

ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ МОСТОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

© Крих Г., 2005

The method of designing of hydrodynamic measuring transducers on the basis of bridge throttle circuits with the constant fluid flow is considered. The basic equations for a choice of their regime and constructive characteristics are resulted.

Гідродинамічні вимірювальні перетворювачі широко застосовуються для вимірювання параметрів рідин. У [1, 2] розроблені принципи побудови таких перетворювачів, які дають змогу синтезувати і описувати моделями вимірювальні перетворювачі реологічних параметрів неньютонівських рідин. Серед них широкі функціональні можливості мають перетворювачі, побудовані на мостових дросельних вимірювальних схемах, і насамперед ті, що працюють за постійної витрати. Однак недостатньо обґрунтований вибір режимних та конструктивних характеристик мостових перетворювачів може зумовити значні похибки вимірювання реологічних параметрів.

Мета роботи – розроблення методики проектування гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових вимірювальних схемах в режимі постійної витрати. У цій роботі розглянемо вимірювальні перетворювачі реологічних параметрів степеневих і в'язкопластичних рідин, які застосовуються в різноманітних галузях, зокрема в технологічних процесах харчової та переробної промисловості. Реологічна модель ступеневої рідини описується рівнянням Оствальда [3]

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

де τ – дотичне напруження зсуву; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву; K – показник консистенції; n – показник нелінійності, а в'язкопластичної рідини – рівнянням Бінгама:

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

де τ_0 – граничне напруження зсуву; η – пластична в'язкість.

Крім вищевказаних реологічних параметрів K , n і τ_0 , η , властивості неньютонівських рідин характеризують також ефективною в'язкістю неньютонівських рідин μ_{ef} , що визначається як відношення дотичного напруження зсуву τ до швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ рідини

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

і залежить від швидкості зсуву. Ефективна в'язкість ступеневої і в'язкопластичної рідини визначається відповідно формулами

$$\mu_{ef} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \times \dot{\gamma}^{n-1}; \quad (3)$$

$$\mu_{ef} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}. \quad (4)$$

Для вимірювання параметрів неньютонівської рідини можуть бути застосовані мостові вимірювальні перетворювачі, що складаються з капілярних трубок однакового діаметра, схема яких є паралельним з'єднанням однакових пар капілярних трубок [1]. Пари відрізняються лише порядком з'єднання довгої і короткої капілярних трубок. У мостову схему трубки з'єднані за допомогою вхідної 7, вихідної 8 і міжкапілярних камер 6, до яких під'єднаний перетворювач різниці тисків 5. Постійна витрата рідини забезпечується задавачем витрати. Принципова схема мостового гідродинамічного перетворювача показана на рис. 1.

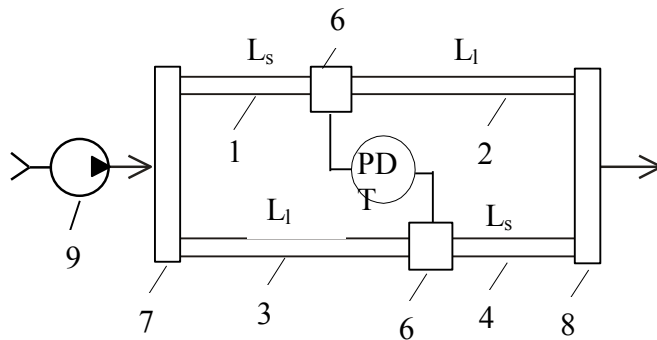


Рис. 1. Мостова вимірювальна схема гідродинамічного перетворювача:

- 1, 4 – короткі капілярні трубки завдовжки L_s ;
- 2, 3 – довгі капілярні трубки завдовжки L_l ;
- 5 – дифманометричний перетворювач;
- 9 – задавач постійної витрати

Розрахунок і проектування гідродинамічних мостових перетворювачів для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських систем найбільш успішно виконується на основі їх математичних моделей. Математична модель мостового перетворювача ґрунтується на математичних моделях окремих елементів (капілярних трубок), що становлять мостову схему [1, 2], і визначається реологічною поведінкою рідини. Так, для псевдопластичної рідини математична модель мостового перетворювача має вигляд [3]

$$F = \frac{n}{3n+1} \times \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \times \left(\frac{\Delta PD}{4\Delta L K} \right)^{1/n} \quad \text{або} \quad \tau_w = K \times \left(\frac{3n+1}{4n} \times \tilde{A} \right)^n, \quad (5)$$

де F – об'ємна витрата рідини в капілярній трубці;

D – внутрішній діаметр капілярних трубок;

ΔL – різниця між довжинами капілярних трубок в мостовому перетворювачі;

ΔP – перепад тиску в міжкапілярних камерах мостового перетворювача;

$\tilde{A} = \frac{32F}{\pi D^3}$ – уявна швидкість зсуву на стінці;

$\tau_w = \frac{\Delta PD}{4\Delta L}$ – дотичне напруження на стінці капілярної трубки.

Для бінгамівської рідини

$$F = \frac{\pi \Delta PD^4}{128\eta \Delta L} \times \left[1 - \frac{4}{3} \times \frac{4\Delta L}{\Delta PD} \tau_0 + \frac{1}{3} \times \left(\frac{4\Delta L}{\Delta PD} \tau_0 \right)^4 \right] \quad \text{або} \quad \tau_w = \eta \times \left(1 - \frac{4}{3} \beta + \frac{1}{3} \beta^4 \right) \times \Gamma, \quad (6)$$

де $\beta = \frac{\tau_0}{\tau_{cm}}$.

За перепадом тиску у вихідній діагоналі мостового перетворювача безпосередньо визначають уявну в'язкість μ_a , що так само, як і ефективна в'язкість, характеризує властивості неньютонівської рідини за певної швидкості зсуву

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\Gamma} = \frac{\Delta PD}{4\Delta L} \div \frac{32F}{\pi D^3} = \frac{\pi D^4}{128F \Delta L} \Delta P. \quad (7)$$

Уявна в'язкість, наприклад, степеневі рідини визначається за формулою

$$\mu_a = K \times \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \times \Gamma^{n-1}. \quad (8)$$

Враховуючи, що швидкість зсуву $\dot{\gamma}_w$ для степеневі рідини пов'язана з уявною швидкістю зсуву Γ залежністю $\dot{\gamma}_w = \frac{3n+1}{4n} \times \tilde{A}$, між уявною в'язкістю та ефективною в'язкістю існує такий зв'язок:

$$\mu_a = \frac{3n+1}{4n} \cdot \mu_{ef}. \quad (9)$$

У [1, 2] розглянуто схеми гідродинамічних вимірювальних перетворювачів, побудованих на базі мостових вимірювальних перетворювачів, що уможливають вимірювати реологічні параметри: показники консистенції K і нелінійності n степеневих рідин, граничне напруження зсуву τ_0 і пластичну в'язкість η в'язкопластичних рідини, ефективну та уявну в'язкість неньютонівських рідин.

Проектування гідродинамічних мостових вимірювальних перетворювачів полягає у визначенні продуктивності задавача витрати, у виборі граничного номінального перепаду тиску дифманометричного перетворювача; внутрішнього діаметра капілярних трубок; довжин всіх капілярних трубок. Вихідними даними для розрахунку гідродинамічних вимірювальних мостових перетворювачів є діапазон вимірювання реологічних параметрів, діапазон швидкості зсуву.

Математичні моделі (5) і (6) гідродинамічних мостових вимірювальних перетворювачів справедливі за умови забезпечення ламінарного (структурного) режиму руху неньютонівської рідини в капілярних трубках. Такий режим руху повинен дотримуватись за будь-яких змін значень реологічних параметрів в межах їх діапазонів вимірювання. Режим руху неньютонівських рідин (степеневих, в'язкопластичних) в капілярних трубках визначається за модифікованими числами Рейнольдса. Так, для степеневих рідин модифіковане число Рейнольдса визначається за формулою [3]

$$Re_p = \frac{4\rho F}{\pi D \mu_a} = \frac{D^n \rho}{8^{n-1} K} \left(\frac{4F}{\pi D^2} \right)^{2-n} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n. \quad (10)$$

Для бінгамівської рідини воно має вигляд [3]

$$Re_B = \frac{4\rho F}{\pi D \eta}, \quad (11)$$

де η – пластична в'язкість. За даними теоретичних та експериментальних досліджень інших авторів [4] режим руху в'язкопластичної рідини визначається за узагальненим числом Рейнольдса

$$Re_{Bg} = \frac{Re_B}{1 + He/(6Re_B)}, \quad (12)$$

що залежить від числа Хедстрема:

$$He = \frac{D^2 \tau_0 \rho}{\eta^2}. \quad (13)$$

З рівняння (10) зрозуміло, що із зменшенням K і n число Рейнольдса Re_p для степеневих рідин збільшується. Для в'язкопластичних рідин, як бачимо з рівнянь (11), (12), (13), числа Re_B , Re_{Bg} збільшуються із зменшенням пластичної в'язкості η і граничного напруження зсуву τ_0 .

Перехід від ламінарного до турбулентного режиму руху в капілярній трубці визначають за критичним числом Рейнольдса Re^{cf} і справедливість математичних моделей гідродинамічних перетворювачів забезпечується лише за виконання умов

$$\text{Re}_p(K, n) \leq \text{Re}_p^{\text{cr}}; \quad (14)$$

$$\text{Re}_B(\eta, \tau_o) \leq \text{Re}_B^{\text{cr}} \quad \text{або} \quad \text{Re}_{Bg}(\eta, \tau_o) \leq \text{Re}_{Bg}^{\text{cr}}, \quad (15)$$

де Re_p^{cr} – критичне число Рейнольдса для степеневі рідини; $\text{Re}_B^{\text{cr}}, \text{Re}_{Bg}^{\text{cr}}$ – критичні числа Рейнольдса для в'язкопластичної рідини. Умови (14), (15) повинні дотримуватись за будь-яких значень реологічних параметрів в межах їх вимірювання.

У таблиці наведені рівняння, що розглядаються у [3, 5], для розрахунку критичного числа Re_p^{cr} степеневих рідин. З цих рівнянь зрозуміло, що значення Re_p^{cr} залежить від показника нелінійності n .

Формули для визначення критичного числа Рейнольдса

№ з/п	Формула для визначення критичного числа Рейнольдса	Література
1	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = \frac{6464(2+n)^{(2+n)/(1+n)}}{(1+3n)^2}$	<i>Hanks, R. W. Laminar-turbulent transition of fluids with a yield stress. AIChE J., 1963, 9: 306-309.</i>
2	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = \frac{2100(4n+2)(5n+3)}{3(1+3n)^2}$	[3]
3	$\lg \text{Re}_p^{\text{cr}} = 2.627 + 0.692n$	[5]
4	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = \frac{808 \cdot 2^n (2n+1)^{(2+n)/(1+n)}}{n^{n-1} (3n+1)^{2-n}}$	[5]
5	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = \frac{64}{0.0125 + 0.018n}$	[5]
6	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = 3470 - 1370n$	[5]
7	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = \frac{1750(2n+1)(5n+3)}{(3n+1)(4n+1)}$	[5]
8	$\text{Re}_p^{\text{cr}} = 525 \cdot \frac{3n+1}{n}$	[5]

На рис. 2 показано залежності Re_p^{cr} від значення показника нелінійності n . З нього зрозуміло, що при $n=1$, як і слід очікувати, критичне число Re_p^{cr} становить 2100. З підвищенням n критичне число Re_p^{cr} , розраховане за формулою 1 таблиці, зростає і досягає максимального значення 2397 при $n=0.42$ і далі зменшується із зростанням n до 2100 при $n=1$. В інших запропонованих рівняннях 2, 5, 6, 7, 8 значення Re_p^{cr} зменшуються із збільшенням n , а в рівняннях 3, 4 – зростають. Рівняння 1, 2, 7, 8 в діапазоні $0.7 < n \leq 1$ дають дуже подібні результати.

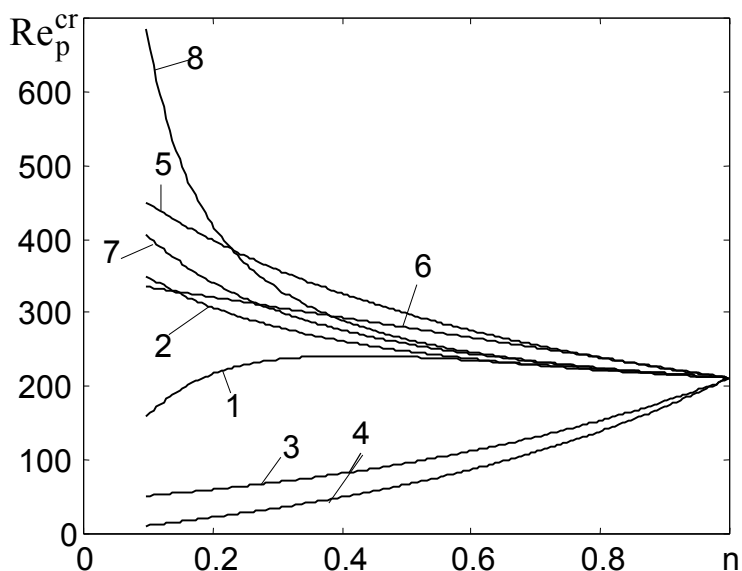


Рис. 2. Залежність критичного числа Рейнольдса для степеневих рідин від показника нелінійності n за відповідними формулами 1–8 таблиці

З рівняння (14) визначимо критичну витрату F^{cr} степеневі рідини, за якої ще зберігається ламінарний режим руху в капілярній трубці

$$F^{cr} = \frac{\pi D^2}{4} \left[\frac{8^{n-1} K}{D^n \rho} \cdot \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \cdot Re_p^{cr} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (16)$$

Аналіз цього рівняння з врахуванням залежності критичного числа Рейнольдса Re_p^{cr} від n показує, що із зменшенням показника нелінійності, показника консистенції, а також із зменшенням діаметра капілярної трубки значення критичної витрати зменшується. Вказані залежності проілюстровані рис. 3.

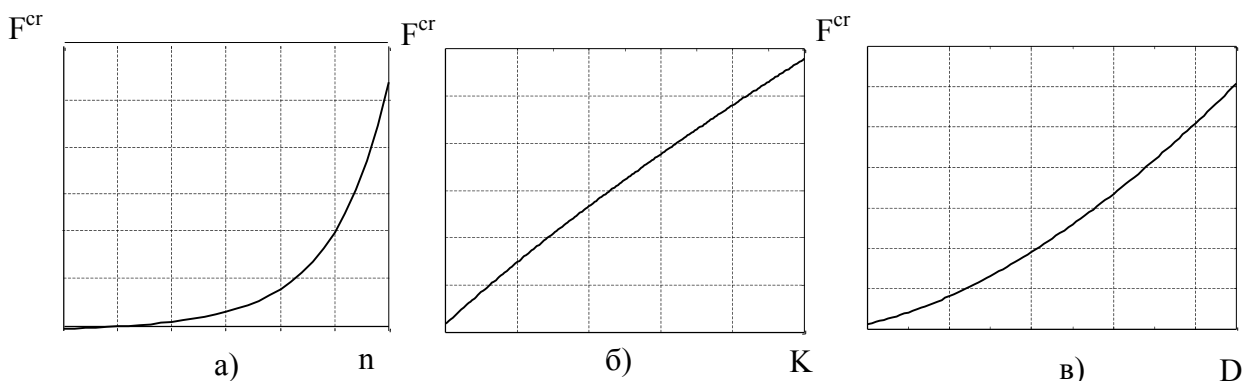


Рис. 3. Залежність критичної витрати степеневі рідини від: а – показника нелінійності; б – показника консистенції; в – діаметра капілярної трубки

Отже, рівняння (16) є основним для вибору продуктивності задавача витрати. Для забезпечення ламінарного режиму руху степеневі рідини в усіх діапазонах вимірювання K і n необхідно, щоб витрата рідини в капілярних трубках мостових перетворювачів задовольняла умову

$$F \leq \frac{\pi D^3}{32} \cdot \frac{4n_L}{3n_L+1} \cdot \left[\frac{700}{(Dn_L)^2} \cdot \frac{K_L}{\rho} \cdot (2n_L+1)(5n_L+3) \right]^{\frac{1}{2-n_L}} \quad (17)$$

де K_L, n_L – нижня межа вимірювання відповідно показників консистенції K та нелінійності n . (Для прикладу в рівнянні (17) критичне число Рейнольдса визначається з таблиці за формулою 2).

Для бінгамівських в'язкопластичних рідин критичне число Рейнольдса Re_B^{cr} залежить від числа Хедстрема [3]:

$$Re_B^{cr} = \frac{He}{8\beta^{cr}} \left(1 - \frac{4\beta_x}{3} + \frac{\beta_x^4}{3}\right), \quad (18)$$

де β^{cr} – критичне число $\beta = \frac{\tau_0}{\tau_w}$, що визначається за формулою

$$\frac{\beta^{cr}}{(1 - \beta^{cr})^3} = \frac{He}{16800}. \quad (19)$$

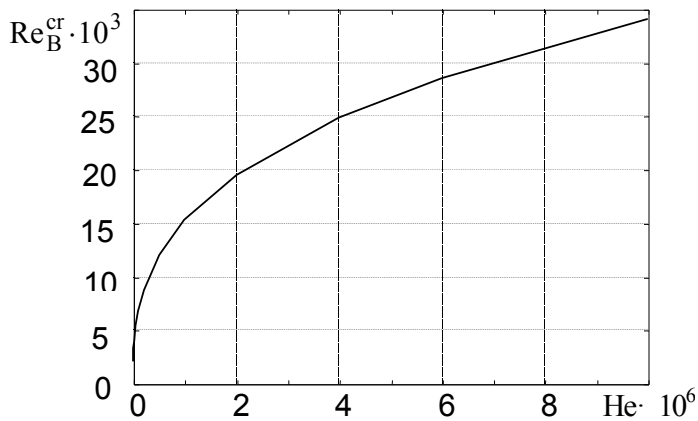


Рис. 4. Залежність критичного числа Рейнольдса від числа Хедстрема для в'язкопластичних рідин Бінгама

Зауважимо, що із збільшенням граничного напруження зсуву τ_0 число Хедстрема зростає, зростає також критичне значення β^{cr} і відповідно збільшується критичне число Рейнольдса Re_B^{cr} . З рис. 4 зрозуміло, що досягти турбулентного режиму руху в бінгамівських рідинах із значним граничним напруженням зсуву доволі складно. Однак із зменшенням граничного напруження зсуву Re_B^{cr} зменшується і при $\tau_0 = 0$ ($He=0$) досягає 2100, як для ньютонівських рідин.

На основі (11), (18) і (19) проаналізовані залежності критичної витрати від реологічних параметрів бінгамівської рідини і діаметра капілярної трубки. З рис. 5 зрозуміло, що із зменшенням граничного напруження зсуву τ_0 , пластичної в'язкості η , а також із збільшенням внутрішнього діаметра капілярної трубки значення критичної витрати зменшується.

За іншими даними [4] зміна режиму руху в'язкопластичної рідини відбувається тоді, коли узагальнене число Рейнольдса Re_{Bg}^{cr} досягає 2000. Характер залежностей критичної витрати від τ_0 , η і D , розрахованої за Re_{Bg}^{cr} , аналогічний до розрахованого за Re_B^{cr} , але значення F^{cr} в цьому випадку менше.

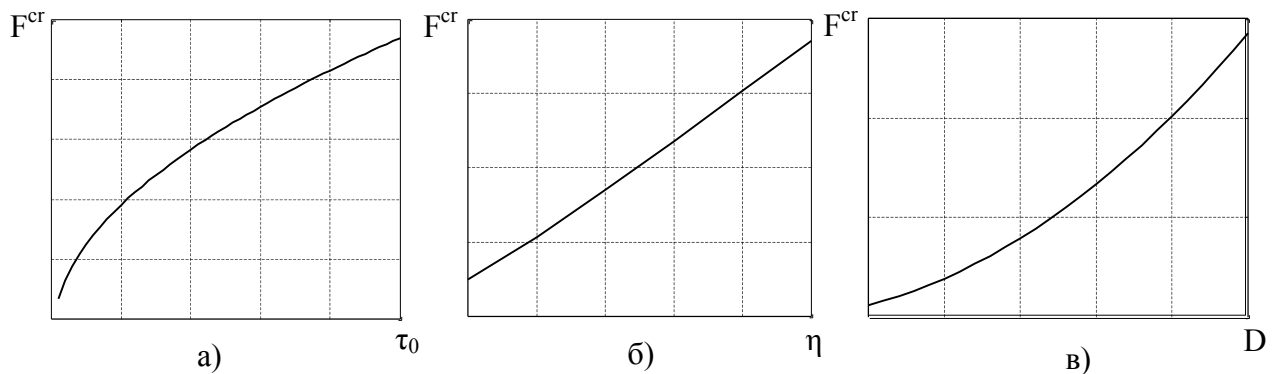


Рис. 5. Залежність критичної витрати в'язкопластичної рідини від: а – граничного напруження зсуву; б – пластичної в'язкості; в – діаметра капілярної трубки

Отже, основною умовою для знаходження витрати рідини в капілярних трубках мостового перетворювача реологічних параметрів в'язкопластичної рідини є:

$$F \leq \frac{\pi D \eta_L}{4 \rho} \cdot \text{Re}_B^{cr}(\tau_{0L}, \eta_L), \quad (20)$$

де τ_{0L}, η_L – нижня межа вимірювання відповідно граничного напруження зсуву і пластичної в'язкості. З рівнянь (17) і (20) зрозуміло, що витрата в капілярних трубках залежить від значень реологічних параметрів, а також від внутрішнього діаметра капілярної трубки.

Внутрішній діаметр D капілярних трубок мостового перетворювача і продуктивність задавача витрати визначаються з умови створення таких деформацій в рідині, що зустрічаються в умовах застосування неньютонівської рідини. Швидкість деформації наближено характеризується уявною швидкістю зсуву. Задаючись необхідною швидкістю зсуву Γ_s , вибирають такий діаметр капіляра і продуктивність задавача витрати $F_0 = 2F$, щоб задовольнялась рівність $\Gamma_s = \frac{64F_0}{\pi D^3}$ і одночасно виконувались нерівності (17) або (20).

Після визначення F_0 і діаметра D капілярних трубок розраховують їх необхідні довжини. Спочатку розраховують різницю ΔL між довжинами довгих та коротких капілярних трубок мостового перетворювача. Ця різниця визначається з рівнянь (5) або (6). Так, наприклад, для степеневі рідини

$$\Delta L = L_l - L_s = \frac{\Delta P_D D}{4K_H} \cdot \left(\frac{\pi D^3}{64F_0} \cdot \frac{4n_H}{3n_H + 1} \right)^{n_H}, \quad (21)$$

де ΔP_D – верхня границя вимірювання дифманометричного перетворювача; L_l, L_s – довжини відповідно довгих та коротких капілярних трубок; n_H, K_H – верхня межа вимірювання відповідно показників консистенції K та нелінійності n . Довжина коротких капілярних трубок в мостовому перетворювачі повинна бути більша за довжину гідродинамічної початкової ділянки L_e , на якій формується профіль швидкості рідини при її русі вздовж капілярної трубки від вхідної камери. Лише після проходження гідродинамічної початкової ділянки в капілярній трубці створюється стабілізований рух рідини і витратні характеристики мостового перетворювача описуються рівняннями (5) або (6). Якщо довжина коротких трубок в мостовому перетворювачі буде меншою за L_e , то в рівняннях (5) або (6) необхідно врахувати вплив від неповністю скомпенсованих втрат тиску на гідродинамічних початкових ділянках. Інформація про L_e є необхідною для вибору довжин капілярних трубок і відповідно габаритних розмірів мостового перетворювача.

Загальноприйнятим визначенням гідродинамічної ділянки входу вважається така довжина трубки, на якій на 98 % формується повністю розвинутий потік. На основі експериментальних і теоретичних досліджень, опублікованих в [3], отримано наближене рівняння для розрахунку ділянки входу для ньютонівських рідин

$$\frac{L_e}{D} = 0,55 + 0,055 \text{Re}, \quad (22)$$

де D – внутрішній діаметр капілярної трубки. Константа 0,55 враховує ефект входу за дуже малих значень Re . Для критичного числа $\text{Re}^{cr} = 2100$ $L_e = 116,05 D$.

Рівняння довжини ділянки входу для степеневих рідин і бінгамівських пластичних рідин виражається в інших математичних термінах. Для псевдопластичних рідин довжина вхідної ділянки визначається через модифіковане число Рейнольдса (10) [6] з рівняння

$$\frac{L_e}{D Re_p} = 8^{n-1} \cdot (0.175 - 0.125n) \cdot \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n. \quad (23)$$

Побудована за цим рівнянням залежність $\frac{L_e}{D Re_p}$ від показника нелінійності n показана на рис. 6. З графіка бачимо, що із зростанням n довжина ділянки входу зростає. Максимальна довжина вхідної ділянки при $n=1$ дорівнює $105 D$.

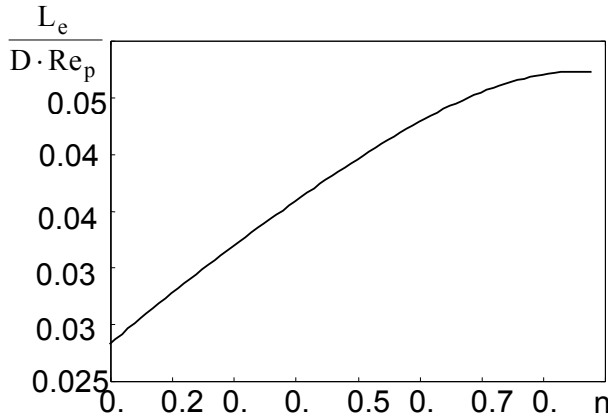


Рис. 6. Залежність $\frac{L_e}{D \cdot Re_p}$ від показника нелінійності n

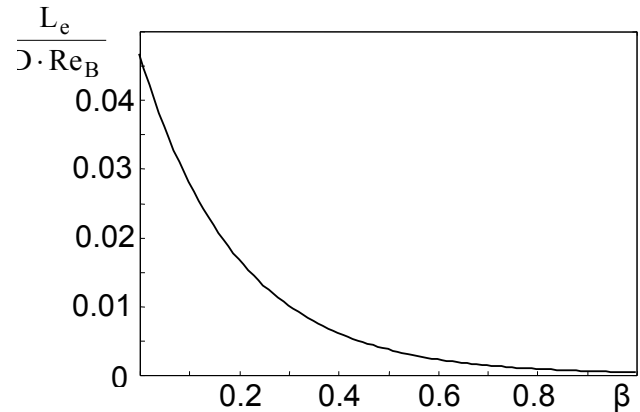


Рис. 7. Залежність $\frac{L_e}{D \cdot Re_B}$ від β для бінгамівських рідин

Для бінгамівських рідин за даними [7] довжину початкової ділянки визначають з рівняння

$$\frac{L_e}{D Re_B} = 0,0476 e^{-5,125\beta}. \quad (23)$$

При $\beta = 0$, для якого $Re_B^{cr} = 2100$, довжина вхідної ділянки $L_e = 99,96 D$.

За цим рівнянням побудований графік, показаний на рис. 7, з якого зрозуміло, що довжина вхідної ділянки зменшується із збільшенням граничного напруження зсуву. Отже, довжина L_s коротких капілярних трубок в мостовому перетворювачі повинна бути більшою за гідродинамічну початкову ділянку L_e :

$$L_s \geq L_e. \quad (24)$$

Експериментальними дослідженнями встановлено [3], що для багатьох степеневих і в'язкопластичних рідин, довжина ділянки входу у 90 діаметрів є достатньою для мінімізації додаткових втрат тиску на гідродинамічній початковій ділянці. Зрозуміло, що довжина L_1 довгих капілярних трубок визначається з рівняння

$$L_l = L_s + \Delta L. \quad (25)$$

Псевдопластичні та бінгамівські рідини описуються двопараметричними моделями. Тому для вимірювання їх реологічних параметрів необхідно застосовувати гідродинамічні пристрої, що складаються не менше, як з двох мостових перетворювачів з різними діаметрами капілярних трубок. У [8] показано, що для встановлення реологічної моделі неньютонівської рідини та автоматичного вимірювання її параметрів найбільш доцільно застосувати гідродинамічну вимірювальну систему, побудовану на базі трьох послідовно з'єднаних мостових перетворювачів. Її принципова схема показана на рис. 8.

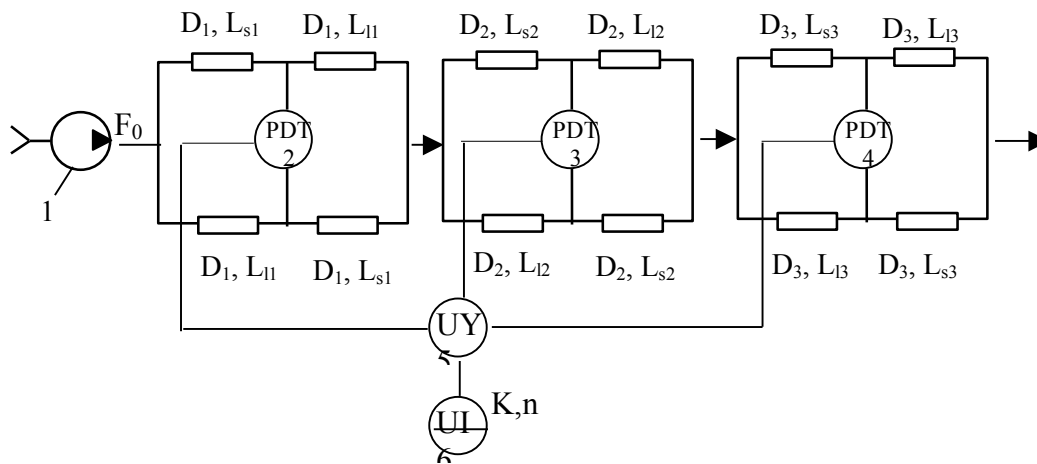


Рис. 8. Принципова схема гідродинамічної вимірювальної системи:
 1 – задавач постійної витрати; 2, 3, 4 – дифманометричні перетворювачі;
 5 – пристрій обчислення реологічних параметрів;
 6 – вимірювальний прилад

Для такої вимірювальної системи продуктивність задавача витрати 1 вибирається з умови забезпечення ламінарного режиму руху в мостовому перетворювачі з найменшим діаметром капілярних трубок D_i . Тоді, як це бачимо з рис. 3, в і 5, в трубах з більшим діаметром ламінарний рух буде стійкішим. Очевидно також, що із збільшенням діаметра зростатимуть і довжини капілярних трубок. Для зменшення габаритних розмірів мостових перетворювачів можна підібрати дифманометричні перетворювачі з меншою верхньою межею вимірювання ΔP_D .

Отже, вимірювальна система, спроектована за вищевикладеною методикою, може забезпечити вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин з вищою точністю за рахунок вилучення методичних складових похибок, зумовлених порушенням ламінарного режиму руху та наявністю нестабілізованого руху рідини на вході в капілярні трубки. Побудова вимірювальних систем на базі трьох мостових перетворювачів уможливить також автоматично вилучати складову похибки вимірювання, зумовлену пристінним ковзанням, що і стане предметом подальших досліджень.

1. Пістун Є.П., Крих Г.Б. Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць // Науково-технічний журнал "Методи та прилади контролю якості". – Ів.-Франківськ, 2000. – Вип. № 5. – С. 56–59. 2. Пістун Є.П., Крих Г., Леськів Г. Моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних схемах із постійною витратою / Науково-технічний журнал "Методи та прилади контролю якості". – Ів.-Франківськ, 2003. – Вип. № 10. – С. 87–89. 3. James. F. Steffy Rheological methods in food process engineering. – 1996. 4. Мирзаджанзаде А.Х. Гідродинаміка вязкопластичних жидкостей. – М., 1959. 5. Лещій Н., Желяк В. Перехід від ламінарного до турбулентного руху для чисто в'язких степеневих рідин / Вісник НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація". – 2000. – № 404. 6. Collins M. And W.R. Schowalter. Behavior of non-Newtonian fluids in the entry region of pipe. *AIChE J.*, 1963, 9: 804–809. 7. Michiyosi L., K. Mizuno and Y. Hoshiai Studies on the flow of slurries through pipe. Entrance Region of laminar flow. *Int.Chem. Engn.*, 1966, 6:373–381. 8. Крих Г.Б. Визначення реологічних параметрів томатних концентратів за допомогою гідродинамічного вимірювального пристрою / Науково-технічний журнал "Методи та прилади контролю якості". – Ів.-Франківськ, 2002. – Вип. № 9. – С. 75–78.