ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 681.2:532.137

ЗВЕДЕННЯ ВИТРАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІДИН ДО ЗАДАНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Є.П. Пістун, Г.Б. Крих

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (8-0322) 72-77-61

Показано, що витратні характеристики вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів рідин залежать від температури і існує необхідність представляти ці параметри зведеними до заданої температури. Запропонований метод зведення реологічних параметрів рідин до заданої температури, які виміряні за допомогою мостового гідродинамічного перетворювача.

Показано, что расходные характеристики измерительных преобразователей реологичных параметров жидкостей зависят от температуры и существует необходимость представлять эти параметры зведенными к заданной температуре. Предложен метод сводки реологичных параметров жидкостей к заданной температуре, измеренных с помощью мостового гидродинамического преобразователя.

It is rotined that expense descriptions of measurings transformers of reologic parameters of liquids depend on a temperature and there is a necessity to present these parameters erected to the set temperature. The method of report of reologic parameters of liquids, measured by a bridge hydrodynamic transformer to the set temperature is offered.

В багатьох технологічних процесах неньютонівські рідини застосовуються в умовах змінних температур. Для розв'язання деяких технологічних проблем, що стосуються транспортування неньютонівських матеріалів, наприклад, таких, що потребують визначення профілю швидкостей рідин чи зниження тиску під час руху рідини в трубопроводі при різних температурах, необхідно неперервно вимірювати реологічні параметри [1]. Реологічні параметри, виміряні при змінних значеннях температури, очевидно теж будуть змінюватись, що ускладнює аналіз реологічної поведінки речовини. Тому в практиці неперервних вимірювань за відсутності систем термостабілізації контрольованого середовища застосовують зведення виміряних значень реологічних параметрів до заданої температури.

Для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин в широкому діапазоні швидкостей зсуву широко застосовують гідродинамічні вимірювальні перетворювачі [2]. Серед них, внаслідок простоти і надійності, найпоширенішими є перетворювачі, побудовані за мостовою вимірювальною схемою, які працюють в режимі постійної витрати. Основним чутливим елементом таких гідродинамічних вимірювальних перетворювачів є циліндрична трубка круглого поперечного перерізу.

Для отримання витратної характеристики мостового гідродинамічного перетворювача, схема якого показана на рис. 1, застосовують узагальнене рівняння [3]

$$\Gamma = \frac{4}{\tau_w^3}\int_0^{\tau_w}\tau^2 f(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

де $\Gamma = \frac{4F}{\pi R^3}$ – уявна швидкість зсуву; F – об'ємна витрата рідини в трубці; R – внутрішній радіус трубок мостового перетворювача; τ –

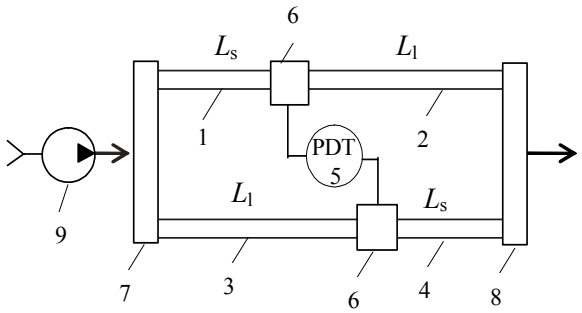
напруження зсуву всередині рідини; $\tau_w = \frac{\Delta PR}{2\Delta L}$ – напруження зсуву на стінці; ΔP – перепад тиску у вихідній діагоналі мостового перетворювача; $\Delta L = L_l - L_s$ – різниця довжин трубок; $\dot{\gamma} = f(\tau)$ – реологічна модель неньютонівської рідини, що встановлює зв'язок між швидкістю зсуву $\dot{\gamma}$ та напруженням зсуву τ. Рівняння (1) є універсальним для неньютонівських рідин різноманітної реологічної поведінки [1, 3].

Уявна в'язкість рідин μ_a, що є відношенням напруження зсуву на стінці τ_w до уявної швидкості зсуву *Г*, тобто

$$\mu_a = f(\Gamma, T) = \tau_w / \Gamma, \qquad (2)$$

залежить від швидкості зсуву і звичайно від температури. Вплив температури на в'язкість для ньютонівських рідин може бути виражений рівнянням Ареніуса [1], що містить в собі абсолютну температуру *T*, універсальну газову сталу *R* та енергію активації E_a:

$$\mu = f(T) = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \qquad (3)$$



1,4 – короткі трубки довжиною L_s;2,4 – довгі трубки довжиною L_l; 5 – дифманометричний перетворювач; 6 – міжтрубні камери; 7,8 – вхідна в вихідна камери;9 - задавач витрати

Рисунок 1 – Мостова вимірювальна схема гідродинамічного перетворювача

Коефіцієнти E_a та *A* визначаються на основі експериментальних даних. Таким чином при зміні температури витратні характеристики мостового гідродинамічного перетворювача для однієї і тої ж самої рідини будуть різними.

В практиці реологічних досліджень полімерних матеріалів, харчових матеріалів тощо багатьма авторами [1,4] застосовувався принцип температурної суперпозиції, в результаті чого отримують так звані температурно-інваріантні криві потоку, які в певному діапазоні зміни температури представляють собою одну криву. Така температурна суперпозиція виявилась досить цінним методом для вивчення властивостей неньютонівських речовин.

Метою роботи є розробка методу зведення до заданої температури витратних характеристик мостових гідродинамічних вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів неньютонівських рідин, що підпорядковуються різним реологічним моделям. Такі характеристики дадуть можливість визначати значення реологічних параметрів рідин, зведених до певної температури.

Суть розробленого методу полягає в тому, що визначають значення уявної в'язкості при однаковому, наперед обраному значенні уявної в'язкості, але при різних температурах. Ці значення уявної в'язкості використовують для розрахунку коефіцієнта зміщення, що є їх відношенням до значення уявної в'язкості при температурі, до якої планується зводити витратну характеристику. Далі визначають значення уявної в'язкості, зведене до заданої температури, шляхом ділення уявної в'язкості при деякій температурі до значення коефіцієнта зміщення при цій температурі. Знайдені зведені значення уявної в'язкості використовуються для побудови витратних характеристик, зведених до заданої температури.

Метод зведення витратних характеристик до заданої температури проілюстрований на прикладі експериментальних даних з дослідження реологічних параметрів концентрованого апельсинового соку при чотирьох значеннях температури (-18,8°С; -5,4°С; 9,5°С; 29,2°С) [1]. Він полягає в наступному:

1) за експериментальними даними будують графіки залежності уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву та температури. Вони показані на рис. 2;

2) для кожного значення температури визначають значення уявної в'язкості μ_{ai} ($i = \overline{1;4}$) при певному (базовому) значенні уявної швидкості зсуву. В прикладі базовим значенням вибране *Г*=20 $с^{-1}$. Температурою зведення може бути будь-яке значення з досліджуваного діапазону температур. Приймемо значення температури 9,5 °С за температуру зведення, яке буде використане для побудови температурно-інваріантної витратної характеристики;

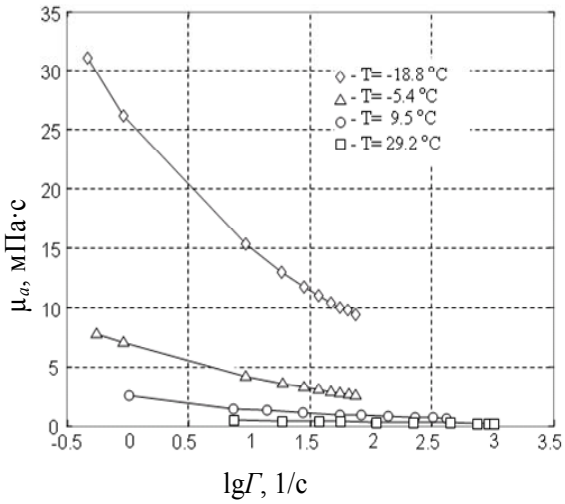


Рисунок 2 – Залежність уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву та температури

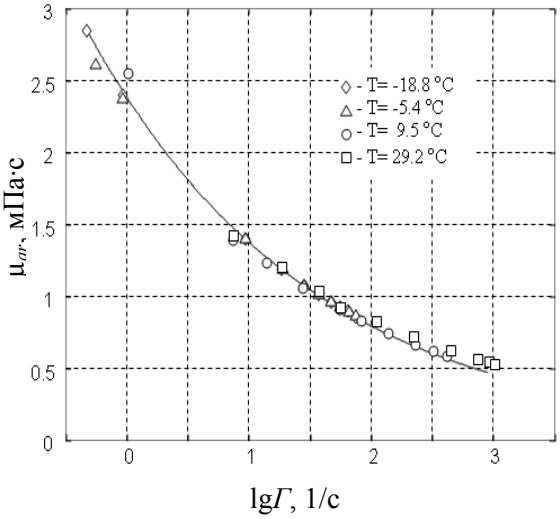


Рисунок 3 – Залежність зведених значень уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву

3) знаходять значення коефіцієнта зміщення α_i як відношення значень уявної в'язкості, визначених в п. 2 до значення уявної в'язкості μ_{a3} при температурі 9,5°С, тобто $\alpha_i = \mu_{ai} / \mu_{a3}$;

4) значення уявної в'язкості μ_{ar}, зведені до заданої температури, визначають як відношення значень в'язкості при виміряній температурі до коефіцієнта зміщення α_i при цій температурі, тобто $\mu_{ar} = \mu_a / \alpha_i$. Така операція призводить до переміщення кривих уявної в'язкості по вертикалі, внаслідок чого вони утворюють температурно-інваріантну залежність уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву, яка показана на рис. 3. Суцільною лінією на рис. 3 показана зміна уявної в'язкості при температурі 9,5 °С. Експериментальні дані та результати розрахунку зведених значень в'язкості наведені в табл. 1;

5) далі визначають напруження зсуву на стінці циліндричної трубки $\tau_{wr} = \mu_{ar} \cdot \Gamma$, тобто отримують витратну характеристику, яка показана на рис. 4 і в певному діапазоні зміни температур представляє собою одну криву.

Таблиця 1 – Результати розрахунку значень уявної в'язкості, зведених до заданої температури

T=-18.8 °C			T=-5.4 °C			T=9.5 °C			T=29.2 °C		
α_1 =10.8912			α_2 =2.9471			α_3 =1.0000			α_4 =0.3378		
μ_{a1} = 12.7202			μ_{a2} = 3.4420			μ_{a3} = 1.1679			μ_{a4} = 0.3946		
μ_a, мПа·с	Γ, c^{-1}	μ_a/α_1, мПа·с	μ_a, мПа·с	Γ, c^{-1}	μ_a/α_2, мПа·с	μ_a, мПа·с	Γ, c^{-1}	μ_a/α_3, мПа·с	μ_a, мПа·с	Γ, c^{-1}	μ_a/α_4, мПа·с
31.024	0.46	2.849	7.695	0.56	2.611	2.548	1.02	2.548	0.479	7.52	1.417
26.177	0.93	2.404	6.980	0.93	2.368	1.388	7.42	1.388	0.404	18.80	1.197
15.286	9.28	1.404	4.124	9.31	1.399	1.229	13.91	1.229	0.348	37.61	1.031
12.948	18.57	1.188	3.511	18.62	1.192	1.060	27.83	1.060	0.310	56.41	0.918
11.749	27.85	1.079	3.175	27.94	1.077	0.903	55.65	0.9040	0.277	112.82	0.819
10.988	37.13	1.009	2.983	37.25	1.012	0.831	83.48	0.831	0.242	225.63	0.715
10.425	46.42	0.957	2.833	46.56	0.961	0.742	139.14	0.742	0.210	451.27	0.619
9.981	55.70	0.916	2.715	55.87	0.921	0.663	231.89	0.663	0.188	752.11	0.558
9.775	64.98	0.898	2.628	65.19	0.892	0.615	324.65	0.615	0.181	940.14	0.535
9.325	74.26	0.856	2.542	74.50	0.862	0.582	417.41	0.582	0.177	1034.15	0.524

В розглянутому прикладі реологічна поведінка рідини описується степеневою моделлю

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \qquad (5)$$

де K – показник консистенції, n – показник нелінійності (або індекс потоку). Уявна в'язкість цієї рідини визначається за формулою

$$\mu_a = K\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \Gamma^{n-1}. \qquad (6)$$

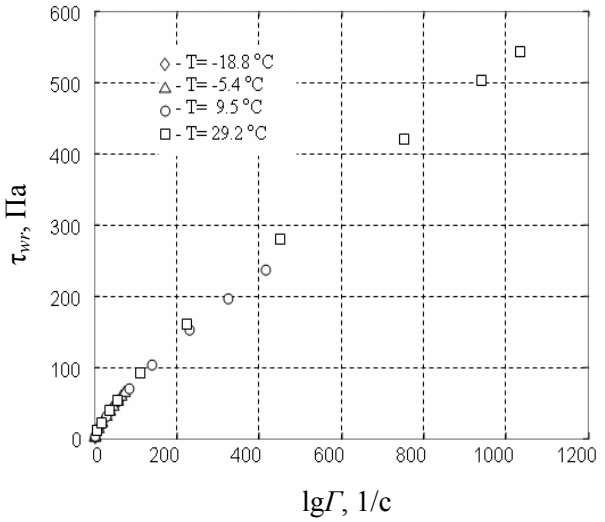


Рисунок 4 – Витратна характеристика, зведена до заданої температури

Теоретичний аналіз отриманих витратних характеристик мостових гідродинамічних перетворювачів параметрів степеневих рідин показує, що похибка зведення витратних характеристик до заданої температури тим менше, чим менша залежність показника нелінійності від температури. Дослідження реологічних властивостей багатьох матеріалів, зокрема харчових, які описуються степеневою моделлю, показують незначні зміни показника нелінійності від температури [1]. Так, для соку, на прикладі якого проілюстрований метод, показник нелінійності змінювався в межах 0,762÷0,797 при зміні температури від -18,8 ^{0}C до 29,2 ^{0}C. Вплив температури на реологічну поведінку позначається переважно на зміні показника консистенції K. В розглянутому прикладі у вказаному діапазоні температур K зменшується від 24,37 Па·с до 0,69 Па·с, відповідно й уявна в'язкість μ_a зменшується з 31,024 Па·с до 0,177 Па·с.

Витратна характеристика, зведена до заданої температури, має вигляд

$$\tau_{wr} = \mu_{ar}\Gamma = K_r\left(\frac{3n_r+1}{4n_r}\right)^{n_r}\Gamma^{n_r}$$

або

$$\Gamma = \left(\frac{\tau_{wr}}{K_r}\right)^{\frac{1}{n_r}}\frac{4n_r}{3n_r+1}, \qquad (7)$$

де μ_{ar} – зведена уявна в'язкість; n_r, K_r – значення реологічних параметрів степеневої рідини при температурі зведення.

Зведена уявна в'язкість в рівнянні (7) визначається за формулою

$$\mu_{ar} = \frac{\mu_a}{\alpha}, \qquad (8)$$

звідки $\mu_a = \mu_{ar}\alpha$.

Вплив температури на уявну в'язкість степеневої рідини можна змоделювати, застосовуючи як і для ньютонівських рідин рівняння Ареніуса (3). Тоді коефіцієнт зміщення α визначатиметься за формулою

$$\alpha = f(T) = A\exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \qquad (9)$$

Для розглянутого вище прикладу залежність коефіцієнта α від температури підпорядковуються рівнянню (3) і показана на рис. 5.

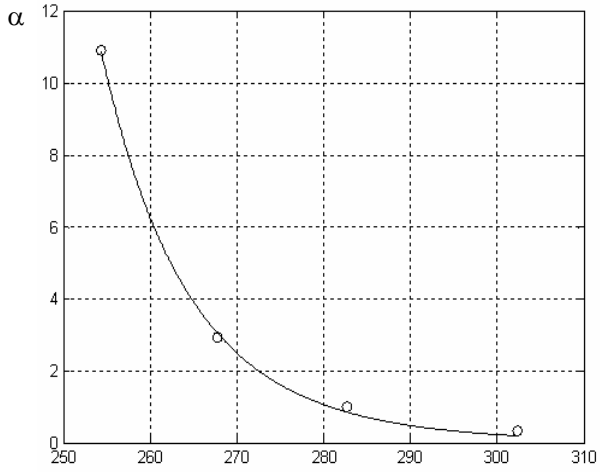


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта зміщення α від температури

Запропонований метод може бути застосований також і до в'язкопластичних рідин. Нижче показані результати зведення витратних характеристик для томатів, що

описуються реологічною моделлю Балклі-Гершеля [5]:

$$\tau = \tau_0 + K_1 \dot{\gamma}^n, \qquad (10)$$

де K_1, τ_0, n – реологічні параметри рідини, а саме: показник консистенції, показник нелінійності та граничне напруження зсуву. Рівняння витратної характеристики мостового гідродинамічного перетворювача для вказаної рідини має такий вигляд [6]:

$$\Gamma = \frac{4n}{n+1}\left(\frac{\tau_0}{K_1}\right)^{1/n}\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^3\left(\frac{\tau_w}{\tau_0}-1\right)^{1+1/n} \times \times\left[\left(\frac{\tau_w}{\tau_0}\right)^2 - \frac{2n}{3n+1}\left(\frac{\tau_w}{\tau_0}-1\right)^2 - \frac{2n}{2n+1}\left(\frac{\tau_w}{\tau_0}-1\right)\right]. \qquad (11)$$

За результатами експериментальних досліджень томатів із вмістом сухих речовин 20 % [7] були визначені значення реологічних параметрів моделі (10) при різних значеннях температур, що показані в табл. 2. За цими даними були розраховані витратні характеристики мостового гідродинамічного перетворювача, які показані на рис. 6, а відтак - значення уявної в'язкості при 20^0C, $40\ ^0$C і $60\ ^0$C (рис.5). Далі за пунктом 2 методу визначались значення уявної в'язкості при базовому значенні уявної швидкості зсуву $\Gamma = 50\ \text{с}^{-1}$. Значення коефіцієнта зміщення α відповідно до значень температури становлять 1; 0,6087; 0,2542, які далі застосовувались для розрахунку значень уявної в'язкості, зведених до температури $20\ ^0$C. Розрахована витратна характеристика мостового перетворювача, зведена до заданої температури, показана на рис. 8. Залежність всіх зведених значень уявної в'язкості від уявної швидкості показана на рис. 9.

Таблиця 2 – Реологічні параметри томатів

T, ^{0}C	20	40	60
K_1	11	7	3
n	0,32		
τ_0, Па	25	14	5,3

Як видно з табл. 2, вплив температури для досліджуваної в'язкопластичної рідини виявляється на зміні показника консистенції K_1, а також граничного напруження зсуву τ_0, тоді як значення показника нелінійності від температури не залежать. Такі особливості реологічної поведінки зумовлюють невелику похибку зведення значень уявної в'язкості до заданої температури, а отже забезпечують в певному діапазоні температур отримання витратних характеристик, суміщених в одну криву.

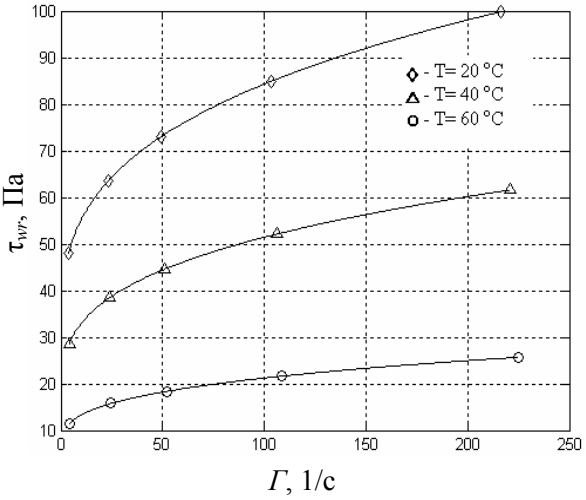


Рисунок 6 – Витратні характеристики для томатів при різних температурах

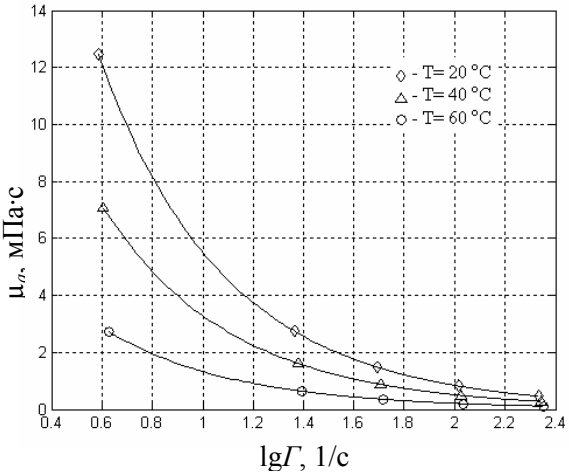


Рисунок 7 – Залежність уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву та температури

Розроблений емпіричний метод реалізує принцип температурної суперпозиції і забезпечує побудову витратних характеристик для багатьох рідких неньютонівських речовин. Таким чином, якщо відома уявна в'язкість, то кінцеву модель, яка забезпечує визначення зведеної витратної характеристики в певному діапазоні температур для будь-якої неньютонівської рідини, можна представити у такому вигляді:

$$\tau_{wr} = \mu_a \cdot \alpha(T) \cdot \Gamma \quad \text{або} \quad \Gamma = \frac{\tau_{wr}}{\mu_a \cdot \alpha(T)}. \qquad (12)$$

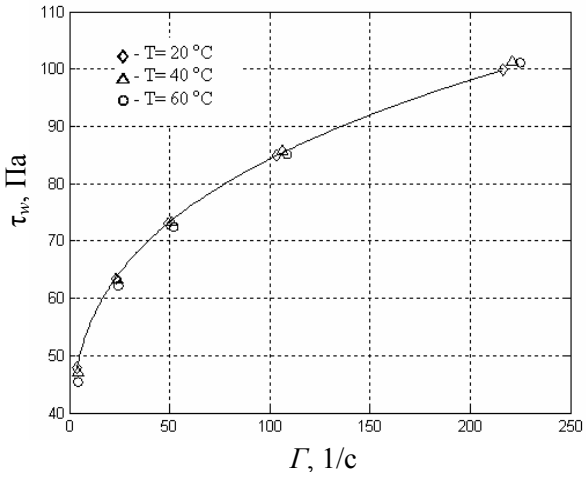


Рисунок 8 – Витратна характеристика, зведена до температури 20 °С

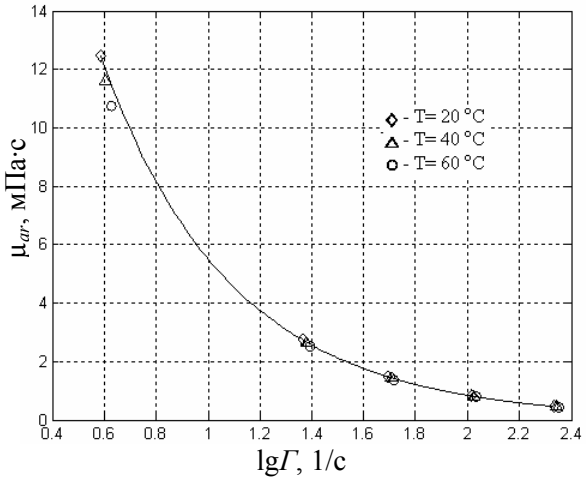
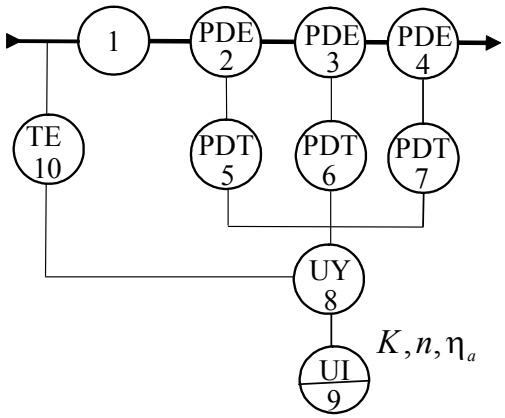


Рисунок 9 – Крива залежності зведеної уявної в'язкості від уявної швидкості зсуву

Розглянемо принцип роботи гідродинамічного пристрою для вимірювання параметрів степеневої рідини, схема і робота якого розглянута в роботі [6]. Цей пристрій, схема якого показана на рис. 10, працює в режимі постійної витрати, тому уявна швидкість зсуву в мостових перетворювачах 2, 3, 4, які відрізняються внутрішнім діаметром трубок, становлять відповідно Γ_1, Γ_2, Γ_3. В обчислювальному пристрої на основі виміряних значень перепадів тиску у вихідних діагоналях мостових перетворювачів розраховуються значення дотичного напруження зсуву на стінці $\tau_{w1}, \tau_{w2}, \tau_{w3}$ і за формулою (2) визначають значення уявної в'язкості $\mu_{a1}, \mu_{a2}, \mu_{a3}$ при Γ_1, Γ_2, Γ_3 і температурі T, виміряній за допомогою термоперетворювача 10. Далі за рівнянням (7) визначаються зведені значення дотичного напруження зсуву на стінці $\tau_{w1r}, \tau_{w2r}, \tau_{w3r}$. Розрахунок значень параметрів степеневої рідини: показника консистенції K_r та показника нелінійності n_r при температурі зведення здійснюється за методикою, описаною в [8, 9]. Зазначені реологічні параметри згідно з цією методикою знаходять в результаті вирішення оптимізаційної задачі. Критерій оптимальності вибраний такий:

$$P = \sum_{i=1}^{3} \left(\Gamma_{ip} - \Gamma_i \right)^2 , \qquad (13)$$

де $\Gamma_i = \dfrac{4F_i}{\pi R_i^4}$ – значення уявної швидкості зсуву в кожному мостовому перетворювачі; Γ_{ip} - значення уявної швидкості зсуву, розраховані за витратними характеристиками мостових перетворювачів, які залежать від обраної реологічної моделі рідини. Для степеневої рідини користуються рівнянням (7). Значення параметрів K і n, за яких критерій (13) буде мінімальним, є параметрами, зведеними до заданої температури.



1 – задавач витрати; 2,3,4 – гідродинамічні мостові перетворювачі; 5,6,7 – дифманометричні перетворювачі; 8 - обчислювальний пристрій; 9 – пристрій відображення інформації;10 – термоперетворювач

Рисунок 10 – Функціональна схема гідродинамічного пристрою для вимірювання реологічних параметрів

ВИСНОВКИ

Запропонований метод зведення витратних характеристик мостових перетворювачів до заданої температури може бути застосований в алгоритмах обробки вихідних сигналів мостових перетворювачів в гідродинамічних пристроях для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин, зокрема степеневих та в'язкопластичних рідин, підпорядкованих моделі Балклі-Гершеля.

Розглянутий в статті гідродинамічний пристрій складається з трьох послідовно з'єднаних мостових перетворювачів, які під час вимірювання працюють в режимі постійної витрати. Обчислювальний пристрій в результаті неперервної обробки сигналів дифманометричних перетворювачів призначений для визначення реологічних параметрів, зведених до заданої температури.

В подальших дослідженнях необхідно додатково перевірити запропонований метод зведення витратних характеристик для рідин різної реологічної поведінки, які описуються різними реологічними моделями.

Література

1. Steffe J.F. Rheological methods in food process engeneering. – 1996. – 418 p.

2. Пістун Є.П., Крих Г., Леськів Г. Моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних схемах із постійною витратою. // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – №10. – С. 87-89.

3. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

4. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. – М.: Химия, 1979. – 368 с.

5. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Лёг. и пищ. пром-сть, 1981. – 215с.

6. Крих Г.Б. Визначення реологічних параметрів томатних концентратів за допомогою гідродинамічного вимірювального пристрою. // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 9. – С. 75-78.

7. Гринберг Н.Х. Вязкость и структурно-механические свойства томатопродуктов. – 1977. – № 9. – С. 39-40.

8. Крих Г.Б. Методика оброблення сигналів гідродинамічних вимірювальних перетворювачів реологічних параметрів неньютонівських рідин. // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник ДУ "Львівська політехніка". – № 378. – 1999. – С. 86-88.

9. Крих Г.Б., Кіндер М.І. Визначення концентрації сухих речовин томатних концентратів за їх реологічними параметрами. // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація / Вісник ДУ "Львівська політехніка". – № 460. – 2002. – С. 117-122.

Поступила в редакцію 30.10.2008р.