

вода – тверда фаза з близькими розмірами об'ємних елементів води і твердої фази, таких як оксидних іонів груп – CH_2 , 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 γ_{Σ} є наступні:

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

похибка Δh 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 Δr визначення внутрішнього радіуса вимірювального капіляра;

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

похибка Δp 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].

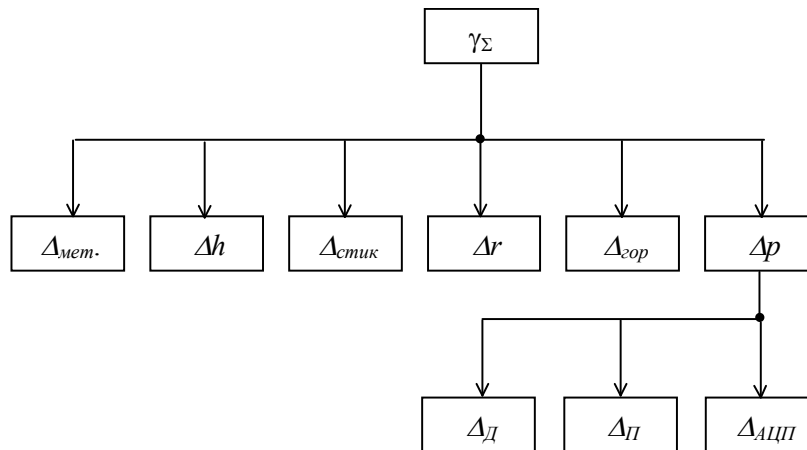


Рис. 1. Узагальнена схема нагромадження похибок при вимірюванні ККЗ приладом ВКЗ-1

Для визначення числових значень кожної складової похибок треба їх проаналізувати, встановити причини їхнього виникнення, доцільність введення поправок внаслідок впливу систематичних похибок, встановити закони розподілу випадкових похибок, враховуючи при цьому взаємкореляційні зв'язки між різними складовими похибками.

Випадкові похибки доцільно оцінювати шляхом визначення їхніх середніх квадратичних відхилень (СКВ). Перевагою такого шляху оцінки розкиду випадкових величин є можливість визначення СКВ сумарної похибки σ_Σ через СКВ окремих складових похибки σ_i за формулою [4]

$$\sigma_\Sigma^2 = \sum \sigma_i^2 \quad (1)$$

незалежно від різноманітності законів розподілу кожної із просумованих некорельованих випадкових величин і деформації знаків розподілу при утворенні композицій.

Отже для того, щоб окремі складові випадкової похибки вимірювання можна було сумувати розрахунковим шляхом, вони повинні бути спочатку представлені своїми СКВ. Це дає можливість розрахунковим шляхом враховувати будь-яку кількість некорельованих складових похибки.

Якщо відомий закон розподілу сумарної похибки, то значення зведеної сумарної випадкової похибки може бути визначене через розраховані значення СКВ цих похибок згідно з формулою

$$\gamma_\Sigma = k_e \cdot \sigma_\Sigma, \quad (2)$$

де k_e - ентропійний коефіцієнт, значення якого визначено відповідно до закону розподілу сумарної похибки.

Деякі з перерахованих похибок (методична похибка $\Delta_{мет.}$, похибка Δr визначення внутрішнього радіуса капіляра, яка залежить від точності вимірювального приладу) були розглянуті попередньо [1, 3]. Максимальні їх значення відповідно становлять: $\Delta_{мет.} = 0,37\%$ і $\Delta r = 0,001$ мм. Дані похибки є сис-

тематичними, значення яких необхідно враховувати при вимірюванні ККЗ в залежності від конкретних значень вимірюваних тисків і інших параметрів. В даній статті більш детально досліджено тільки випадкові складові похибки згідно з рис. 1.

Похибка вимірювання тиску в газовому пухирці Δp , в свою чергу, містить три основні складові, що є похибками вузлів вимірювального каналу: давача тиску, підсилювача та аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Основна зведена похибка давача тиску ПДП-12МДА становить $\gamma_\delta = 0,5\%$ при експлуатації в діапазоні зміни температури навколишнього середовища від $+10^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$ [5]. Ця похибка в основному залежить від нелінійності коефіцієнта перетворення тиску у вихідну напругу. За результатами експериментального зняття статичної характеристики давача його нелінійність становить $0,1\%$. Похибкам даного типу властивий нормальний закон розподілу [4], для якого ентропійний коефіцієнт становить $k_{e_n} = 2,066$. Тоді СКВ цієї похибки буде таким:

$$\sigma_{\delta_{нез}} = \gamma_\delta / k_{e_n} = 0,5 / 2,066 = 0,242\% \quad (3)$$

Додаткова зведена похибка давача тиску від зміни температури $\gamma_{\delta_{темт}}$ згідно з паспортними даними становить $0,3\%$. Для приладів, які працюють в лабораторних умовах, додаткова похибка від коливань температури навколишнього середовища має рівномірний закон розподілу [4], для якого ентропійний коефіцієнт становить $k_{e_p} = 1,73$. Відповідно СКВ даної похибки буде таким:

$$\sigma_{\delta_{темт}} = \gamma_{\delta_{темт}} / k_{e_p} = 0,173\% \quad (4)$$

Коливання напруги живлення змінним струмом від мережі великих енергосистем наближено підлягають трикутному закону розподілу [4]. Тому вважається, що і похибці давача від коливань напруги

живлення $\gamma_{\Delta_{напр}}$ властивий трикутний закон розподілу, для якого ентропійний коефіцієнт $k_{e_m} = 2,02$. Враховуючи те, що давач тиску живиться від стабілізованого джерела напруги компенсаційного типу з нестабільністю напруги $\gamma_{\Delta_{напр}} = 0,01\%$, то СКВ похибки давача від коливань напруги живлення буде становити

$$\sigma_{\Delta_{напр}} = \gamma_{\Delta_{напр}} / k_{e_m} \approx 0,005\% . \quad (5)$$

Похибка $\gamma_{нав}$, яка виникає від наведення завод на вході вимірювальної електричної схеми, як правило, є адитивною. Розподіл такої похибки є арксинусоїдальним [4], а його ентропійний коефіцієнт становить $k_{e_{арк}} = 1,11$. Величина напруги наведених завод на вході підсилювача, тобто на лінії зв'язку між давачем тиску і підсилювачем, визначалась експериментально за допомогою цифрового вольтметра Щ1516. При цьому на вхід підсилювача не подавалась напруга живлення. Величина напруги наведених паразитних струмів не перевищувала 5 мкВ. Оскільки максимальна напруга електричного сигналу давача тиску становить 30 мВ, то зведена максимальна похибка від наведених завод буде такою:

$$\gamma_{нав} = 5 \cdot 10^{-6} / 30 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-2} \% . \quad (6)$$

Отже, СКВ похибки від наведення паразитних струмів буде таким:

$$\sigma_{нав} = \gamma_{нав} / k_{e_{арк}} = 1,53 \cdot 10^{-2} \% . \quad (7)$$

Підсилювачу постійного струму властиві адитивна похибка зміщення 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 $220 \text{ В} \pm 10\%$. Вхід підсилювача замикався накоротко на корпус, а вихідний сигнал після 15-хвилинного прогрівання вимірювався через кожні 15 хвилин протягом восьми годин. Вимірювання проводились вольтметром Щ1516, в якому періодично здійснювався контроль нуля і перевірка показів ввірцевої 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 рівна

$$\gamma_{ндрейф} = 7,8 \cdot 10^{-3} / 5 = 0,156\% . \quad (8)$$

Закон розподілу похибки зміщення нуля вважається рівномірним, як і для температурної похибки давача тиску. Тому СКВ даної похибки буде таким:

$$\sigma_{ндрейф} = \gamma_{ндрейф} / k_{e_p} = 0,09\% . \quad (9)$$

Похибка коефіцієнта підсилення підсилювача залежить від властивостей використаних активних

та пасивних елементів, схемної побудови і стабільності напруги живлення. При вибраній схемі 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 [3]. В ланках зворотного зв'язку підсилювача використано прецизійні резистори типу С2-29В, нестабільність значення опору яких становить $\pm 0,05\%$. Тому цим впливом можна нехтувати. Похибка коефіцієнта підсилення від коливань напруги підлягає трикутному закону розподілу. Її максимальне зведене значення при коливаннях напруги в мережі на $\pm 10\%$ $\gamma_{ннапр} = 0,1\%$. А її СКВ буде таким:

$$\sigma_{ннапр} = \gamma_{ннапр} / k_{e_T} = 0,05\% . \quad (10)$$

Максимально допустима основна приведена похибка стандартного АЦП типу Ф707М/1 становить 0,30% [6]. Ця похибка згідно з [4] складається з мультиплікативних похибок від нелінійності коефіцієнта перетворення, неточності резисторних діляників та впливу зміни температури навколишнього середовища, а також адитивної похибки, яка визначається одиницею молодшого двійкового розряду.

Для переходу від зведеної похибки АЦП до її СКВ необхідно також знати вид закону розподілу цієї похибки. Цей розподіл є композицією рівномірного розподілу похибки квантування і дуже полого спадного експоненційного розподілу суми похибок нуля-органу, аналогових вузлів АЦП і розкиду окремих ступенів кодууючої сітки. В середньому можна вважати значення показника степеня даного експоненційного закону розподілу рівним $\alpha = 0,5$. У високоточних АЦП з великою кількістю розрядів експоненційний розподіл переважає над рівномірним, а в низькоточних – навпаки. Основними параметрами, які визначають форму таких розподілів, є показник відносного вмісту в композиції рівномірної та експоненційної складових і показник степеня експоненційної складової. Хоча відносна вага дисперсії експоненційної складової $\sigma_{екс}^2$ в сумарній дисперсії композиції $(\sigma_p^2 + \sigma_{екс}^2)$ може становити всього кілька відсотків, однак при цьому відмінність сумарного композиційного розподілу від рівномірного може бути значною. Так, при похибці АЦП порядку 0,1% $\sigma_{екс}^2$ становить від 25 до 13% від значення $(\sigma_p^2 + \sigma_{екс}^2)$. При наближеній оцінці похибки цією складовою можна нехтувати і вважати розподіл близьким до рівномірного. Для більш точного розрахунку похибки дисперсію цієї складової можна

в середньому прийняти рівною $p \approx 8\%$ або $p = 1/13$ загальної дисперсії.

У випадку чисто рівномірного закону розподілу похибки АЦП її СКВ буде таким:

$$\sigma_{АЦП_{рівн}} = \gamma_{АЦП} / k_{e_p} = 0,173\% . \quad (11)$$

СКВ експоненційної складової цієї похибки буде визначатись так:

$$\sigma_{АЦП_{екс}} = \sqrt{(p \cdot \sigma_p^2 / (1 - p))} \approx 0,05\% . \quad (12)$$

Розрахунок результуючої похибки каналу вимірювання тиску зводиться до алгебраїчного попарного сумування СКВ жорстко корельованих похибок давача і підсилювача від коливань напруги живлення та від коливань температури в лабораторії. Причому коефіцієнти впливу цих коливань на всі ці похибки є позитивними. Тому результуючі значення цих похибок будуть такими:

від коливань напруги із збереженням трикутного закону розподілу

$$\sigma_{(\partial+n)_{напр}} = (0,005 + 0,005)\% = 0,01\% , \quad (13)$$

від коливань температури із збереженням нормального закону розподілу

$$\sigma_{(\partial+n)_{тем}} = (0,173 + 0,09)\% = 0,263\% . \quad (14)$$

Всі решту складових вимірювального каналу сумуються як незалежні шляхом геометричного сумування їх СКВ, тобто

$$\sigma_p = (\sigma_{\partial_{нел}}^2 + \sigma_{(\partial+n)_{напр}}^2 + \sigma_{(\partial+n)_{тем}}^2 + \sigma_{наг}^2 + \sigma_{АЦП_{рівн}}^2 + \sigma_{АЦП_{екс}}^2)^{1/2} = 0,8291\% . \quad (15)$$

Похибка $\Delta_{стик}$, яка обумовлена неточністю торкання капіляру з поверхнею рідини, залежить від ряду факторів, серед яких основними є: вібрації, негоризонтальність приладу, неперпендикулярність площини зрізу нижнього робочого торця капіляру та чистоти обробки його поверхні, невертикальність встановлення вимірювального капіляру у вузлі фіксації, прецизійність механізму переміщення. Сумарний вплив цих факторів було досліджено експериментально при допомозі багатообертової вимірювальної головки годинникового типу з похибкою $\pm 0,001$ мм. Статистична обробка результатів цієї багатократної операції стикування капіляру з поверхнею рідини дала можливість встановити, що максимальне значення зведеної похибки при нульовому косинусі кута змочування складає $\gamma_{стик} = 0,0045\%$ при нормальному законі її розподілу. Отже, СКВ даної похибки буде таким:

$$\sigma_{стик} = \gamma_{стик} / k_{e_n} = 0,022\% . \quad (16)$$

Похибка Δh обумовлена тим, що процес підіймання столика з досліджуваною системою "рідина-тверде тіло" здійснюється дискретно за допомогою гвинтового механізму, який приводиться в дію кро-

ковим двигуном ДШИ-200. При цьому похибка лінійного переміщення становить 0,0025 мм, що приводить до максимальної похибки, зведеної до значення тиску в пухирці при мінімальному косинусі ККЗ $\gamma_h = 0,037\%$.

Закон розподілу даної похибки, як і похибки лінійних переміщень, можна вважати рівномірним. Тому СКВ даної похибки буде таким:

$$\sigma_h = \gamma_h / k_{e_p} = 0,022\% . \quad (17)$$

Отже, сумарне СКВ всіх досліджених випадкових похибок буде таким:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_p^2 + \sigma_{стик}^2 + \sigma_h^2)} = 0,7262\% . \quad (18)$$

Для визначення закону розподілу сумарної випадкової похибки доцільно скористатися центральною граничною теоремою теорії ймовірності, згідно з якою по мірі сумування значної кількості похибок ексцес отримуваних композицій все більше наближується до ексцесу нормального закону розподілу і рівний $\varepsilon = 3$ [4]. Отже, ентропійний коефіцієнт сумарної випадкової похибки рівний $k_{e_p} = 2,066$. Тоді ентропійне значення сумарної зведеної випадкової похибки приладу буде дорівнювати

$$\gamma_{\Sigma_{вин}} = \sigma_{\Sigma} \cdot k_{e_n} = 1,5003292\% \approx 1,5\% . \quad (19)$$

Значення довірчої ймовірності P_e , при якому ентропійне та довірче значення випадкової похибки співпадають, згідно з [4] визначається так:

$$P_e = 0,899 + 0,1818 / \varepsilon = 0,9596 . \quad (20)$$

Розраховане значення зведеної сумарної похибки дають підставу вважати розроблений прилад ВКЗ-1 достатньо точним для класу приладів, що вимірюють крайовий кут змочування в автоматичному режимі.

1. Боднар Р. Т. Визначення крайового кута змочування на границі розділення тверде тіло – рідина методом максимального тиску в газовому пухирці // Методи та прилади контролю якості. - 1997. - № 1. - С. 55-58. 2. Боднар Р. Т. Аналіз пневматичної схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування // Методи та прилади контролю якості. - 1998. - № 2. - С. 28-30. 3. Боднар Р. Т. Аналіз впливу параметрів вимірювальної схеми на визначення крайового кута змочування за методом максимального тиску в газовому пухирці // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 6. - С. 40-42. 4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 304 с. 5. Прибор давления полупроводниковый ПДП-12МД. Паспорт тА2.823.031 ПС. 6. Преобразователь аналого-цифровой Ф707 М/1. Паспорт 2Яа.949.541 ПС.

