

ЗМЕНШЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН ГІДРОДИНАМІЧНИМИ МОСТОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

© Ганна Крих, 2005

Національний Університет "Львівська політехніка"

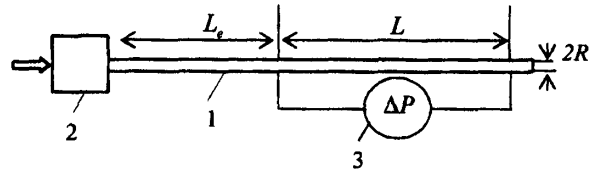
Розглянуто основні складові похибок вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин капілярними віскозиметрами. Показано способи їх компенсації і урахування при застосуванні гідродинамічних мостових перетворювачів з постійною витратою

Для неперервного вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин найбільшого поширення набули капілярні віскозиметри. Доцільність їх застосування в системах автоматизації багатьох технологічних процесів зумовлена суворими вимогами до показників якості продукції. Однією з важливих задач побудови трубних віскозиметрів неперервної дії є підвищення точності вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин.

Метою дослідження є аналіз основних джерел похибок капілярних віскозиметрів і розробка гідродинамічних перетворювачів з автоматичною компенсацією деяких складових похибок вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин.

Джерела похибок капілярних віскозиметрів детально розглянуто в роботах [1,2]. Одним з них є втрати кінетичної енергії внаслідок раптових змін в геометрії і відповідно зміни швидкості рідини у вхідній камері і вимірювальному капілярі. Ці втрати для ньютонівських рідин є незначними і їх дуже складно відокремити від втрат тиску від кінцевих ефектів вимірювального капіляру. Для неньютонівських рідин додаткові втрати тиску, які виникають на вході у вимірювальний капіляр і викликані звуженням потоку і втратами кінетичної енергії, можуть бути досить значними і повинні враховуватись. Втрати енергії на виході з капіляру внаслідок звуження або розширення потоку рідини є невеликими для в'язкісного режиму і ними звичайно нехтують порівняно з втратами тиску на вході в капіляр, однак вони є. Зменшення впливу вказаних ефектів можна досягти застосуванням достатньо довгого вимірювального капіляру. Вимірний перепад тиску на такому капілярі є значно більшим за додаткові втрати тиску від кінцевих ефектів. У віскозиметрі, показаному на рис. 1, відбір тисків в капілярі 1 на вимірювальній ділянці довжиною L здійснюється на відстані, що перевищує довжину

гідродинамічної входової ділянки L_e , на якій формується усталений режим руху. Відбір тиску до дифманометра 3 здійснюється на відстані, яка є більшою за ділянку входу L_e . Інша методика врахування додаткових втрат тиску від кінцевих ефектів, що запропонована Беглі [3,4], вимагає декількох вимірювань перепаду тиску на вимірювальних капілярах однакового діаметру з різним відношенням довжини до діаметру при різних значеннях об'ємної витрати рідини.



1 – вимірювальний капіляр; 2 – генератор витрати;
3 – дифманометр

Рис. 1 Принципова схема однокапілярного віскозиметра

Важливо зауважити, що значення витрати рідини в капілярі не повинне перевищувати критичного значення, інакше порушиться ламінарний режим руху і виникатимуть втрати тиску від турбулізації потоку.

Іншим джерелом похибки в капілярних віскозиметрах вважають в'язкісний нагрів, який виникає при будь-якому зсуві рідини. В роботі [1] наводиться спрощений метод оцінки цього явища. Вважається, що перепад тиску ΔP в капілярі з витратою F спричиняє таку роботу, яка викликає підвищення температури в потоці на величину

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho C_p}, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини; C_p – питома теплоємність. Наприклад, для рідини з густиною $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ і

питомою теплоємністю $C_p = 4000$ Дж/(кг·К) перепад тиску в 4 МПа викличе підвищення температури на 1 К. Якщо прийняти, що таке зростання температури не впливає на реологічні параметри неньютонівських рідин, то в'язкісним нагрівом можна знехтувати. Дослідження показують, що похибки вимірювання внаслідок в'язкісного нагріву необхідно враховувати для високов'язких рідин або у віскозиметрах, що працюють при надвисоких швидкостях зсуву [1].

В дисперсних (багатофазових) середовищах, які належать до неньютонівських, похибки вимірювання можуть виникати внаслідок пристінних ефектів. Поверхневі явища на границі розділу рідина-стінка спричиняють пристінне ковзання, яке полягає в тому, що в'язкість в тонкому шарі рідини біля стінки вимірювального капіляру віскозиметра є меншою від в'язкості рідини всередині потоку. Теоретично вплив пристінних явищ можна оцінити, якщо припустити, що за рахунок пристінного ковзання витрата у вимірювальному капілярі збільшується на деяку величину F_k , тобто

$$F_o = F + F_k, \quad (2)$$

де F_o загальна об'ємна витрата в капілярі. Якщо штучно ввести середню швидкість ковзання v_k , то рівняння (2) можна записати так:

$$F_o = F + \pi R^2 v_k; \quad (3)$$

де R – радіус капіляру.

В практиці реологічних досліджень використовують коефіцієнт пристінного ковзання, який визначають за формулою

$$s = \frac{v_k}{\tau}, \quad (4)$$

де $\tau = \frac{\Delta P R}{2L}$ – дотичне напруження на стінці

вимірювального капіляру; ΔP – перепад тиску в капілярі; L – довжина вимірювального капіляру. Експериментальними та теоретичними дослідженнями встановлено, що коефіцієнт ковзання s є функцією напруження зсуву на стінці і також обернено залежить від радіусу капіляру [5]. Враховуючи таку залежність, а також формулу (4), рівняння (3) представимо у вигляді

$$\frac{F_o}{\pi R^3 \tau} = \frac{F}{\pi R^3 \tau} + \frac{s}{R}. \quad (5)$$

Більш детальний аналіз показує, що для багатьох суспензій залежність між комплексом

$\frac{F_o}{\pi R^3 \tau}$ і $\frac{1}{R}$ є нелінійною. Якщо коефіцієнт

пристінного ковзання s скоригувати за формулою $s = \frac{s_k}{R}$, то рівняння (5) набуває вигляду

$$\frac{F_o}{\pi R^3 \tau} = \frac{F}{\pi R^3 \tau} + \frac{s_k}{R^2} \quad (6)$$

і залежність між $\frac{F_o}{\pi R^3 \tau}$ від $\frac{1}{R^2}$ для всіх значень дотичного напруження на стінці наближається до лінійної. Рівняння (6) є базовим для визначення коригованого коефіцієнта пристінного ковзання s_k . Він може бути оцінений з вимірювань на капілярах щонайменше з трьома різними діаметрами. На основі залежності $\frac{F_o}{\pi R^3 \tau}$ від τ при різних

значеннях радіуса будують залежність $\frac{F_o}{\pi R^3 \tau}$ від $\frac{1}{R^2}$ при постійному τ і визначають s_k як тангенс кута нахилу цієї прямої при кожному значенні τ (рис. 2). В результаті отримують залежність коефіцієнта пристінного ковзання s_k від дотичного напруження на стінці τ . З достатньою для практичних вимірювань точністю цю залежність можна прийняти лінійною (рис. 3) виду:

$$s_k = a_1 \tau + a_0. \quad (7)$$

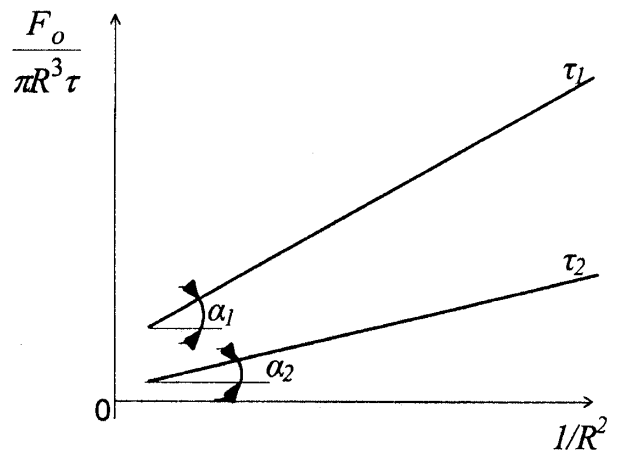


Рис. 2. Залежність $\frac{F_o}{\pi R^3 \tau}$ від $\frac{1}{R^2}$ при різних значеннях дотичного напруження на стінці капілярної трубки

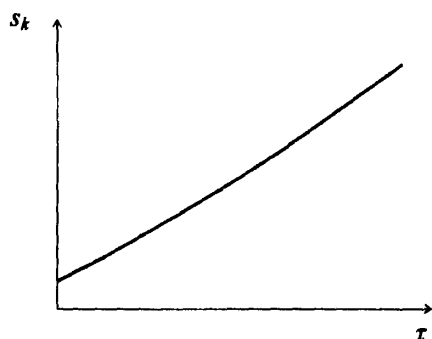


Рис. 3. Залежність коригованого коефіцієнта пристінного ковзання s_k від дотичного напруження на стінці капілярної трубки

Коригований коефіцієнт ковзання s_k застосовується для коригування об'ємної витрати в рівняннях витратних характеристик капілярних трубок таким чином:

$$F = F_o - s_k \tau \pi R. \quad (8)$$

Особливий інтерес для здійснення автоматичної компенсації методичних похибок представляють мостові гідродинамічні перетворювачі, що працюють в режимі постійної витрати рідини [7]. Побудовані відповідно до схеми, показаної на рис 4, вони складаються з чотирьох капілярів однакового внутрішнього діаметру, але різної довжини. В протилежних плечах мостової схеми розміщені капіляри однакової довжини. Довгі 2 і 3 та короткі 1 і 4 капіляри з'єднуються в мостову схему за допомогою входної 9, вихідної 10 та міжтрубних камер 6 і 7, до яких під'єднаний дифманометричний перетворювач 8. Довжини коротких капілярів L_k є достатніми для утворення повністю розвинутого руху. Об'ємна витрата рідини в усіх капілярах однакова, відповідно втрати тиску на вході і на виході кожної пари короткого та довгого капіляру, які зумовлені змінами кінетичної енергії і кінцевими ефектами, є однаковими. Різниця перепадів тиску на довгих і коротких капілярах формується автоматично в міжкапілярних камерах, не містить додаткових втрат тиску від вказаних ефектів і вихідний сигнал дифманометра не вимагає корегування на кінцеві ефекти. Вимірний дифманометром перепад тиску ΔP може бути використаний в рівняннях витратних характеристик мостового гідродинамічного перетворювача.

Витратна характеристика мостового гідродинамічного перетворювача з трубками радіусом R і різницею між довжинами довгих та коротких трубок ΔL для степеневих рідин має такий вигляд:

$$F = \frac{n\pi R^3}{3n+1} \cdot \left(\frac{\tau}{K} \right)^{1/n}, \quad (9)$$

а для бінгамівської рідини такий вигляд:

$$F = \frac{\pi R^3 \tau}{4\eta} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^4 \right], \quad (10)$$

де K, n, η, τ_0 – показник консистенції; показник нелінійності, пластична в'язкість, граничне напруження зсуву досліджуваної рідини відповідно.

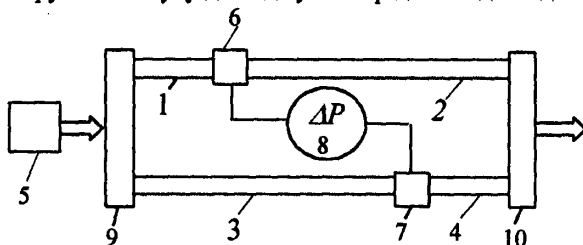


Рис. 4. Принципова схема гідродинамічного мостового перетворювача

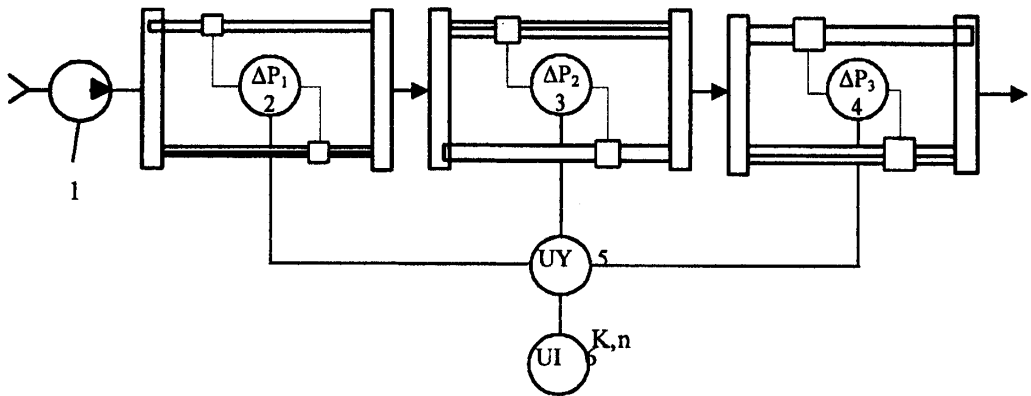
Для автоматичного вимірювання декількох взаємозв'язаних реологічних параметрів широкі можливості мають мостові вимірювальні системи, побудовані у вигляді послідовно з'єднаних мостових перетворювачів або у вигляді дросельних матриць, що працюють в режимі постійної витрати [8]. В матрицях застосовують вимірювальні капіляри різного діаметру та різних довжин, що дозволяє компенсувати додаткові втрати тиску на кінцеві ефекти. Для двопараметричних реологічних моделей (степеневі, бінгамівської) застосовують капіляри двох різних діаметрів. Для підвищення точності вимірювання реологічних параметрів доцільно будувати вимірювальні системи не менше, як на трьох мостових перетворювачах з різними внутрішніми діаметрами капілярів. Принципова схема такої системи показана на рис. 5.

Наявність пристінних ефектів в такій системі можна встановити таким чином. На основі вимірювань у вихідних діагоналях мостів різниць тиску $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ розраховують дотичне напруження на стінці вимірювальних капілярів в кожному мостовому перетворювачі:

$$\tau_i = \frac{\Delta P_i R_i}{2\Delta L_i}, \quad (11)$$

де $i = 1, 2, 3$ - номер мостового перетворювача, а також обчислюють значення комплексів

$$q_i = \frac{F_o}{\pi R_i^3 \tau_i}. \quad (12)$$



1 – задавач витрати; 2, 3, 4 – дифманометричні перетворювачі; 5 – пристрій обчислення реологічних параметрів; 6 – вимірвальний показуючий прилад

Рис. 5. Принципова схема гідродинамічної вимірвальної системи

Якщо всі три значення q_i збігаються з наперед заданою точністю, то можна констатувати відсутність впливу пристінних ефектів на виміряні значення перепаду тиску ΔP_i , які далі можуть використовуватись в рівняннях витратних характеристик мостових перетворювачів. Якщо розраховані значення q_i відрізняються, то необхідно змінити витрату живлення вимірвальної системи і опрацювати нові значення перепадів тиску за формулами (11) і (12). В результаті для кожного мостового перетворювача буде отримано дві пари значень q і τ . Апроксимуючи їх лінійним рівнянням, оцінюють залежність між q і τ в досліджуваному інтервалі дотичного напруження зсуву (рис. 6). Далі для трьох різних значень τ (наприклад, мінімального, максимального і середнього з них) за знайденими рівняннями знаходять відповідні їм значення комплексу q і для кожного обраного значення τ знаходять коефіцієнти лінійного рівняння a і b

$$q = a \frac{1}{R^2} + b. \quad (13)$$

Кожне значення коефіцієнта a є значенням коефіцієнта пристінного ковзання s_k при певному значенні дотичного напруження τ . На основі отриманих трьох значень s_k та трьох обраних значень τ знаходять коефіцієнти a_1 і a_0 лінійного апроксимуючого рівняння (7).

Значення s_k далі застосовують для автоматичної корекції об'ємної витрати F_o в

трубках кожного мостового перетворювача вимірвальної системи, показаної на рис. 5.

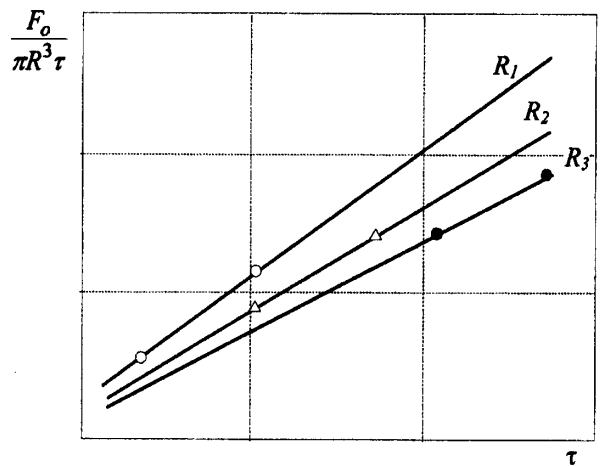


Рис. 6. Залежність розрахованих комплексів q від дотичного напруження на стінці вимірвальних трубок з різними радіусами

1. Steffe J.F. *Rheological methods in food process engineering*. – 1996. – 418 p. 2. Сибо К., Итин-осэ Т., Катамура Д. Коррекция капиллярного вискозиметра. - Оё буцури, 1982, т. 51, №2, С. 241-245. 3. Bagley E.B. End corrections in the capillary flow of polyethylene. *J.Appl.Phys.* 1957, 28:624-627. 4. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. – М.: Химия, 1979. – 368 с. 5. Jastrzebski Z.D. Entrance effects and wall effects in an extrusion rheometer during the flow of concentrated suspensions. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 6:1967, 445-454. 6. Toms B.A. *Fundamental techniques: fluids*. In: Eirich F.R. (editor) *Rheology. Theory and Applications, V.II. Academic*

Press, New York. 1958. p. 475-500. 7 A.c. 371478 СССР, М. Кл. G01n 11/08. Способ измерения вязкости / Е.П. Пистун, Л.П. Фабри, В.М. Кос, Л.П. Данельская. - №1689705/26-25; Заявл. 13.08.71; Опубл. 22.02.73, Бюл. № 12. 8. Пистун Е.П., Крих

Г.Б. Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць//Методи та прилади контролю якості. 2000. - №5. - С. 56-59.

УДК 658.562

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВАГОМОСТІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

© Столярчук П.Г., Бойко О.В., Куць В.Р., 2005
Національний університет „Львівська політехніка”

Запропоновано метод розрахунку коефіцієнтів вагомості при оцінюванні якості продукції. Наведено приклад визначення цих коефіцієнтів для показників якості цифрових вольтметрів

Питання про оцінювання якості продукції мабуть виникло із появою перших зразків продукції. Це питання є актуальним і сьогодні, адже споживач при купівлі продукції оцінює її. Питання якості цікавить і виробника продукції, оскільки він хоче виготовляти конкурентоспроможну продукцію. Особливо важливе місце оцінювання рівня якості продукції має в процесі управління якістю на виробництві.

На сьогоднішній день розроблено чимало методів оцінювання рівня якості продукції, але всі вони не позбавлені тих чи інших недоліків. Наша робота присвячена визначенню вагомості показників якості, тобто властивостей продукції.

Відомо, що певні властивості по різному впливають на загальну картину якості продукції, тому питання визначення вагомості показників якості є досить важливим.

Розроблено чимало способів визначення цих вагомостей або як їх називають, коефіцієнтів вагомості. Найчастіше використовується експертний спосіб.

В залежності від складності завдання і кваліфікації експертів існує ряд способів оцінювання вище згаданих коефіцієнтів. Найпростіший спосіб полягає у прямому розподілі коефіцієнтів, виходячи із умови, що їх сума дорівнює одиниці або 100%. Однак достатньо важко, навіть при високій кваліфікації експертів, виставити коефіцієнти в долях одиниці або у відсотках для кожного показника якості. Труднощі зростають із збільшенням кількості показників якості, перелік яких може складати кілька десятків. Відповідно і статистична достовірність оцінок вагових коефіцієнтів буде невеликою.

У іншому випадку експертів просять провести

ранжування, тобто впорядкувати досліджувані показники якості за ступенем впливу їх на якість продукції в порядку зростання або спадання. Сумарні оцінки вагових коефіцієнтів отримуються в результаті усереднення часткових рангів або із розрахунку за спеціальними формулами. Недолік такого підходу – сильне згладжування вагових коефіцієнтів тим більше, чим менша кількість показників якості розглядається.

Вважається, що експерт може порівнювати об'єкти (продукцію) між собою загалом, але не може виділити вклад окремих показників якості. Аргументація цього твердження полягає в тому, що люди не думають числами. При мисленні людиною використовуються образи, слова, але не числа. Експерт може порівняти два об'єкти, поставити їм оцінки у вигляді „добрий”, „задовільний”, „поганий”, впорядкувати кілька об'єктів за привабливістю, але не може стверджувати, у скільки разів або на скільки один об'єкт кращий від іншого.

Тому варто при допомозі експертів глобально порівнювати продукцію між собою, в результаті чого отримують впорядкування (ранжування) розглянутої продукції. Тоді можна визначити коефіцієнти окремих показників якості таким чином, щоб ранжування при допомозі певної (в першому наближенні – лінійної) функції по можливості точніше відповідало ранжуванню глобальному. Для знаходження коефіцієнтів вагомості використаємо процедуру регресійного аналізу, що використовується в експертно-статистичному методі.

Процедура визначення коефіцієнтів вагомості показників якості розпочинається із вибору номенклатури, тобто переліку самих показників якості. Вибір цієї номенклатури залежить від мети