pi = \gamma_0 - \gamma$  – двомірний поверхневий тиск,  $\gamma_0$  – поверхневий натяг розчинника,  $\gamma$  – поверхневий натяг розчину,  $S = 1/A$  – величина обернена величині адсорбції.

При збільшенні концентрації ПАР на поверхні і збільшенні роботи когезії (зменшення коефіцієнта розтікання), що може бути викликане збільшенням довжини вуглецевого радикала (зростання енергії дисперсійної взаємодії), створюються умови для конденсації плівки. У поверхневому шарі утворюються острівці моношару, які за рахунок теплового руху переміщуються по поверхні значно повільніше, ніж окремі молекули. Внаслідок цього поверхневий натяг розчину буде більшим, ніж при тій же концентрації ПАР в умовах газової плівки. Стан таких плівок описується рівнянням

$$(\pi + \alpha / S^2) \cdot (S - B) = RT, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – стала, яка враховує взаємодію молекул ПАР на поверхні;  $B = 1/A_\infty$  величина обернена ємності адсорбційного моношару. Плівки, які утворені при суцільному заповненні поверхні, називають конденсованими.

Тверді плівки по своїй структурі подібні до структури твердого тіла. Якщо такі плівки течуть, то дуже повільно. Їх отримують методом розтікання відносно рідко. Це пов'язано з тим, що тверді плівки утворюють речовини, які характеризуються великою роботою когезії, яка часто перевищує роботу адгезії до рідини і тому не реалізується умова розтікання.

З підвищенням температури конденсовані плівки здатні переходити в газоподібні. Причиною цього є зростання кінетичної енергії молекул і, відповідно, зменшення когезійної взаємодії.

Так як динаміка зміни типу плівки визначається типом ПАР, то активний вплив на поверхневу концентрацію шляхом зміни параметрів поверхні дає можливість здійснювати якісну діагностику ПАР.

## 2. Структура поверхні розділу фаз рідина-рідина

Поверхня розділу двох рідин, що не змішуються, наприклад, води (W) і олії (O), утворена контактними моношарами двох рідин, а міжфазний натяг є сумою двох окремих поверхневих натягів. Окремо кожна з рідин має свій власний поверхневий натяг. При контакті молекули у моношарі води одночасно піддаються впливу молекул води і масла, в результаті цього поверхневий натяг зменшується. Взаємодія між цими компонентами визначається дисперсійними силами, а середнє геометричне значення їх вкладу у величину поверхневого натягу  $(d\gamma^O d\gamma^W)^{1/2}$  точно описує відповідні сили взаємодії. Поверхневий натяг у шарі масла зменшується на таку ж величину, тому

$$\gamma^{OV} = \gamma^{OV} + \gamma^{WV} - 2(d\gamma^O d\gamma^W)^{1/2}, \quad (8)$$

де  $\gamma^{OV}$  і  $\gamma^{WV}$  – величини поверхневих натягів олії і води відповідно.

У загальному випадку для любых двох рідин, що не змішуються, оціночна величина  $d\gamma^1 (d\gamma^2)$ , де індекси 1 і 2 відповідають контактним рідинам, може бути отримана шляхом додавання парних потенціалів для всіх елементів на поверхні з усіма елементами у об'ємі, що дає

$$d\gamma^1 = \frac{\pi N_1^2 \delta_1^2 I_1}{8r_{11}^2}, \quad (9)$$

де  $\alpha_1$  – поляризованість,  $I_1$  – потенціал іонізації,  $N_1$  – кількість молекул в одиниці об'єму,  $r_{11}$  – міжмолекулярна відстань для рідин типу 1. Для води величина складової дисперсних сил у поверхневому натязі становить 25,4 мН/м. При взаємодії між різнорідними фазами з розміром елементів, який забезпечує наявність 12 сусідніх елементів на поверхні, енергія взаємодії об'ємних елементів з поверхневою фазою 1 визначаються так:

$$d\gamma^{1,2} = \frac{\pi N_1 N_2 \alpha_1 \alpha_2 I_1}{4r_{12}^2} \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2}. \quad (10)$$

Використовуючи середнє геометричне співвідношення, можна отримати, що

$$d\gamma^{1,2} = (d\gamma^{1,2} d\gamma^2)^{1/2} = \frac{\pi N_1 N_2 \alpha_1 \alpha_2 I_1}{8r_{12}^2} \frac{I_1 I_2}{\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (11)$$

Порівняння двох останніх рівнянь показує, що, виключаючи випадки, коли різниця значень  $r_{11}$  і  $r_{22}$ , а також  $I_1$  і  $I_2$  досить велика, середнє геометричне значення дає задовільні значення міжмолекулярних сил на міжфазній границі. Фоукс [6] розрахував середнє значення  $d\gamma^W = 21,8 \pm 0,7$  мН/м, використовуючи експериментальні дані  $\gamma^{1V}$ ,  $\gamma^{2V}$  і  $\gamma^{12}$  для восьми різних насичених вуглеводів на межі з водою. Аналогічно для ртуті з використанням даних для десяти рідких вуглеводів отримано значення  $d\gamma^M = 200 \pm 7$  мН/м. Для міжфазної взаємодії ртуть-вода рівняння (8) дає зна-

чення  $\gamma^{1,2} = 424,8 \pm 4,4$  мН/м, що відповідає експериментальним значенням 426...427 мН/м. Очевидно, що взаємодія між такими рідинами майже повністю обумовлена дисперсійними силами.

Таким чином, поділ поверхневого натягу на компоненти, запропоноване Фоуксом, є адекватним реальній ситуації. Він виділив у крайньому випадку сім складових взаємодій: дисперсійні сили, водневі зв'язки, взаємодію диполь-диполь, диполь-індукований диполь,  $\pi$ -зв'язки, донорно-акцепторні зв'язки, електричну взаємодію. Причому взаємодія між двома рідинами майже завжди визначається дисперсійними силами. Однак слід відмітити, що складові можуть бути взаємопов'язані і згідно Гуду [2], взаємний вплив дисперсійної складової  $^d\gamma$  і диполь-дипольної складової  $^p\gamma$  не може бути дуже малим у випадках, коли у крайньому випадку один з дипольних моментів по величині є більшим 1,5 одиниці Дебая [1].

### 3. Сили притягання на поверхні розділу фаз

Сили притягання на поверхні розділу фаз обумовлені взаємодією між молекулами або атомами і поверхнею твердого тіла і взаємодією між двома об'ємними фазами. При цьому нові типи сил не вводяться. Використовуючи просту адитивність всіх сил і сумуючи всі парні атом-атомні взаємодії, можна отримати загальну енергію притягання між атомом і твердим тілом нескінченного розміру  $U = \sum U_i$ , де  $U_i$  – потенційна енергія взаємодії атома на поверхні з  $i$ -м атомом твердої фази при умові, що на нескінченній відстані  $U=0$ . Як правило для  $U_i$  приймається залежність

$$U = -C / r^6, \quad (12)$$

де  $C$ -стала. Якщо густина атомів  $N$  є сталою величиною, то

$$U = -N\pi C / 6d^3, \quad (13)$$

де  $d$  – найкоротша відстань між атомом і поверхнею. Таке припущення справедливе тільки у випадку, коли значення  $d$  набагато більше відстані між атомами твердої фази, і тому не може бути застосоване у випадку адсорбції атома на поверхні.

Для отримання величини потенційної енергії притягання на одиницю площі  $U_A$  між двома твердими фазами, які розділені у вакуумі зазором  $d$ , необхідно інтегрування по всьому об'єму другої фази, що дає

$$U_A = -F / 12\pi d^2, \quad (14)$$

де  $F$ -стала Гамакера, яка дорівнює  $\pi^2 N^2 C$  (Дж). Для двох твердих фаз  $\alpha$  і  $\beta$  отримується співвідношення

$$U_A^{\alpha\beta} = -F^{\alpha\beta} / 12d^2, \quad (15)$$

де  $F^{\alpha\beta} = \pi^2 N_\alpha N_\beta C_{\alpha\beta}$ ;  $N_\alpha$  і  $N_\beta$  - густина атомів у фазах  $\alpha$  і  $\beta$  відповідно;  $C_{\alpha\beta}$  - стала Лондона при взає-

модії атома  $\alpha$  з атомом  $\beta$ . Це наближення можна застосувати для розрахунку взаємодії між двома рідинами, але при парному сумуванні точність величини  $d$  буде невисокою при значеннях порядку атомних або молекулярних розмірів.

Альтернативою цьому "мікроскопічному" підходу є модель Лівшиця, яку можна інтерпретувати як "макроскопічне" наближення. Тут висунуте припущення, що флуктуація електричного поля, яке виникає із-за розподілу заряду в окремих атомах, розповсюджується за поверхню об'ємної фази і викликає зростання флуктуацій у приповерхневій області. Напруженість електричного поля у відповідній області розраховується виходячи з діелектричної проникливості. Результати таких розрахунків наближені до отриманих на основі теорії парного сумування. Суттєвість різниці між цими моделями полягає в тому, що теорія Лівшиця враховує всі частоти взаємодії, а не тільки характерні для ультрафіолетової області, яка використовується при розрахунку енергії взаємодії Лондона. Однак у області малих значень  $d$  і ця теорія є недостатньо коректною.

Важливим фактором є вплив оточуючого середовища на далекодіючу взаємодію між двома фазами. У цьому випадку стала Гамакера (15) повинна бути модифікована з урахуванням того, що дисперсні сили діють через проміжне середовище. Для простих речовин величина  $F$  може бути розрахована шляхом сумування парних потенціалів  $\mu$  між об'ємними елементами:

$$\mu_{11} = -3\alpha^2 I_1 / 4r_{11}^6. \quad (16)$$

Сумування дає

$$F_1 = \frac{3}{4} \pi^2 N_1^2 \alpha_1^2 I_1. \quad (17)$$

Якщо тверда фаза 2 занурена у речовину 1, то, як показав Гамакер,

$$F_{12} = F_1 - 2\sqrt{F_1 F_2} \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} + F_2. \quad (18)$$

При малих різницях  $I_1$  і  $I_2$  можна використовувати формулу

$$F_{12} = (\sqrt{F_1} - \sqrt{F_2})^2. \quad (19)$$

Використавши співвідношення (9) для обчислення  $^d\gamma^1$  через сумування парних потенціалів разом з (16) і (17) можна отримати, що

$$F_1 = 6\pi r_{11}^2 d^4 \gamma^1, \quad (20)$$

$$F_{12} = 6\pi r_{11}^2 \left( \sqrt{d\gamma^1} - \sqrt{d\gamma^2} \right)^2. \quad (21)$$

Звідси випливає, що стала Гамакера може бути визначена по значенню експериментальної величини – складової дисперсних сил у поверхневому натязі. Фоукс [2], використавши це наближення, визначив розрахункові значення  $F_{12}$  для ряду систем

вода – тверда фаза з близькими розмірами об'ємних елементів води і твердої фази, таких як оксидних іонів груп –  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$  і атомів металів. Однак було відмічено, що ці значення не можуть бути точними, оскільки у розрахунках враховуються тільки взаємодія молекул, які розташовані дуже близько до поверхні розділу фаз. Якщо підходити строго, то сумування повинно здійснюватись для всіх пар молекул, які беруть участь у взаємодії, однак точні відстані між ними є невідомими.

Проведене дослідження моделей структур поверхонь розділу фаз дає основу для визначення квазікрайових умов при моделюванні процесів масопереносу включень з об'ємної фази у поверхневий шар. Розв'язок задачі масопереносу у процесі насичення поверхневого шару дає можливість теоретично обґрунтувати динаміку міжфазного натягу в за-

лежності від кількісного і якісного складу контактуючих фаз. Крім того, деякі параметри структури поверхневого шару мають непрямий вплив на поведінку динамічної характеристики поверхневого натягу, що дає додаткову інформацію для якісного контролю речовин.

1. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей: Пер. с англ.* - М.: Мир, 1979. - 568 с. 2. Джейк М., Парфит Дж. *Химия поверхности раздела фаз: Пер. с англ.* - М.: Мир, 1984. - 269 с. 3. Малько О. Г. *Термодинамічні основи контролю концентрації мікровключень по зміні міжфазних характеристик // Методи та прилади контролю якості.* - 1999. - № 4. - С. 34-35.

УДК541.1:681.2

## МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ТИСКУ В ГАЗОВОМУ ПУХИРЦІ

© Боднар Р. Т., Витвицька Л. А., Дранчук М. М., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Описана схема нагромадження похибок, проаналізовано вплив основних факторів на точність приладу ВКЗ-1 для вимірювання крайового кута змочування, оцінена його сумарна випадкова похибка вимірювання.**

Вимірювання крайового кута змочування (ККЗ), який є параметром, що характеризує властивість змочування твердих тіл рідинами та адгезію між ними, набирає все більшого значення, оскільки зростає кількість різноманітних технологій в різних галузях промисловості із використанням цих процесів. Причому технології постійно ускладнюються, в них використовуються сучасні засоби автоматизації, які вимагають автоматизованого контролю ККЗ.

На кафедрі "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" ІФНТУНГ був розроблений прилад ВКЗ-1 для вимірювання ККЗ за методом максимального тиску в газовому пухирці (метод МТГП), опис якого подано в [1, 2]. Для метрологічного дослідження даного приладу був використаний ентропійний підхід до аналізу випадкових похибок, який полягає в розкладанні сумарної похибки на окремі складові, значення яких визначаються на основі розгляду основних факторів, що впливають на сумарну похибку вимірювання ККЗ приладом ВКЗ-1 і законів розподілу цих складових похибок.

Схема нагромадження похибок (рис.1) дає узагальнене поняття про джерела їх виникнення. Основними складовими сумарної статичної похибки  $\gamma_{\Sigma}$  є наступні:

методична похибка  $\Delta_{мет}$ , яка обумовлена невідповідністю істинної залежності вимірюваного косинуса ККЗ від тиску теоретично встановленої залежності;

похибка  $\Delta h$  із-за неточності встановлення торця вимірювального капіляру на задану висоту над поверхнею досліджуваного твердого тіла;

похибка  $\Delta_{стик}$ , обумовлена неточністю торкання нижнього торця вимірювального капіляру з поверхнею досліджуваної рідини і твердого тіла;

похибка  $\Delta r$  визначення внутрішнього радіуса вимірювального капіляра;

похибка  $\Delta_{гор}$ , обумовлена негоризонтальністю поверхні твердого тіла;

похибка  $\Delta p$  вимірювання тиску в газовому пухирці, яка в свою чергу розкладається на похибки давача, підсилювача та аналого-цифрового перетворювача.

Динамічна похибка приладу, яка обумовлена інерційністю процесів в пневматичній схемі приладу і складає не більше 0,03 % від максимального значення вимірюваного тиску, була розрахована попередньо і описана в [2].