

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-01>

УДК 681.2.08:532.137

Пістун Євген Павлович, д.т.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0002-3120-1978>

Матіко Галина Федорівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0001-5482-2307>

Крих Ганна Бориславівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-6539-400X>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІДИН

Пістун Є.П., Матіко Г.Ф., Крих Г.Б. Вдосконалення гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів рідин. Запропоновано варіанти схем гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів псевдопластичних та в'язкопластичних рідин, які працюють в режимі постійної витрати та в режимі постійного перепаду тиску. Наведено математичні залежності для визначення реологічних параметрів рідин, які можна реалізувати на промислових програмованих контролерах. Показано, що запропоновані гідродинамічні пристрої дають змогу суттєво зменшити методичні похибки вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин.

Ключові слова: гідродинамічний реометр, капілярна трубка, неньютонівська рідина, пластична в'язкість, граничне напруження зсуву, індекс потоку, показник консистенції, похибка вимірювання.

Pistun Ye., Matiko H., Krykh H. Improving the hydrodynamic devices for measuring rheological parameters of liquids. Variants of diagrams of hydrodynamic devices for measuring the rheological parameters of pseudoplastic and viscoplastic liquids operating in the constant flow mode and the constant pressure drop mode are proposed. Mathematical dependencies are presented for determining the rheological parameters of liquids, which can be implemented in industrial programmable controllers. It is shown that the proposed hydrodynamic devices make it possible to reduce significantly methodological errors of measurement of the rheological parameters of non-Newtonian liquids.

Keywords: hydrodynamic rheometer, capillary tube, non-Newtonian fluid, plastic viscosity, yield shear stress, flow index, consistency index, measurement error.

Постановка наукової проблеми.

Розроблення та вдосконалення пристроїв для вимірювання фізико-механічних параметрів ньютонівських та неньютонівських рідин є особливо важливим у зв'язку з їх широким застосуванням у різноманітних галузях промисловості, таких як хімічної та нафтохімічної, нафтової та нафтопереробної, харчової та переробної тощо [1, 2]. Властивості рідин впливають на ефективність процесів переміщення, розтікання, перемішування та інших. За реологічними властивостями неньютонівські рідини достатньо різноманітні. Одна і та сама рідина, залежно від її стану і умов навантаження, може виявляти різні реологічні властивості. Під час технологічних операцій рідина може переходити з одного реологічного стану в інший. Тому при розробці пристроїв важливо встановити, в якому діапазоні напружень (зсуву) перебувають неньютонівські рідини в технологічних апаратах та які структурно-механічні властивості матеріалу є основними. Пристрої оперативного контролю реологічних параметрів рідин на стадії їх перероблення можуть бути застосовані для встановлення закономірностей впливу різноманітних збурень на їх властивості.

В багатьох виробництвах якість кінцевої продукції визначають за реологічними параметрами рідин, такими, наприклад, як густина, кінематична та динамічна в'язкість ньютонівських рідин, пластична в'язкість, граничне напруження зсуву, показник консистенції, індекс потоку неньютонівських рідин тощо. Отже, пристрої для неперервного вимірювання реологічних параметрів мають потенціал для підвищення якості продукції та зниження витрат на переробку, і їх розроблення та вдосконалення є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Пристрої вимірювання реологічних параметрів досить різноманітні. Найпоширенішими є капілярні, ротаційні та вібраційні віскозиметри (реометри), теорія яких достатньо обґрунтована для ньютонівських рідин. Кожному з цих типів властиві свої переваги і недоліки [1-4]. До основних недоліків застосування капілярних реометрів відносять різний профіль швидкостей рідини вздовж капіляра, зумовлений кінцевими ефектами, внаслідок чого градієнт тиску по довжині капіляра є змінним. Іншим небажаним явищем для інтерпретації результатів вимірювання капілярними реометрами може бути ефект пристінного ковзання, який особливо ймовірний для дисперсних середовищ. Додатковим джерелом похибки вимірювання реологічних параметрів

може стати порушення ламінарного режиму руху рідини в трубках капілярного реометра [5]. В ротаційних реометрах похибки можуть виникати для седиментаційно нестійких середовищ, внаслідок розшарування дисперсної фази і дисперсного середовища під час вимірювання. У вібраційних приладах на результат вимірювання в'язкості впливає густина контролюваного середовища, крім того швидкість зсуву не визначена, оскільки вона є функцією не лише характеристик приладу, тобто геометрії зонда, частоти та амплітуди коливань, але й параметрів рідини, тобто густини та в'язкості [1]. Більшість технологічних вимірювань в'язкісних характеристик рідин здійснюють при одному значенні швидкості зсуву. Для онлайн вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин необхідно створювати декілька швидкостей зсуву. Серед вказаних пристроїв реологічного контролю таку можливість мають гідродинамічні (капілярні) реометри, в яких одночасне створення різних швидкостей зсуву легко створити, застосовуючи трубки різного діаметра [6].

Формулювання мети дослідження.

Метою даного дослідження є розроблення схем гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин з покращеними метрологічними характеристиками та аналіз їх функціональних можливостей.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Гідродинамічний метод вимірювання базується на тому, що контрольовану рідину пропускають через дросельні елементи та вимірюють характеристики потоку, які залежать від властивостей рідини [6, 7]. Для вимірювання реологічних параметрів найбільш поширені дросельні елементи у вигляді циліндричних трубок круглого поперечного перерізу діаметром 1-12 мм, який залежить від діапазону вимірювання параметрів та властивостей середовища. Вибір саме таких дросельних елементів пов'язаний також з тим, що в них можна створити такі деформації зсуву в неньютонівських рідинах, які виникають під час їх переміщення в технологічних трубах. Гідродинамічні реометри можуть працювати в режимі постійної витрати або в режимі постійного тиску (перепаду тиску). В реометрах з постійною витратою в залежності від діапазону вимірювання реологічних параметрів застосовують дозатори малов'язких рідин (до 0,05 Па·с) та середовищ підвищеної в'язкості (0,05 – 0,5 Па·с) малих (0,001 – 0,1 м³/год) та середніх витрат (0,1 – 0,5 м³/год). В гідродинамічних реометрах з постійною витратою похибка дозування безпосередньо впливає на похибку визначення реологічних параметрів, тому в них необхідно застосовувати високоточні дозатори, похибка дозування яких не перевищує 0,5%.

Проаналізуємо деякі способи усунення недоліків гідродинамічних віскозиметрів, які можуть зменшити похибки вимірювання параметрів рідин. Одним із ефективних способів, що дає змогу скомпенсувати втрати тиску, зумовлені кінцевими ефектами капілярних трубок, є побудова гідродинамічних реометрів на базі гідравлічних мостових вимірювальних перетворювачів, що складаються з паралельного з'єднання пар капілярних трубок однакового діаметру. В кожній парі капіляри з'єднані послідовно і відрізняються лише порядком з'єднання довгої і короткої трубок. В мостову схему трубки з'єднані за допомогою входної 7, вихідної 8 і міжтрубних камер 6, до яких під'єднаний перетворювач різниці тисків 5. Постійна витрата рідини забезпечується задавачем витрати 9. Принципова схема мостового гідродинамічного перетворювача показана на рис. 1.

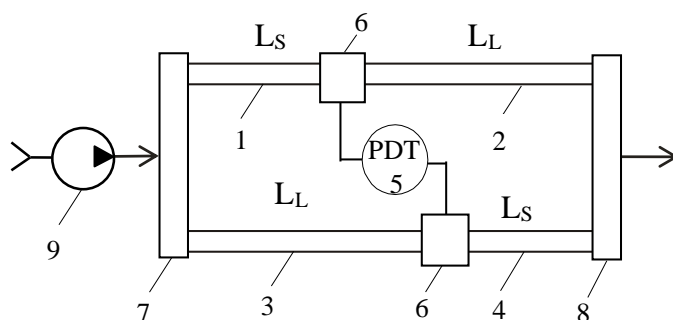


Рис. 1. Мостова вимірювальна схема гідродинамічного перетворювача: 1, 4 – короткі капілярні трубки довжиною L_S ; 2, 4 – довгі капілярні трубки довжиною L_L ; 5 – дифманометричний перетворювач; 6 – міжтрубні камери; 7, 8 – входна та вихідна камери; 9 – задавач постійної витрати

В трубках кінцевої довжини, на яких побудовані мостові перетворювачі, виникають додаткові втрати тиску, що зумовлені формуванням на гідродинамічній початковій ділянці L_e профілю швидкості рідини при її русі вздовж вимірювальної трубки від вхідної камери. В [3] наведені рівняння для визначення довжини вхідної ділянки L_e для неньютонівських рідин, отримані в результаті експериментальних і теоретичних досліджень. Ця довжина залежить від реологічних параметрів рідини, діаметра трубок та модифікованих для неньютонівських рідин чисел Рейнольдса. Якщо довжина коротких трубок в мостовому перетворювачі буде недостатньою для формування стабілізованого руху, то втрати тиску на гідродинамічних початкових ділянках будуть скомпенсовані неповністю, що спричинить похибку вимірювання. Тому довжину L_s коротких капілярних трубок 1 і 4 в мостовому перетворювачі виконують більшою за довжину L_e . Компенсація додаткових втрат тиску у перепаді тиску в міжтрубних камерах 6 мостового перетворювача відбувається завдяки тому, що всі трубки мають однаковий діаметр, а витрата рідини в кожній з них однакова.

За вихідним сигналом мостового перетворювача, що вимірюється перетворювачем різниці тиску 5, безпосередньо можна визначити лише один реологічний параметр – уявну в'язкість μ_a , яка характеризує властивості неньютонівської рідини при певній швидкості зсуву:

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\Gamma} = \frac{\Delta PR}{2\Delta L} \div \frac{4F}{\pi R^3} = \frac{\pi R^4}{8F\Delta L} \Delta P, \quad (1)$$

де F – об'ємна витрата рідини в трубці; R – радіус трубок; $\Delta L = L_L - L_S$ – різниця між довжинами довгих та коротких капілярних трубок в мостовому перетворювачі; ΔP – перепад тиску в міжтрубних камерах мостового перетворювача; $\Gamma = \frac{4F}{\pi R^3}$ – уявна швидкість зсуву на стінці;

$\tau_w = \frac{\Delta PR}{2\Delta L}$ – дотичне напруження на стінці капілярної трубки.

Найпоширенішими моделями для опису реологічної поведінки в'язкопластичних рідин є модель Бінгама

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

а псевдопластичних рідин – степенева модель

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

де τ – дотичне напруження; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву; τ_0 – граничне напруження зсуву; η – пластична в'язкість; K – показник консистенції; n – показник нелінійності.

Побудова гідродинамічних перетворювачів реологічних параметрів базується на витратних характеристиках вимірювальних трубок – залежностях між витратою та перепадом тиску: для бінгамівської моделі

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

та степеневій моделі

$$F = \frac{n}{3n+1} \cdot \pi R^3 \cdot \left(\frac{\tau_w}{K} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (5)$$

Якщо відношення τ_0/τ_w менше 0,62, то з похибкою меншою 3% рівняння (4) можна спростити:

$$\Delta P = \frac{8LF}{\pi R^4} \eta + \frac{8L}{3R} \tau_0. \quad (6)$$

Рівняння (4), (5) отримані для усталеного ламінарного руху рідини в нескінченно довгих трубках за умови нульової швидкості на внутрішній стінці. Дослідженнями встановлено [5], що режим руху в трубках буде ламінарним, якщо число Рейнольдса $Re_p(K, n)$ для степеневих рідин і числа Рейнольдса $Re_B(\eta, \tau_0)$ і $Re_{Bg}(\eta, \tau_0)$ для бінгамівських рідин менші за їх критичні значення

$$Re_p(K, n) \leq Re_p^{cr}, Re_B(\eta, \tau_0) \leq Re_B^{cr} \text{ або } Re_{Bg}(\eta, \tau_0) \leq Re_{Bg}^{cr}, \quad (7)$$

де Re_p^{cr} – критичне число Рейнольдса для ступеневої рідини; Re_B^{cr}, Re_{Bg}^{cr} – критичні числа Рейнольдса для в'язкопластичної рідини. Умови (7) досягають вибором продуктивності задавача витрати та діаметру трубок мостових перетворювачів і вони мають виконуватись при будь-яких значеннях реологічних параметрів в межах їх вимірювання.

Реологічні моделі (2) і (3) і відповідні їм витратні характеристики (4), (5), (6) містять два параметри, тому для їх вимірювання недостатньо одного значення швидкості зсуву рідини в трубках, необхідно створити деформацію зсуву не менше, як при двох значеннях швидкості. Для неперервного вимірювання важливо створити декілька швидкостей зсуву одночасно. Одним із способів вирішення цієї задачі є застосування у вимірювальній схемі послідовно з'єднаних мостових перетворювачів, які відрізняються діаметрами трубок. На рис. 2 показана функціональна схема реометра, в якому витрата рідини через послідовно з'єднані мостові перетворювачі 1, 2 є однаковою і змінюється частотно керованим приводом дозуючого насосу 7. Перепади тиску у вихідних діагоналях мостових перетворювачів вимірюються дифманометричними перетворювачами 3, 4, вихідні уніфіковані струмові сигнали яких 3 надходять до контролера 6. На контролері реалізована система автоматичної стабілізації перепаду тиску у вихідній діагоналі першого мостового перетворювача. Регулюючою дією в системі регулювання є витрата рідини через мостові перетворювачі, яку вимірюють за допомогою перетворювача витрати 5. Пластичну в'язкість рідини, що описується реологічною моделлю (2), обчислюють за допомогою контролера 6 за формулою

$$\eta = \frac{\Delta P_2 \frac{R_2}{\Delta L_2} - \Delta P_{sp} \frac{R_1}{\Delta L_1}}{8 \left(\frac{1}{R_2^3} - \frac{1}{R_1^3} \right)} \cdot \frac{\pi}{F}, \quad (8)$$

де R_1 та R_2 , $\Delta L_1 = L_{1L} - L_{1S}$ та $\Delta L_2 = L_{2L} - L_{2S}$ – радіуси і різниці довжин довгих і коротких трубок в першому та другому мостовому перетворювачі, відповідно; ΔP_{sp} – задане значення перепаду тиску у вихідній діагоналі першого мостового перетворювача; ΔP_2 – перепад тиску в діагоналі другого мостового перетворювача; $F = F_0/2$ – об'ємна витрата рідини у вимірювальних трубках; F_0 – загальна витрата контрольованої рідини через мостові перетворювачі. Отже, пластичну в'язкість η рідини визначають за вимірними значеннями перепаду тиску у вихідній діагоналі другого мостового перетворювача та витрати рідини в трубках реометра.

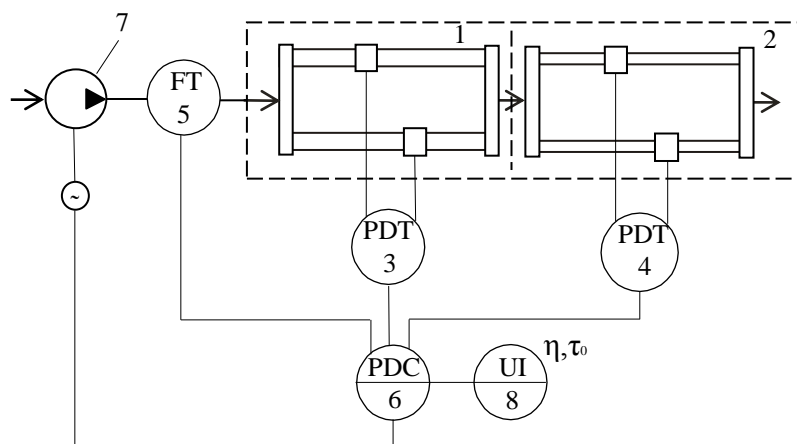


Рис. 2. Функціональна схема гідродинамічного реометра: 1, 2 – мостові гідродинамічні перетворювачі; 3, 4 – дифманометричні перетворювачі; 5 – перетворювач витрати; 6 – контролер; 7 – задавач витрати; 8 – показувальний прилад

Граничне напруження зсуву при середніх і високих швидкостях зсуву бінгамівської рідини з достатньою для практичних вимірювань точністю оцінюють за формулою

$$\tau_0 = a - b\Delta P_2, \quad (9)$$

в якій $a = c \frac{R_1}{\Delta L_1} \Delta P_{sp}$, $b = c \frac{R_2}{\Delta L_2} \frac{R_2^3}{R_1^3}$, $c = \frac{3}{8} \left(1 - \frac{R_2^3}{R_1^3}\right)^{-1}$ – коефіцієнти, що залежать від конструктивних розмірів трубок мостових перетворювачів та заданого значення перепаду тиску ΔP_{sp} .

Схема реометра, показана на рис. 2, може бути застосована і для вимірювання реологічних параметрів псевдопластичної рідини, що описується степеневою моделлю (3). Індекс потоку n визначають за формулою

$$n = d \ln(f\Delta P_2) - \frac{1}{3}, \quad (10)$$

де $d = \frac{1}{3 \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$ – коефіцієнт, який залежить від радіусів трубок в мостових перетворювачах;

$f = \ln\left(\frac{1}{\Delta P_{sp}} \cdot \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2}\right)$ – коефіцієнт, що залежить від відношення різниць довжин трубок в мостових

перетворювачах і заданого значення перепаду тиску ΔP_{sp} в першому мостовому перетворювачі. Показник консистенції K визначають на основі математичної моделі першого мостового перетворювача:

$$K = \frac{\Delta P_{sp} R_1}{2\Delta L_1} \cdot \left(\frac{n}{3n+1} \cdot \pi R_1^3\right)^n \cdot \frac{1}{F^n}. \quad (11)$$

Отже показник консистенції залежить від витрати рідини через мостові перетворювачі, а також від вибраних конструктивних розмірів трубок в перетворювачах і заданого значення ΔP_{sp} .

Варто зауважити, що на основі формули (1) за допомогою реометра можна розрахувати два значення уявної в'язкості μ_{a1} , μ_{a2} неньютонівських рідин при різних швидкостях зсуву. За перепадом тиску на другому мостовому перетворювачі можна вимірювати відношення значень уявної в'язкості при двох різних значеннях уявної швидкості зсуву:

$$\frac{\mu_{a2}}{\mu_{a1}} = k \cdot \Delta P_2, \quad (12)$$

де $k = \frac{1}{\Delta P_{sp}} \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^4 \cdot \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2}$ – коефіцієнт перетворення, який залежить від конструктивних

характеристик трубок та заданого значення перепаду тиску ΔP_{sp} .

Отже, гідродинамічні перетворювачі для вимірювання реологічних параметрів рідин, що описуються двопараметричними моделями складаються щонайменше з двох послідовно з'єднаних мостових перетворювачів, які відрізняються діаметром трубок. Але навіть і для вказаних рідин (а надто для рідин з трьома реологічними параметрами) доцільно використовувати пристрій з трьома мостовими перетворювачами. Для прикладу на рис. 3 показана принципова схема реометра, який на відміну від розглянутого вище, працює в режимі постійної витрати.

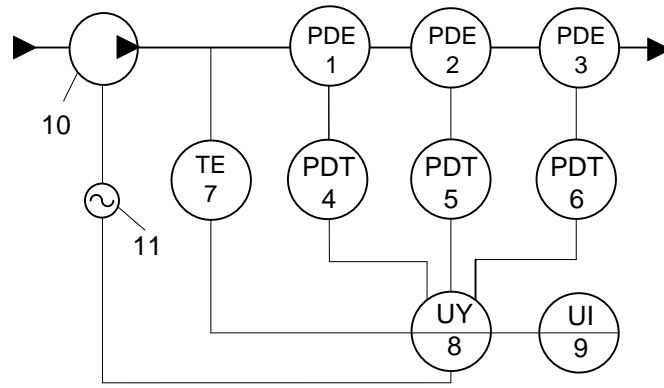


Рис. 3. Функціональна схема гідродинамічного реометра: 1, 2, 3 – гідродинамічні мостові перетворювачі; 4, 5, 6 – дифманометричні перетворювачі; 7 – термоперетворювач; 8 – пристрій керування та обчислювач; 9 – пристрій відображення інформації; 10 – задавач витрати; 11 – електродвигун

Такий прилад також забезпечує компенсацію входових ефектів трубок. Пристрій керування та обчислювач 8 в цій схемі за сигналами дифманометричних перетворювачів 1, 2 і 3 формує значення реологічних параметрів, які відображаються приладом 9. Крім того, за допомогою пристрою керування можна дискретно змінити витрату рідини через мостові перетворювачі, що дає змогу опрацьовувати сигнали дифманометрів при різних значеннях витрати і згідно методики [8] оцінити коефіцієнт ковзання та в разі наявності пристінних ефектів скоригувати їх витратні характеристики і тим самим підвищити точність визначення реологічних параметрів неньютонівських рідин.

Інший спосіб отримання декількох швидкостей зсуву, необхідних для вимірювання реологічних параметрів, полягає у створенні різних об'ємних витрат неньютонівських рідин у вимірювальних трубках. Цей спосіб пропонуємо реалізувати у пристрої для вимірювання параметрів в'язкопластичної рідини, принципова схема якого показана на рис. 4.

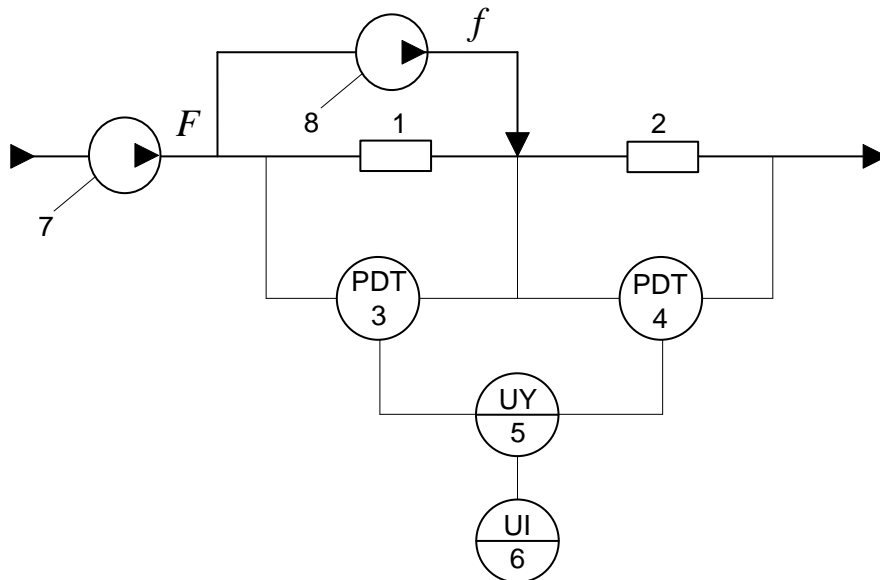


Рис. 4. Принципова схема пристрою для вимірювання параметрів в'язкопластичної рідини: 1, 2 – циліндричні трубки; 3, 4 – дифманометричні перетворювачі; 5 – обчислювач; 6 – пристрій відображення інформації; 7, 8 – задавачі постійної витрати

Пристрій складається з двох послідовно з'єднаних однакових трубок 1 і 2, в яких за допомогою задавачів постійної витрати 7 і 8 створюють різні об'ємні витрати рідини. Із загальної витрати F в'язкопластичної рідини, що створюється задавачем постійної витрати 7, іншим задавачем постійної витрати 8 відбирається потік з витратою $f < 0,5F$, який подається на вхід трубки 2. Завдяки цьому в трубці 1 рідина тече з витратою $F-f$, а в другій – з витратою F . За

допомогою дифманометрів 3 і 4 вимірюють перепади тиску ΔP_1 і ΔP_2 на трубках 1 і 2, які пов'язані з реологічними параметрами залежностями:

$$\Delta P_1 = \frac{8L(F-f)}{\pi R^4} \eta + \frac{8L}{3R} \tau_0; \quad (13)$$

$$\Delta P_2 = \frac{8LF}{\pi R^4} \eta + \frac{8L}{3R} \tau_0. \quad (14)$$

Вихідні сигнали дифманометрів подають до обчислювача 5, який формує значення пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву:

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8Lf} (\Delta P_2 - \Delta P_1); \quad (15)$$

$$\tau_0 = \frac{3R}{8L} \left(\frac{F}{f} \Delta P_1 - \Delta P_2 \left(\frac{F}{f} - 1 \right) \right). \quad (16)$$

Як було зазначено вище, конструктивні характеристики вимірювальних трубок та витрати задавачів в пристрої мають бути такими, щоб дотримувались умови ламінарного руху рідини.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

В статті запропоновані різні варіанти схем гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів псевдопластичних та в'язкопластичних рідин. Такі рідини описують реологічними моделями з двома і більше параметрами. Показано, що вони можуть працювати в режимі постійної витрати та в режимі постійного перепаду тиску. Особливість побудови таких пристроїв полягає в тому, що для вимірювання реологічних параметрів необхідно одночасно створювати в чутливих елементах декілька швидкостей зсуву. Показано, що в гідродинамічних пристроях цього можна досягти, застосовуючи вимірювальні трубки різного діаметра, або створюючи в трубках потоки рідини з різними витратами. Перевагою розглянутих пристроїв є можливість визначення реологічних параметрів за математичними залежностями, які можна реалізувати на промислових програмованих контролерах. Також показано, що запропоновані гідродинамічні пристрої можуть забезпечити вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин з вищою точністю, за рахунок вилучення методичних складових похибки вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин, зумовлених кінцевими ефектами вимірювальних трубок, можливою турбулізацією потоку, а також можливими пристінними ефектами.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення схем гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин на основі комбінованого способу одночасного створення різних швидкостей зсуву, як вибором різних діаметрів трубок, так і за допомогою додаткових потоків у чутливих елементах, що забезпечить нові можливості для зменшення методичних похибок вимірювання.

Список бібліографічного опису

1. Cullen, P.J., Duffy, A.P., O'Donnell, C.P., and O'Callaghan, D.J. (2000) Process viscometry for the food industry. Trends in Food Science & Technology, 11, P. 451-457.
2. Gang Wang, Chi Tan (2017) A contact resonance viscometer based on the electromechanical impedance of a piezoelectric cantilever, Sensors and A 267, P. 401-408.
3. Alderman, N.J., Heywood, N.I. (1999) Selection of on-line viscometers for slurry applications. 14th International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport (Hydrotransport 14), Maastricht, The Netherlands, P. 373-399.
4. White, J.P., Davidson, V.J., Otten, L. (1993) A capillary viscometer for characterization of fluid foods. Food Research International, 26, P. 109-113.
5. Steffe, J.F. (1996) Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd edition. Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 418 p.
6. Древецький, В. В., Воєвода, В. В. (2015) Автоматичний контроль фізико-механічних параметрів рідин для розриву пласта. Вісник Інженерної академії України, 1, С. 37-41.
7. Pistun, Ye.P., Matiko, H.F., Krykh, H.B., Matiko, F.D. (2021) Modeling throttle bridge measuring transducers of physical-mechanical parameters of Newtonian fluids. Mathematical Modeling and Computing, 8(3), P. 515-525.
8. Hanna Krykh, Halyna Matiko, Lyudmyla Sadovska. (2015) Evaluation of Influence of Wall Slip on Measurement of Rheological Parameters by Means of a Hydrodynamic Measuring System. Energy Engineering and Control Systems, 1 (2), P. 139-146.

References

1. Cullen, P.J., Duffy, A.P., O'Donnell, C.P., and O'Callaghan, D.J. (2000) Process viscometry for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 11, P. 451-457.
2. Gang Wang, Chi Tan (2017) A contact resonance viscometer based on the electromechanical impedance of a piezoelectric cantilever, *Sensors and A* 267, P. 401-408.
3. Alderman, N.J., Heywood, N.I. (1999) Selection of on-line viscometers for slurry applications. 14th International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport (Hydrotransport 14), Maastricht, The Netherlands, P. 373-399.
4. White, J.P., Davidson, V.J., Otten, L. (1993) A capillary viscometer for characterization of fluid foods. *Food Research International*, 26, P. 109-113.
5. Steffe, J.F. (1996) *Rheological Methods in Food Process Engineering*, 2nd edition. Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 418 p.
6. Drevetskyi, V.V., Voievoda, V.V. (2015) Automatic control of physical and mechanical parameters of fracturing fluids. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 1, P. 37-41.
7. Pistun, Ye.P., Matiko, H.F., Krykh, H.B., Matiko, F.D. (2021) Modeling throttle bridge measuring transducers of physical-mechanical parameters of Newtonian fluids. *Mathematical Modeling and Computing*, 8(3), P. 515-525.
8. Hanna Krykh, Halyna Matiko, Lyudmyla Sadovska. (2015) Evaluation of Influence of Wall Slip on Measurement of Rheological Parameters by Means of a Hydrodynamic Measuring System. *Energy Engineering and Control Systems*, 1 (2), P. 139-146.