

ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТЕПЕНЕВИХ ТА БІНГАМІВСЬКИХ РІДИН ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Крих Г.Б., 2006

Розглянута вимірювальна схема і математична модель гідродинамічного перетворювача реологічних параметрів неньютонівських рідин. Запропонована спрощена методика оброблення вихідних сигналів перетворювача, яка з достатньою для практичних вимірювань точністю дає змогу оцінити параметри степеневих та бінгамівських рідин.

A measuring circuit and mathematical model of hydrodynamic transducer of rheological parameters of non-Newtonian fluids is considered in the article. Proposed simplified method of treatment of output signals of transducer, which allows with sufficient practical accuracy to estimate the parameters of power law and Bingham plastic fluids.

Постановка проблеми. Контроль реологічних властивостей матеріалів в багатьох технологічних процесах найчастіше зумовлений необхідністю отримання продукції заданої якості. Технологам відомо, що реологічні параметри дуже чутливі до якісних показників матеріалів. Безпосереднє вимірювання показників якості звичайно є складною задачею і здійснюється в лабораторних умовах. У зв'язку з цим системи оперативного контролю реологічних параметрів необхідні для встановлення закономірностей впливу різноманітних збурень на реологічні параметри рідин і їх взаємозв'язку з експлуатаційними характеристиками і можуть стати основою оптимального керування структурно-механічними властивостями матеріалів і відповідно їх якісними показниками [1–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для вимірювання реологічних параметрів речовин, які за реологічною поведінкою належать до неньютонівських рідин, розроблено багато різних методів, кожен з яких придатний до певних матеріалів та реальних умов їх деформування в технологічних апаратах [1–5]. В переважній більшості цих методів визначаються умовні показники, які характеризують лише конкретні матеріали і не мають теоретично обґрунтованого зв'язку з реологічними параметрами. Серед методів вимірювання, який може бути теоретично обґрунтований для різноманітних неньютонівських рідин (псевдопластичних, в'язкопластичних тощо) в широких діапазонах швидкостей зсуву і температур, особливої уваги заслуговує гідродинамічний метод [1].

Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних пристроїв розглянуто в роботах багатьох авторів [4,5,6]. В публікаціях [7,8] показані нові підходи щодо застосування таких пристроїв до вимірювання параметрів неньютонівських рідин. Розроблені в цих роботах принципи дають змогу синтезувати вимірювальні перетворювачі параметрів неньютонівських рідин, що описуються різними реологічними моделями.

Формулювання цілі статті. Метою роботи є розроблення пристроїв для неперервного вимірювання реологічних параметрів псевдопластичних (степеневих) і в'язкопластичних (бінгамівських) рідин за допомогою гідродинамічного методу вимірювання. Цей метод базується на залежності характеристик руху рідини в чутливих елементах від її властивостей. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати реологічні моделі контрольованих середовищ, витратні характеристики чутливих елементів, вибрати схему вимірювального перетворювача, розробити

математичну модель гідродинамічного вимірювального перетворювача, розробити алгоритми оброблення вихідних сигналів перетворювачів.

Виклад основного матеріалу. У практиці вимірювання динамічної в'язкості внаслідок простоти і надійності широко застосовують пристрої, чутливими елементами яких є циліндричні трубки з круглим поперечним перерізом. Вимірювання в'язкості в таких пристроях здійснюються в широкому діапазоні швидкостей зсуву. Однак в циліндричній трубці градієнт тиску є змінним вздовж потоку і стабілізується в напрямі руху на деякій відстані від входу, тобто градієнт тиску в районі входу відрізняється від градієнту тиску в області усталеного руху. Для підвищення точності вимірювання динамічної в'язкості необхідно також враховувати вплив входових ефектів трубок. Так, для зменшення впливу входових ефектів на результат вимірювання відбір тиску в трубці здійснюють на деякій відстані від вхідного канту трубки. Принципова схема найпростішого віскозиметра показана на рис. 1. Теорія таких віскозиметрів добре розроблена для ньютонівських рідин [6]. Для неньютонівських рідин необхідно враховувати також і інші ефекти, що виникають під час руху рідини в трубці: залежність в'язкості від швидкості зсуву, ефект властивостей змінюватись в часі, пристінні ефекти тощо. Ті впливи, які добре досліджені для ньютонівських рідин, зокрема такі як режими руху рідини, втрати тиску на початковій гідродинамічній ділянці, втрати кінетичної енергії, для неньютонівських рідин вимагають додаткових досліджень.

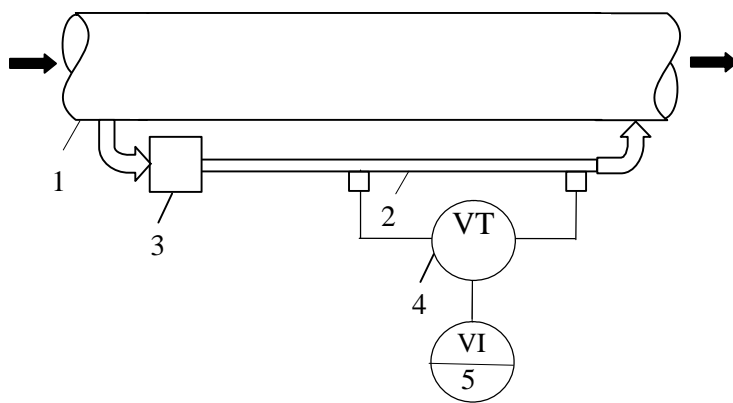


Рис. 1. Принципова схема трубного віскозиметра:
1 – основний трубопровід; 2 – вимірювальна трубка;
3 – задавач витрати; 4 – дифманометр; 5 – показувальний прилад

Для опису реологічної поведінки псевдопластичних рідин широкого застосування набула степенева модель Оствальда

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

а для в'язкопластичних рідин – модель Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}, \quad (2)$$

де τ – дотичне напруження зсуву; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву; K, n – реологічні параметри: показник консистенції та показник нелінійності степеневі рідини; τ_0, η – граничне напруження зсуву та пластична в'язкість бінгамівської рідини. Ефективна в'язкість будь-якої неньютонівської рідини визначається так:

$$\mu_{ef} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

і залежить від швидкості зсуву. Незважаючи на це, значення ефективної в'язкості при певній швидкості зсуву є інформативним реологічним параметром, який визначає експлуатаційні характеристики неньютонівських речовин. Так, наприклад, ефективна в'язкість полімерних розчинів пов'язана з їх молекулярною вагою, а ефективна в'язкість харчових продуктів (концентрованих соків, томатних паст) з вмістом в них сухих речовин.

У роботах [7,8,9] показано, що для вимірювання параметрів неньютонівської рідини можуть бути застосовані мостові вимірювальні перетворювачі, що працюють у режимі постійної витрати і забезпечують зменшення або й повну компенсацію деяких систематичних складових похибок вимірювання. Чутливими елементами такого перетворювача є циліндричні трубки однакового діаметра, що з'єднані в схему гідравлічного моста за допомогою вхідної 7, вихідної 8 і міжтрубних камер 6, до яких під'єднаний перетворювач різниці тисків 5. Принципова схема мостового гідродинамічного перетворювача показана на рис. 2. Постійна витрата рідини забезпечується задавачем витрати.

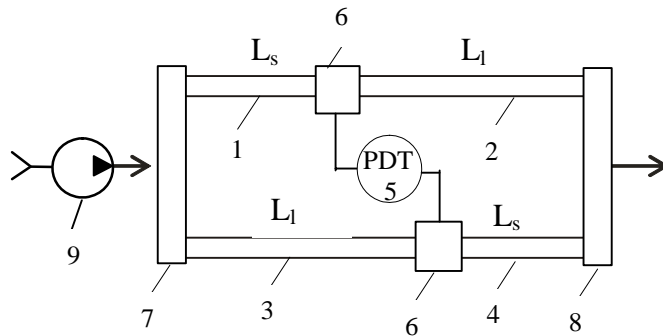


Рис. 2. Мостова вимірювальна схема гідродинамічного перетворювача: 1,4 – короткі трубки довжиною L_s ; 2,4 – довгі трубки довжиною L_l ; 5 – дифманометричний перетворювач; 6 – міжтрубні камери; 7,8 – вхідна і вихідна камери; 9 – задавач витрати

Математична модель мостового перетворювача базується на математичних моделях окремих елементів (циліндричних трубок), що складають мостову схему [7] і визначається реологічною поведінкою рідини. Так, для ступеневої рідини математична модель мостового перетворювача має вигляд

$$F = \frac{\pi n R^3}{3n + 1} \cdot \left(\frac{\Delta P R}{2\Delta L K} \right)^{1/n} \text{ або} \\ \tau_w = K \cdot \left(\frac{3n + 1}{4n} \cdot \Gamma \right)^n, \quad (4)$$

де F – об’ємна витрата рідини в трубці; R – радіус трубок; $\Delta L = L_l - L_s$ – різниця між довжинами трубок в мостовому перетворювачі; ΔP – перепад тиску в міжтрубних камерах 6 мостового перетворювача; $\Gamma = \frac{4F}{\pi R^3}$ – уявна швидкість зсуву на стінці; $\tau_w = \frac{\Delta P R}{2\Delta L}$ – дотичне напруження на стінці трубки. Для бінгамівської рідини –

$$F = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\eta \Delta L} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{2\Delta L}{\Delta P R} \tau_0 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2\Delta L}{\Delta P R} \tau_0 \right)^4 \right] \text{ або } \tau_w = \frac{\eta}{\left(1 - \frac{4}{3} \beta + \frac{1}{3} \beta^4 \right)} \cdot \Gamma, \quad (5)$$

де $\beta = \frac{\tau_0}{\tau_w}$.

За перепадом тиску у вихідній діагоналі мостового перетворювача безпосередньо можна визначити уявну в’язкість μ_a , що так само, як і ефективна в’язкість, характеризує властивості неньютонівської рідини при певній швидкості зсуву

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\Gamma} = \frac{\Delta P R}{2\Delta L} \div \frac{4F}{\pi R^3} = \frac{\pi R^4}{8F \Delta L} \Delta P. \quad (6)$$

Для ступеневої рідини уявна в’язкість, наприклад, визначається за формулою

$$\mu_a = K \cdot \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^n \cdot \Gamma^{n-1}, \quad (7)$$

а між уявною та ефективною в’язкостями є такий зв’язок:

$$\mu_a = \frac{3n + 1}{4n} \cdot \mu_{ef}. \quad (8)$$

Для вимірювання реологічних параметрів (K, n, μ_a, μ_{ef}) ступеневої рідини пропонується застосувати пристрій, що складається з трьох послідовно з’єднаних гідродинамічних мостових перетворювачів, задавача витрати, трьох дифманометричних перетворювачів, що вимірюють перепад тиску у вихідних діагоналях мостових перетворювачів, пристрій керування та обчислення, пристрою відображення інформації (рис. 3).

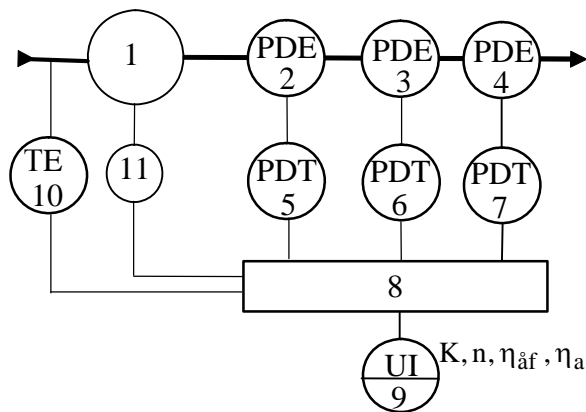


Рис. 3. Функціональна схема гідродинамічного пристрою для вимірювання реологічних параметрів: 1 – задавач витрати; 2,3,4 – гідродинамічні мостові перетворювачі; 5,6,7 – дифманометричні перетворювачі; 8 – пристрій керування та обчислення; 9 – пристрій відображення інформації; 10 – термоперетворювач; 11 – електродвигун

У пристрої керування та обчислення 8 за алгоритмом, наведеним в [10], встановлюється вплив пристінного ковзання і для кожного мостового перетворювача розраховуються значення коефіцієнта ковзання s_{ki} , який застосовується для корегування об'ємної витрати в рівняннях їх витратних характеристик

$$F_i = F_o - s_{ki} \tau_{wi} \pi R_i,$$

де $i=1,2,3$ – номер гідродинамічного мостового перетворювача; $F_o = \frac{F_c}{2}$ – об'ємна витрата рідини у вимірювальних трубках; F_c – продуктивність задавача витрати; $\tau_{wi} = \frac{\Delta P_i R_i}{2 \Delta L_i}$ – дотичне напруження на

стінці трубки в i -му мостовому перетворювачі. Отже, якщо присутній ефект пристінного ковзання, то значення F_i витрати в математичних моделях мостових перетворювачів будуть різні.

Потім за сигналами мостових вимірювальних перетворювачів розраховують реологічні параметри. Якщо, наприклад, реологічна поведінка речовини описується рівнянням Освальда, то показник нелінійності можна визначити за формулою

$$n = \ln \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} \right) / \ln \left(\frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 \right), \quad (9)$$

а показник консистенції K

$$K = \frac{\Delta P_1 R_1}{2 \Delta L_1} \cdot \left(\frac{4n}{3n+1} \cdot \frac{\pi R_1^3}{4 F_1} \right)^n, \quad (10)$$

де $\Delta P_1, \Delta P_2$ – перепад тиску в міжтрубних камерах відповідно першого і другого мостових перетворювачів.

Визначити пластичну в'язкість η_i і граничне напруження зсуву τ_o бінгамівської рідини за перепадами тиску у вихідних діагоналях мостових перетворювачів в явному вигляді не вдається. Це зумовлено тим, що витратні характеристики (5) мостових перетворювачів є нелінійними, а для знаходження вказаних параметрів необхідно розв'язувати систему нелінійних рівнянь, вигляд яких ще більше ускладнюється, якщо враховувати ефект пристінного ковзання. У роботах [11,12,13] запропонована методика, в якій значення η і τ_o отримують внаслідок розв'язання оптимізаційної задачі. Розраховані значення η і τ_o забезпечують мінімум заданого критерію оптимальності. За критерій оптимальності можна обрати суму квадратів відхилень між виміряними і розрахованими значеннями перепаду тиску в діагоналях всіх мостових перетворювачів.

Нижче пропонується спрощена методика розрахунку параметрів бінгамівської рідини, яка з достатньою для практичних вимірювань точністю дає змогу визначити пластичну в'язкість та граничне напруження зсуву за результатами вимірювань уявної в'язкості. Ця наближена методика базується на тому, що значення уявної в'язкості для бінгамівської рідини згідно з рівнянням (6) визначається за формулою

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\Gamma} = \eta \cdot \left(1 - \frac{4}{3}\beta + \frac{1}{3}\beta^4\right)^{-1}. \quad (11)$$

Аналізуючи залежність (11), бачимо, що

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} \mu_a = \infty, \text{ а } \lim_{\beta \rightarrow 0} \mu_a = \eta, \quad (12)$$

тобто значення уявної в'язкості при $\beta \rightarrow 0$ наближаються до значень пластичної в'язкості. З

рівняння (5) також видно, що границя уявної швидкості зсуву $\Gamma = \frac{\tau_0}{\eta} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \left(1 - \frac{4}{3}\beta + \frac{1}{3}\beta^4\right)$ при

$\beta \rightarrow 0$ прямує до нескінченності $\lim_{\beta \rightarrow 0} \Gamma = \infty$, а при $\beta \rightarrow 1$ $\lim_{\beta \rightarrow 1} \Gamma = 0$ (див. рис. 4), тоді

$$\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} \mu_a = \eta, \text{ а } \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \mu_a = \infty. \quad (13)$$

Із врахуванням цих залежностей пропонується уявну в'язкість шукати за такою формулою:

$$\mu_a = a_1 e^{\frac{a_2}{\Gamma}}, \quad (14)$$

де a_1, a_2 – емпіричні коефіцієнти.

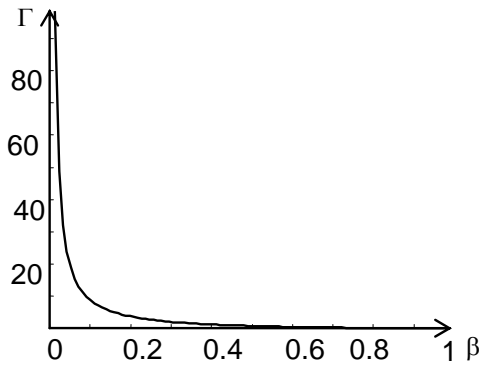


Рис. 4. Залежність уявної швидкості зсуву від β

Аналіз рівняння (14) показує, що при $\Gamma \rightarrow \infty$ μ_a прямує до a_1 , тобто коефіцієнт a_1 наближено і є пластичною в'язкістю, а при $\Gamma \rightarrow 0$ значення уявної в'язкості прямують до нескінченності ($\mu_a \rightarrow \infty$), тобто характер зміни уявної в'язкості за точною формулою (11) і наближеною формулою (14) аналогічний. Застосування формули (14) дає змогу достатньо просто оцінити значення пластичної в'язкості і відповідно граничного напруження зсуву за результатами вимірювання уявної в'язкості. За сигналами дифманометрів гідродинамічного пристрою за формулою (6) визначають значення уявної в'язкості при трьох різних значеннях уявної швидкості

зсуву Γ_1 . Далі за рівнянням (14) визначають значення коефіцієнта a_1 , що є оцінкою значення пластичної в'язкості, а також значення коефіцієнта a_2 . Оскільки уявна в'язкість наближається до пластичної при великих швидкостях зсуву, то точніші значення η отримують за сигналами двох мостових перетворювачів з меншими діаметрами трубок. Наприклад, якщо радіуси трубок мостових перетворювачів задовольняють нерівності $R_1 < R_2 < R_3$, то оцінку η^* значення пластичної в'язкості можна здійснити за формулою

$$a_1 = \eta^* = \mu_{a2} \cdot \left(\frac{\mu_{a1}}{\mu_{a2}}\right)^{\frac{1}{1-\Gamma_2/\Gamma_1}}, \quad (15)$$

де μ_{a1}, μ_{a2} – значення уявної в'язкості, розраховані за результатами вимірювання перепаду тиску в першому і другому мостових перетворювачах за формулою (6); Γ_1, Γ_2 – уявна швидкість зсуву рідини в трубках першого і другого мостового перетворювача відповідно. Для оцінки граничного напруження зсуву можна скористатись наближеною формулою

$$\tau_0^* = \frac{3}{4} \cdot (\tau_{w1} - \Gamma_1 \cdot \eta^*). \quad (16)$$

Похибка визначення η^* і τ_0^* за формулами (15) і (16) при швидкостях зсуву 500–1000 s^{-1} для бінгамівських рідин з різноманітним співвідношенням в'язкісних і пластичних властивостей не перевищує 10%. Визначені за формулами (15) і (16) значення пластичної в'язкості і граничного напруження зсуву, можна використати як початкові в алгоритмах для точного визначення цих параметрів. Реологічні параметри, виміряні за допомогою гідродинамічного пристрою при певній температурі, можна привести до заданої температури за алгоритмом, наведеним в роботі [14].

Гідродинамічний пристрій, побудований за схемою, показаною на рис. 3, можна також застосовувати для вимірювання параметрів рідин, що підпорядковуються трипараметричним реологічним моделям (модифікованій моделі Кесона, моделі Гершеля-Балклі тощо).

Висновки. Розглянуто схему гідродинамічного пристрою для вимірювання реологічних параметрів степеневих або бінгамівських рідин. Цей пристрій складається з трьох послідовно з'єднаних гідродинамічних мостових перетворювачів, які під час вимірювання працюють в режимі постійної витрати. Пристрій керування і обчислення призначений для періодичної перевірки наявності і врахування пристінних ефектів, а також для неперервного оброблення сигналів дифманометричних перетворювачів. Запропоновану в статті методику оцінювання пластичної в'язкості і граничного напруження зсуву можна застосовувати для забезпечення збіжності алгоритму встановлення реологічних параметрів бінгамівських рідин. У подальших дослідженнях необхідно розробити програму і перевірити запропонований алгоритм визначення реологічних параметрів степеневих та бінгамівських рідин за вихідними сигналами гідродинамічного пристрою та встановити допустимі межі вимірювання цих параметрів.

1. Steffe J.F. *Rheological methods in food process engineering*. – 1996. – 418 p. 2. Маслов А.М. *Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей*. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980. – 208 с. 3. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. *Инженерная реология пищевых материалов*. – М.: Лёг. и пищ. пром-сть, 1981. – 215 с. 4. Чанг Дей Хан. *Реология в процессах переработки полимеров*. – М.: Химия, 1979. – 368 с. 5. Eirich F.R. (editor) *Rheology. Theory and Applications*, V.II. Academic Press. – New York. 1958. p. 475-500. 6. Сибо К., Итиносэ Т., Катамура Д. *Коррекция капиллярного вискозиметра // Оё буцури*, 1982, т. 51, №2. – С. 241–245. 7. Пістун Е.П. *Теоретические основы построения и расчета газогидродинамических дроссельных измерительных преобразователей // Пневмоавтоматика*. – М., 1985, ч. 1. – С.104–105. 8. Пістун Є.П., Крих Г.Б. *Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць // Методи та прилади контролю якості*. 2000. № 5. – С. 56–59. 9. Пістун Є.П., Крих Г., Леськів Г. *Моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних схемах із постійною витратою // Наук.-техн. журн. “Методи та прилади контролю якості”*. Вип. № 10. – Ів.-Франківськ, 2003. – С. 87–89. 10. Крих Г. *Зменшення значень похибок вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин гідродинамічними мостовими перетворювачами // Наук.-техн. журн. “Методи та прилади контролю якості”*. Вип. № 13, Ів.-Франківськ, 2005. – С. 87–91. 11. Крих Г.Б. *Методика оброблення сигналів гідродинамічних вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів неньютонівських рідин // Теплоенергетика. Інженерія доккілля. Автоматизація. Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка”*, N 378 – Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1999. – С. 86–88. 12. Пістун Є.П., Крих Г.Б., Близняк Т.В. *Гідродинамічні вимірювальні перетворювачі реологічних параметрів поліграфічних матеріалів. Методи та прилади контролю якості // Наук.-техн. журн. Вип. № 5. – Ів.-Франківськ, 2002. – С. 62–66*. 13. Крих Г.Б. *Визначення реологічних параметрів томатних концентратів за допомогою гідродинамічного вимірювального пристрою // Наук.-техн. журн. “Методи та прилади контролю якості”*. Вип. № 9. – Ів.-Франківськ, 2002. – с. 75–78. 14. Крих Г.Б., Кіндер М.І. *Визначення концентрації сухих речовин томатних концентратів за їх реологічними параметрами // Теплоенергетика. Інженерія доккілля. Автоматизація. Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка”*. N 460 – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. – С. 117–122.