

## АНАЛІЗ ПНЕВМАТИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ

© Боднар Р.Т., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

*Проаналізовано динаміку зміни тиску в пневматичній схемі пристроїв для визначення крайового кута змочування методом максимального тиску в газовому пухирці, який утворюється в досліджуваній рідині в контакт з досліджуваною поверхнею твердого тіла. Оцінено вплив пневматичних опорів елементів схеми на точність вимірювання.*

Для визначення фізико-хімічних параметрів взаємодії трифазних систем, зокрема, крайового кута змочування твердих тіл рідинами, на основі теоретичних досліджень та математичного моделювання процесу утворення газового пухирця в рідині в контакт з поверхнею твердого тіла одержано аналітичну залежність косинуса крайового кута змочування від максимального тиску в газовому пухирці, який видувається в досліджувану рідину до контакту з досліджуванім твердим тілом [1]

$$\cos \Theta = c_0 + c_1 \cdot P_{max} + c_2 \cdot P_{max}^2, \quad (1)$$

де  $\Theta$  – крайовий кут змочування;  $P_{max}$  – значення максимального тиску;  $c_0, c_1, c_2$  – коефіцієнти, одержані при розв'язуванні чисельними методами рівняння Лапласа [2] і апроксимації результатів сплайн-функціями.

Метод визначення крайового кута змочування на основі (1) дає принципову можливість автоматизувати процес вимірювання на відміну від традиційних оптичних методів його вимірювання.

Прилад, який би реалізував вказану можливість, повинен забезпечити утворення газових пухирців у досліджуваній рідині, які б контактували з поверхнею досліджуваного твердого тіла, та перетворення вимірюваного тиску в цих пухирцях у відповідний електричний сигнал з метою його обробки згідно з (1). У такому приладі повинні бути дві функціональні частини: пневматична і електрична. Пневматична частина приладу певною мірою впливає на точність вимірювання крайового кута змочування методом максимального тиску в газовому пухирці. Правильний вибір режиму барботажу газу через вимірювальний капіляр, конструктивних розмірів елементів пневматичної лінії має важливе значення і дає змогу ще на стадії проектування визначити оптимальну конструкцію таких пристроїв. Потрібно мати на увазі, що при

використанні розчинів поверхнево-активних речовин треба враховувати динамічний характер процесу встановлення крайового кута змочування через адсорбції молекул поверхнево-активних речовин на поверхні пухирців, які утворюються. При цьому значення крайового кута змочування і коефіцієнта поверхневого натягу рідини матимуть нелінійний характер зміни в часі аж до досягнення рівноважних значень критичної концентрації міцелоутворення молекул поверхнево-активних речовин на поверхні бульбашки. Значить, необхідно так виконати розрахунок конструктивних розмірів пристрою і вибрати такий режим його роботи, щоб час існування поверхні пухирця газу на торці капіляра був більшим від часу, необхідного для встановлення рівноважного адсорбційного стану для даної досліджуваної рідини. При визначенні динамічної характеристики процесу змочування навпаки, час існування поверхні повинен бути меншим від часу встановлення адсорбційної рівноваги.

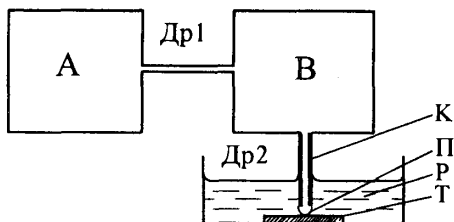
Однак при дослідженні динаміки змочування необхідно враховувати перехідні процеси в трактах пневмосистеми, особливо на ділянці, яка з'єднує вихідний отвір вимірювального капіляра і мембраною перетворювача тиску в електричний сигнал і з виходом джерела пневматичного живлення [2]. Ця ділянка утворює собою вимірювальну камеру, тиск в якій повинен бути відображенням тиску в газовому пухирці, що утворюється з торця вимірювального капіляра. При цьому значення тиску джерела пневматичного живлення повинні задовольняти таку умову:

$$P_{max} < P_A < P_{кр}, \quad (2)$$

де  $P_{max}$  – максимальний тиск у газовому пухирці;  $P_A$  – тиск джерела пневматичного живлення;  $P_{кр}$  – значення тиску пневматичного живлення, при якому тиск у вимірювальній камері вже не реагуватиме в

утворення кожного окремого газового пухирця. Тільки робота пневматичної схеми в режимі, який задовольняє нерівність (2), є необхідною для вимірювання фізико-хімічних параметрів рідин за методом максимального тиску в газовому пухирці. Цей режим визначається дослідженням перехідних процесів у вимірювальній камері.

У спрощеному вигляді пневматична схема пристрою для вимірювання крайового кута змочування методом максимального тиску в газовому пухирці зображена на рисунку. На основі даної схеми доцільно провести моделювання перехідних процесів, які відбуваються при видуванні газових пухирців.



Пневматична схема пристрою для визначення крайового кута змочування:

- A – джерело пневматичного живлення;
- B – вимірювальна камера; Др1, Др2 – пневматичні дроселі (пневмоопори); К – вимірювальний капіляр;
- Р – досліджувана рідина;
- Т – досліджуване тверде тіло; П – пухирець газу.

У разі ізотермічного процесу стан газу в камері В у кожний момент часу описуватиметься рівнянням Клапейрона

$$P_B V_B = RT \frac{m}{\mu}, \quad (3)$$

де  $P_B$  – тиск у вимірювальній камері;  $V_B$  – об’єм вимірювальної камери;  $m$  – маса газу;  $\mu$  – молярна маса газу.

Диференціюючи це рівняння в часі, одержимо

$$V \frac{dP}{dt} = \frac{RT}{\mu} \frac{dm}{dt}. \quad (4)$$

Масова витрата газу  $\frac{dm}{dt}$  в камеру В, при ламинарній течії через дросель (пневмоопір) Др1 з внутрішнім радіусом  $r_1$  і довжиною  $l_1$  дорівнює [3]

$$\frac{dm}{dt} = (P_A - P_B) \frac{\pi r_1^4 \rho}{8 \eta l_1}, \quad (5)$$

де  $\rho$ ,  $\eta$  – густина і динамічна в’язкість газу.

Тоді з урахуванням (5) рівняння (4) перехідного процесу в камері В буде таким:

$$\tau_1 \frac{dP_B}{dt} + P_B = P_A, \quad (6)$$

$$\tau_1 = \frac{8V_B l_1 \mu \eta}{\pi r_1^4 \rho R T}, \quad (7)$$

де  $\tau_1$  – стала часу камери В при її заповненні газом.

На вході вимірювального капіляра відбувається спад тиску, який затрачений на утворення кінетичної енергії одиниці об’єму  $\frac{\rho v^2}{2}$ . При цьому

профіль швидкостей на вході практично рівномірний. Потім на вхідній ділянці завдовжки

$l' = 0,065 Re \cdot d$ , де  $Re = \frac{\rho v d}{\eta}$  – число Рейнольдса;  $d$

– діаметр капіляра; відбувається утворення параболічного профілю швидкостей. Тому в кінці вхідної ділянки кінетична енергія одиниці об’єму дорівнює  $\frac{2\rho v^2}{2}$ . На це, а також на деякі втрати, які

супроводжують процес утворення параболічного профілю швидкостей, затрачується тиск. У результаті сумарна втрата тиску на вході капіляра, яка витрачається на прискорення потоку і утворення в ньому параболічного профілю швидкостей, визначається рівнянням

$$\Delta P_1 = \xi \frac{16 \rho Q^2}{\pi^2 d^4}, \quad (8)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт втрат, який залежить від вхідного отвору капіляра ( $\xi = 0,8$  – при загостреному торці капіляра;  $\xi = 1,12$  – при заокругленому вході в капіляр,  $\xi = 1,0$  – при прямокутному торці капіляра) [4].

На наступних ділянках капіляра немає інших втрат тиску, крім втрат через в’язкість, які описуються законом Пуазейля

$$\Delta P_2 = \frac{128 \eta l Q}{\pi d^4}. \quad (9)$$

Загальний перепад тиску на капілярі визначатиметься значенням

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (10)$$

Закон Пуазейля лінійний тільки для довгих капілярів ( $l = (200 - 300)d$ ), а для коротких капілярів ( $l \leq 18d$ ), а такі практично можна використати, згідно з [5] рівняння зв’язку витрати і перепаду тиску має такий вигляд

$$Q = k \cdot \Delta P^{0,91}, \quad (11)$$

де  $k = \frac{\pi r_2^4}{8 \eta l_2}$ .

Вираз (11) дає змогу визначити різницю тисків  $\Delta P$  на вході і виході вимірювального капіляра у

встановленому режимі залежно від об'ємної витрати, але не характеризує динамічну зміну тиску.

Рівняння перехідного процесу у вимірювальному капілярі  $K$  запишеться аналогічно (6)

$$\tau_2 \cdot \frac{dP_k}{dt} + P_k = P_B, \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{8V_k \cdot l_2 \cdot \eta}{\pi \cdot r_2^4 \cdot \rho \cdot RT}, \quad (13)$$

де  $\tau_2$  – постійна часу пневмоопору  $Dp_2$ , тобто вимірювального капіляра з довжиною  $l_2$ , внутрішнім радіусом  $r_2$ ;  $P_k$  – тиск на виході капіляра;  $V_k$  – об'єм вимірювального капіляра;  $l_2$  – довжина капіляра;  $r_2$  – внутрішній радіус капіляра.

Продиференціюємо рівняння (12) в часі і підставимо результат в (6)

$$\tau_1 \cdot \left( \tau_2 \cdot \frac{d^2 P_k}{dt^2} + \frac{dP_k}{dt} \right) + \left( \tau_2 \cdot \frac{dP_k}{dt} + P_k \right) = P_A; \quad (14)$$

$$\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \frac{d^2 P_k}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \cdot \frac{dP_k}{dt} + P_k = P_A. \quad (15)$$

Характеристичне рівняння для (15) має вигляд

$$\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot k^2 + (\tau_1 + \tau_2) \cdot k + 1 = 0. \quad (16)$$

Корені його будуть

$$k_1 = -\frac{1}{\tau_1}; \quad k_2 = -\frac{1}{\tau_2}. \quad (17)$$

Тоді, розв'язок лінійного диференціального рівняння другого порядку (11) при зміні тиску в камері  $B$  стрибком від 0 до  $P_A$  буде таким:

$$P_k = \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_2 t} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_1 t} + P_A, \quad (18)$$

а враховуючи (17), одержимо

$$(P_k - P_A) \cdot \left( \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) = \frac{1}{\tau_2} \cdot e^{\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_1} \cdot e^{\frac{t}{\tau_2}}. \quad (19)$$

Одержаний вираз (19) характеризує динаміку передачі тиску від джерела  $A$  до виходу капіляра. Враховуючи, що тиск  $P_k$  на виході капіляра не може перевищувати максимальний тиск  $P_m$  в газовому пухирці, то можна підставляти  $P_m$  замість  $P_k$  у вираз (19). Тоді із виразу (19) можливо одержати рівняння

$$\tau_1 \cdot e^{\frac{t_n}{\tau_1}} - \tau_2 \cdot e^{\frac{t_n}{\tau_2}} = (P_m - P_A) \cdot (\tau_2 - \tau_1), \quad (20)$$

з якого можна визначити значення часу  $t_n$ , протягом якого тиск над меніском рідини у вимірювальному капілярі збільшиться від 0 до  $P_m$  при

стрибокподібній зміні тиску живлення — від 0 до  $P_A$ .

Підставляючи реальні параметри об'єму вимірювальної камери ( $V_B \approx 25 \text{ см}^3$ ), довжини ( $l_1 \approx 20 \text{ мм}$ ) та внутрішнього радіуса ( $r_1 = 0,10 + 0,25 \text{ мм}$ ) пневмодроселя  $Dp_1$ , довжини ( $l_2 \approx 20 \text{ мм}$ ) та внутрішнього радіуса ( $r_2 = 0,3 + 0,5 \text{ мм}$ ) вимірювального капіляра при нормальних умовах повітря вирази (7) та (13), одержимо, що стала часу камери  $B$  знаходиться в межах  $\tau_1 = (0,003 + 3) \text{ с}$ , а стала часу вимірювального капіляра в межах  $\tau_2 = (0,003 + 0,008) \text{ с}$ . З цими даними чисельний розв'язок трансцендентного рівняння (20) дає значення часу  $t_n = (0,01 + 0,02) \text{ с}$ , який є набагато менший від часу утворення та виходу пухирців з вимірювального капіляра в реальних умовах, тобто параметри вибраних елементів пневматичної схеми не будуть суттєво впливати на кінетику фізико-хімічних процесів змочування.

Проте, ще доцільно оцінити точність вимірювання тиску давачем у вимірювальній камері внаслідок впливу перехідного процесу у вимірювальному капілярі. За умови зміни тиску в мері  $A$  від 0 до  $P_A$  розв'язок рівняння (6) буде

$$P_B = P_A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (21)$$

Вираз (21) описує процес зміни тиску в камері  $B$  і, якщо підставити значення часу  $t_n$ , визначеного з (20) у (21), одержимо значення тиску в камері  $B$  в момент максимального тиску в газовому пухирці

$$P_{B \max} = P_A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_1}} \right) \quad (22)$$

Розв'язком рівняння (12) аналогічно буде вираз

$$P_k = P_B \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (23)$$

який показує закон зміни тиску на виході вимірювального капіляра при стрибкокподібній зміні тиску від 0 до  $P_B$  у вимірювальній камері  $B$ . Підставивши в (23) час  $t_n$ , дістанемо

$$P_{K \max} = P_{B \max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_2}} \right) \quad (24)$$

Практично неможливо виміряти максимальний  $P_{K \max}$  на виході вимірювального капіляра. З виразу

(24) видно, що майже завжди  $P_{Kmax} > P_{Bmax}$ , але значення максимального тиску на виході капіляра  $P_{Kmax}$  стане дорівнювати максимальному тиску  $P_{Bmax}$  у вимірвальній камері, якщо експонента у виразі (24) прямує до 0. Очевидно, що для досягнення цього треба вибрати такі конструктивні розміри дроселя  $Dp1$ , вимірвальної камери  $B$ , вимірвального капіляра  $K$ , тиску живлення  $P_A$ , щоб  $t_n \gg \tau_2$ .

Досить легко встановити такі реальні конструктивні параметри вказаних елементів, щоб  $t_n \geq 8\tau_2$ , тоді, згідно з (24), максимальний тиск  $P_{Bmax}$  у вимірвальній камері  $B$  відрізнятиметься від максимального тиску  $P_{Kmax}$  на виході капіляра менше ніж на 0,03%.

Отже, виконаний аналіз пневматичної схеми приладу для вимірювання крайового кута змочування дає можливість розраховувати прогнозовану складову похибки приладу.

Отримані результати свідчать, що ця складова є цілком прийнятною під час конструювання пневматичної частини приладу для вимірювання крайового кута змочування.

1. Боднар Р.Т. Визначення крайового кута змочування на границі розділення тверде тіло – рідина методом максимального тиску в газовому пухирці // Методи прилади контролю якості. 1997. Вип.1.
2. Кисиль И.С. Исследование и разработка дросельных преобразователей для измерения поверхностных свойств жидкостей по методу максимального давления в газовом пузырьке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1974.
3. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М., 1961.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л., 1975.
5. Abram J., Jones R.E.S., McVeigh J.C. A resistance floweret for liquids at low Reynolds number // Measurement and Instrument Review. 1969. Jan. P.17-18. Feb. P.91-92.

УДК 622.241(088.8)

## ПІДБІР ІНДИКАТОРІВ ВТОМИ ДЛЯ РЕЄСТРАТОРА ОСЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОЛОТО

© Івасів В.М., 1998

ІФДТУНГ, м. Івано-Франківськ

*Проаналізовано використання індикаторів втоми для прогнозування ресурсу деталей машин. Запропонований спосіб їх підбору для реєстраторів осьового навантаження на долото.*

Сучасні розрахункові методи та засоби контролю не дають змоги точно спрогнозувати ресурс деталей машин. Тому останнім часом розвиваються методи та засоби оцінки залишкового ресурсу за допомогою використання індивідуальних індикаторів (давачів) втоми.

За конструктивними особливостями їх можна поділити на такі 4 типи [1]:

- 1 – давачі, виготовлені гальванічним нанесенням плівки міді;
- 2 – давачі, виготовлені із матеріалу самої конструкції;
- 3 – фольгові давачі – "свідки";
- 4 – давачі, виготовлені із константанового дроту.

Відомі також давачі, які виготовлені із гафтітового дроту і поміщені в в'яжучий матеріал [2]. Автори [3] вказують на такі переваги індикаторів, як

малі розміри, простота конструкції, технологічність виготовлення, високі метрологічні характеристики.

Проводяться науково-дослідні роботи для використання індикаторів втоми деталей механізмів і машин у нафтовій і газовій промисловостях.

Розроблені конструкції та проведені дослідження з забезпечення надійності з використанням індикаторів втоми бурильних труб [4, 5], глибинно-насосних штанг [6], бурових доліт [7, 8] газопроводів [9].

Оцінка зусиль, які виникають у бурильній колоні внаслідок взаємодії долота з вибоєм, є одним із важливіших питань у технології буріння.

Інформація про процеси, які проходять у компонованні низу бурильної колоні може прискорити вирішення проблем ефективного руйнування порід, оптимального відпрацювання доліт, віброзахисту колоні та обладнання. У даний час отримання такої інформації є складною техніч-