

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-28>

УДК 681.2.08:532.137

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

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

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

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

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

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

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

## СПОСОБИ ЗМІНИ ШВИДКОСТЕЙ ЗСУВУ В ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРИСТРОЯХ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

Пістун Є.П., Крих Г.Б., Матіко Г.Ф. Способи зміни швидкостей зсуву в гідродинамічних пристроях для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин. В статті запропоновано принцип побудови гідродинамічних пристроїв для неперервного вимірювання реологічних параметрів в'язкопластичних та псевдопластичних рідин, який базується на створенні в чутливих елементах деформації зсуву з різними швидкостями. Розроблено ряд схем гідродинамічних вимірювальних пристроїв, в яких реалізовано різні способи зміни швидкості зсуву рідини. Отримані функції перетворення запропонованих гідродинамічних пристроїв на підставі витратних характеристик дросельних елементів та типу їх з'єднання в схемах.

**Ключові слова:** гідродинамічний пристрій, неньютонівська рідина, пластична в'язкість, граничне напруження зсуву, індекс потоку, показник консистенції.

**Pistun Ye., Krykh H., Matiko H. Ways for changing shear rates in hydrodynamic devices for measuring rheological parameters of non-Newtonian fluids.** The paper proposes the principle of constructing hydrodynamic devices for continuous measurement of rheological parameters of viscoplastic and pseudoplastic fluids, which is based on creating shear deformation at different speeds in sensitive elements. Several diagrams of hydrodynamic measuring devices have been developed, in which various ways of changing the fluid shear rate have been implemented. The transform functions of the proposed hydrodynamic devices are obtained based on the flow characteristics of the throttle elements and the type of their connection in the diagrams.

**Keywords:** hydrodynamic device, non-Newtonian fluid, plastic viscosity, yield shear stress, flow index, consistency index.

### Постановка наукової проблеми.

Розроблення пристроїв для вимірювання параметрів неньютонівських рідин є складною задачею, що зумовлено їх різноманітною реологічною поведінкою, специфічними ефектами, які виникають під дією різного роду деформацій. Саме тому для вимірювання реологічних параметрів запропоновано багато приладів, які працюють за різними методами вимірювання [1-5]. Найбільш поширеними серед них є капілярні та ротаційні пристрої, які дають можливість оцінити властивості неньютонівських рідин під час деформації зсуву [1, 2]. Оскільки реологічна поведінка неньютонівських рідин залежить від швидкості зсуву, то досліджувану рідину необхідно піддавати деформаціям зсуву з різним швидкостями. В лабораторних приладах таку задачу вирішують досить просто, послідовно в часі задаючи різні швидкості зсуву. Для реалізації неперервного вимірювання реологічних параметрів важливо створювати різні швидкості зсуву одночасно. Інша особливість дослідження конкретної неньютонівської рідини полягає в тому, що на відміну від ньютонівської рідини, її реологічна поведінка характеризується зазвичай декількома параметрами. Прилади неперервної дії повинні забезпечити одночасне вимірювання реологічних параметрів. Тому задача побудови пристроїв для неперервного контролю реологічних параметрів є актуальною.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Серед відомих пристроїв можливість одночасно створювати різні швидкості зсуву та вимірювати декілька реологічних параметрів мають капілярні реометри, які реалізують гідродинамічний метод вимірювання. Згідно з цим методом контрольовану рідину пропускають через дроселі та вимірюють характеристики потоку, які залежать від властивостей рідини [6, 7]. Такими характеристиками можуть бути або перепад тиску на дроселях, або витрата рідини через дроселі, між якими в усталеному режимі існує залежність, що описується витратною характеристикою. Рівняння витратної характеристики в свою чергу залежить від реологічної моделі досліджуваного середовища, від типу дросельного елемента та його конструктивних характеристик. Реологічні моделі досить різноманітні та описують різні ефекти реологічної поведінки неньютонівських рідин. Для зсувної течії в'язкопластичної рідини досить часто застосовують модель Бінгама, для псевдопластичної рідини – степеневу модель [1, 2, 8]. Ці моделі містять два параметри. Теоретично для їх визначення з витратної характеристики одного дросельного елемента

необхідно мати значення перепаду тиску і витрати при двох значеннях швидкості зсуву. Якщо дросельними елементами в гідродинамічному пристрої є циліндричні трубки круглого поперечного перерізу, то змінювати швидкість зсуву течії середовища в ній можна трьома способами: зміною внутрішнього діаметра трубки, зміною кількості дросельних елементів та зміною витрати. Зазвичай такі способи нескладно реалізувати в лабораторних приладах, в яких вимірювання проводять послідовно. Наприклад, середовище пропускають через трубку при одній витраті і вимірюють перепад тиску на ній, потім створюють потік з іншою витратою і повторюють вимірювання [2]. В приладах неперервної дії такі операції необхідно проводити в один і той самий момент часу.

Дослідженнями також встановлено, що для підвищення точності неперервного вимірювання в'язкості ньютонівських рідин, реологічних параметрів неньютонівських рідин доцільно застосовувати не одну, а чотири трубки однакового діаметра, які з'єднують у схему гідродинамічного моста [9, 10]. В протилежних плечах моста розташовують трубки однакової довжини, а суміжні плечі складають з трубок різної довжини. Завдяки цьому витрати рідини в усіх трубках є однаковими і різниця тисків у вихідній діагоналі моста не залежатиме від входових ефектів трубок, які присутні в трубках кінцевої довжини [9, 11]. Зазначимо, що швидкість зсуву рідини у всіх трубках гідродинамічного моста буде однаковою.

**Формулювання мети дослідження.**

Метою дослідження є аналіз способів створення різних швидкостей зсуву та їх впливу на функції перетворення гідродинамічних пристроїв для неперервного та одночасного вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

Для створення течії неньютонівської рідини з різними швидкостями зсуву побудову гідродинамічних пристроїв для вимірювання параметрів неньютонівських рідин доцільно здійснювати за допомогою мостових вимірювальних перетворювачів, з'єднаних послідовно [9]. Кожний мостовий перетворювач складається, як зазначено вище, з трубок однакового внутрішнього діаметра, а між собою вони відрізняються конструктивними характеристиками, зокрема діаметрами трубок.

Розглянемо гідродинамічний пристрій для вимірювання параметрів ступеневої рідини, який реалізує вказаний спосіб створення різних швидкостей зсуву. На рис. 1 зображена принципова схема такого пристрою.

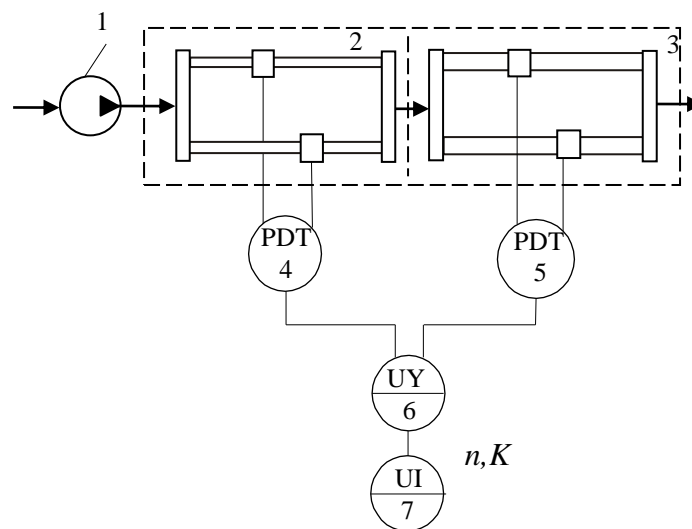


Рис. 1. Принципова схема гідродинамічного пристрою для вимірювання індексу течії та показника консистенції ступеневої рідини: 1 – задавач постійної витрати; 2, 3 – мостові перетворювачі; 4, 5 – дифманометричні перетворювачі; 6 – мікропроцесорний обчислювач; 7 – прилад відображення параметрів

Пристрій складається із задавача 1 постійної витрати, мостових перетворювачів 2 і 3, увімкнених послідовно за потоком контрольованої рідини. Міжтрубні камери вказаних

перетворювачів 2 і 3 сполучені з дифманометричними перетворювачами 4 і 5, які за виходом з'єднані з мікропроцесорним обчислювачем 6, до якого в свою чергу приєднаний прилад 7 відображення параметрів.

Розглянемо статичну характеристику такого гідродинамічного пристрою. Під час прокачування ступеневої рідини з постійною витратою  $F$  через мостові перетворювачі в їхніх міжтрубних камерах виникають перепади тисків, які визначають з рівняння [8]

$$\Delta P_i = \frac{2\Delta L_i}{(R_i)^{1+3n}} \left( \frac{3n+1}{\pi n} \right)^n K \left( \frac{F}{2} \right)^n, \quad (1)$$

де  $K$  – показник консистенції;  $n$  – індекс потоку;  $\Delta L_i$  – різниця довжин довгих та коротких трубок;  $R_i$  – радіус трубок;  $i = 1, 2$  – індекс, що відносить величини  $\Delta P_i$ ,  $\Delta L$  і  $R$  до першого або другого мостового перетворювача.

Вихідні сигнали дифманометричних перетворювачів подаються до мікропроцесорного обчислювача 6, в якому спочатку обчислюється відношення

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{1+3n},$$

яке далі логарифмується

$$\ln \left( \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right) = \ln \left( \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} \frac{R_2}{R_1} \right) + 3n \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (2)$$

Зауважимо, що якщо між довжинами та діаметрами трубок обох мостових перетворювачів дотримати співвідношення  $\frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} \frac{R_2}{R_1} = 1$ , то прилад 7 буде відображати індекс потоку, розрахований за такою формулою

$$n = k \ln(\Delta P_1 / \Delta P_2), \quad (3)$$

де  $k = 1/3 \ln(R_2/R_1)$  – коефіцієнт, що визначається діаметрами трубок мостових перетворювачів.

Обчислювач також розраховує показник консистенції  $K$  за вихідними сигналами мостових перетворювачів за формулою

$$K_i = \frac{\Delta P_i R_i}{2\Delta L_i} \left( \frac{n\pi R_i^3}{3n+1} \frac{2}{F} \right)^n. \quad (4)$$

Прилад 7 показує середньоарифметичне значення показника консистенції  $K = (K_1 + K_2)/2$ .

За аналогічною схемою може бути побудований пристрій для вимірювання реологічних параметрів бінгамівської рідини, модель якої містить два параметри: пластичну в'язкість  $\eta$  і граничне напруження зсуву  $\tau_0$ . Але складність реалізації такого пристрою полягає в тому, що за витратними характеристиками двох мостових перетворювачів неможливо аналітично в явному вигляді за результатами вимірювання перепадів тиску в їхніх діагоналях обчислити значення параметрів. Для усунення цієї проблеми пропонується схема гідродинамічного перетворювача, яка складається з трьох послідовно з'єднаних мостових перетворювачів (рис. 2).

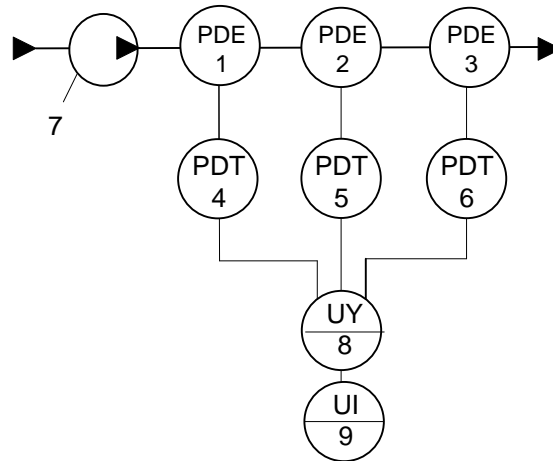


Рис. 2. Принципова схема гідродинамічного пристрою для вимірювання параметрів в'язкопластичної рідини: 1, 2, 3 – гідродинамічні мостові перетворювачі; 4, 5, 6 – дифманометричні перетворювачі; 7 – задавач постійної витрати; 8 – обчислювач; 9 – пристрій відображення інформації

Діаметри трубок в кожному мостовому перетворювачі, як і в схемі на рис. 1, мають однаковий діаметр. Але швидкості зсуву рідини в мостових перетворювачах 1, 2 і 3 є різні, оскільки вони відрізняються діаметрами трубок.

Розглянемо функцію перетворення такого перетворювача. Витратна характеристика кожного мостового перетворювача для руху в'язкопластичної бінгамівської рідини в циліндричних трубках круглого поперечного перерізу має вигляд [8]

$$\Gamma_i = \frac{\tau_{wi}}{\eta} \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_{wi}} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{wi}} \right)^4 \right), \quad (5)$$

де  $\Gamma_i = \frac{2F}{\pi R_i^3}$  – уявна швидкість зсуву;  $F$  – об'ємна витрата задавача;  $\tau_{wi} = \frac{\Delta P_i R_i}{2\Delta L_i}$  – дотичне

напруження зсуву на внутрішній стінці трубок однакового діаметра;  $\Delta P_i$  – перепад тиску у вихідній діагоналі мостового гідродинамічного перетворювача;  $R_i$  – радіус трубок мостового перетворювача;  $\Delta L_i$  – різниця довжин трубок в суміжних плечах мостового перетворювача;  $i=1, 2, 3$  – індекс, що відносить величини  $\Gamma$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta L$  і  $R$  до першого, другого та третього мостового перетворювача.

Оскільки діаметри трубок в мостових перетворювачах різні, то відповідно і уявні швидкості зсуву рідини в трьох мостових перетворювачах різні, тобто  $\Gamma_1 \neq \Gamma_2 \neq \Gamma_3$ . За таких умов функції перетворення гідродинамічного вимірювального перетворювача за пластичною в'язкістю  $\eta$  і граничним напруження зсуву  $\tau_0$  визначають за формулами:

$$\eta = \frac{1}{a_0} (\tau_{w1} + b\tau_{w2} + c\tau_{w3}), \quad (6)$$

$$\tau_0 = \frac{3}{4a_0} (a_1\Gamma_1 + b_1\Gamma_2 + c_1\Gamma_3), \quad (7)$$

в яких  $a_0 = \Gamma_1 + b\Gamma_2 + c\Gamma_3$ ;  $b = \frac{1}{d} \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w3}} \right)^3 \left[ 1 - \left( \frac{\tau_{w3}}{\tau_{w1}} \right)^3 \right]$ ;  $c = \frac{1}{d} \left[ \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w1}} \right)^3 - 1 \right]$ ;

$$a_1 = \frac{\tau_{w3}}{d} \left[ 1 - \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w3}} \right)^4 \right]; b_1 = \frac{\tau_{w1}}{d} \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w3}} \right)^3 \left[ 1 - \left( \frac{\tau_{w3}}{\tau_{w1}} \right)^4 \right]; c_1 = \frac{\tau_{w1}}{d} \left[ \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w1}} \right)^4 - 1 \right]; d = 1 - \left( \frac{\tau_{w2}}{\tau_{w3}} \right)^3.$$

Коефіцієнти  $a_1, b_1, c_1, b$  і  $c$  у формулах (6) і (7) змінюються в залежності від вимірних за допомогою дифманометрів перепадів тиску у вихідних діагоналях мостових перетворювачів. Обчислювач розраховує значення цих коефіцієнтів і за формулами (6) і (7) визначає параметри  $\eta$  і  $\tau_0$ , які відображаються приладом 9.

В гідродинамічних пристроях, які працюють в режимі постійної витрати, є можливість змінювати швидкість зсуву рідини в трубках, застосовуючи послідовне з'єднання одинарних трубок та їхніх пакетів. На рис. 3 показана принципова схема гідродинамічного пристрою для вимірювання реологічних параметрів, в якій дросельні елементи ввімкнені в схему мостового перетворювача, протилежні плечі якого є однаковими.

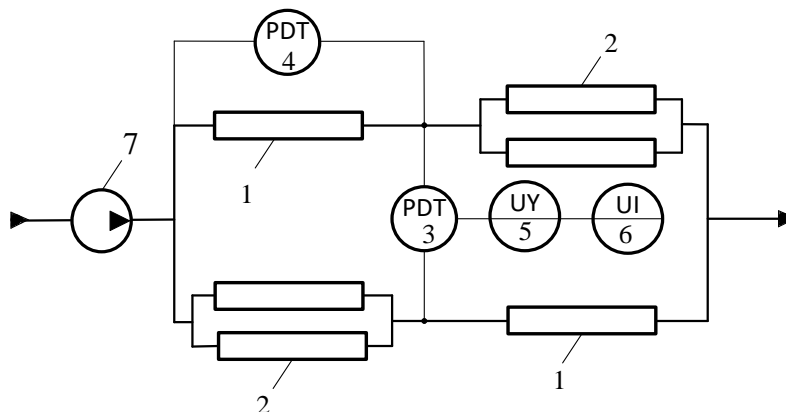


Рис. 3. Принципова схема пристрою для вимірювання параметрів неньютонівської рідини:  
 1 – одинарна вимірювальна трубка; 2 – пакет з двох вимірювальних трубок;  
 3, 4 – дифманометричні перетворювачі; 5 – обчислювач; 6 – пристрій відображення інформації;  
 7 – задавач постійної об'ємної витрати

Суміжні плечі моста складаються з одинарних трубок та пакетів, кожний з яких містить дві трубки. Конструктивною особливістю пристрою є те, що діаметри та довжини всіх вимірювальних трубок є однаковими. Завдяки цьому витрата рідини в одинарній трубці вдвічі більша за витрату рідини у вимірювальних трубках пакетів, і відповідно значення швидкості зсуву рідини в трубках пристрою є різними.

Для побудови функції перетворення пристрою, що вимірює параметри в'язкопластичної рідини, застосуємо спрощене рівняння витратної характеристики (5). Тоді перепад тиску на одинарних трубках 1 визначають з рівняння

$$\Delta P_1 = k \frac{F}{2} \eta + m \tau_0, \quad (8)$$

а перепад тиску на пакеті трубок 2 – з такого рівняння

$$\Delta P_2 = k \frac{F}{4} \eta + m \tau_0, \quad (9)$$

де  $k = \frac{8L}{\pi R^4}$ ,  $m = \frac{8L}{3R}$  – коефіцієнти, що визначаються радіусом  $R$  та довжиною  $L$  трубок пристрою;  $F$  – об'ємна витрата задавача 7.

З рівнянь (8) і (9) видно, що в перепаді тиску  $\Delta P_3$ , що вимірюється дифманометричним перетворювачем 3, складові перепаду тиску, зумовлені пластичними властивостями в'язкопластичної рідини, компенсуються. Тоді функція перетворення пристрою за пластичною в'язкістю  $\eta$  має вигляд

$$\eta = \frac{\pi R^4}{2FL} \Delta P_3. \quad (10)$$

Для визначення функції перетворення пристрою за граничним напруженням зсуву  $\tau_0$  скористаємося рівнянням (8):

$$\tau_0 = \frac{1}{m} \left( \Delta P_1 - k \frac{F}{2} \eta \right) = \frac{3R}{8L} (\Delta P_1 - 2\Delta P_3). \quad (11)$$

В розглянутих вище способах зміни швидкості зсуву загальна витрата рідини через гідродинамічний вимірювальний пристрій є однаковою. За третім способом зміни швидкості зсуву в рідині забезпечують за рахунок різних витрат контрольованої рідини через кожний гідродинамічний мостовий перетворювач. Для цього частину рідини в процесі вимірювання відводять від початкової витрати або додають. Розглянемо реалізацію цього методу на прикладі пристрою для вимірювання параметрів бінгамівської рідини, принципова схема якого показана на рис. 4.

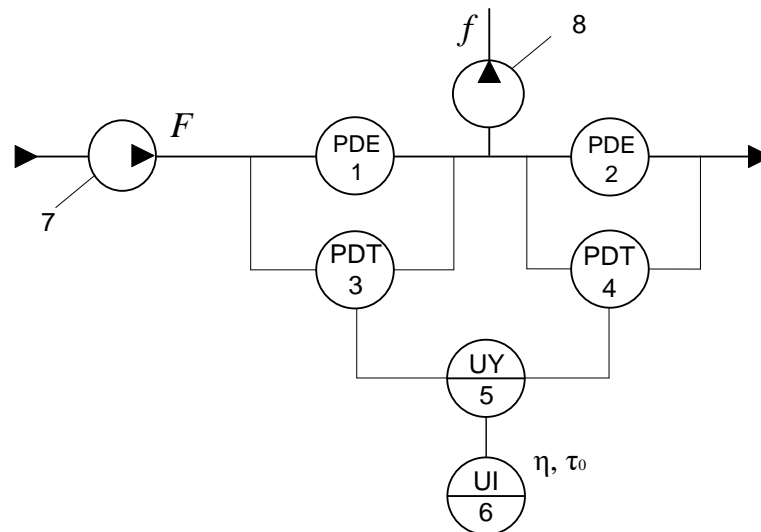


Рис. 4. Принципова схема пристрою для вимірювання параметрів в'язкопластичної рідини:  
 1, 2 – мостові гідродинамічні перетворювачі; 3, 4 – дифманометричні перетворювачі; 5 –  
 обчислювач;  
 6 – пристрій відображення інформації; 7, 8 – задавачі постійної об'ємної витрати

На відміну від розглянутих вище схем в пристрої застосовано два задавача постійної об'ємної витрати 7 і 8. За допомогою задавача 7 контрольована рідина прокачується через мостовий перетворювач 1 з витратою  $F$ , а задавач 8 відбирає рідину перед другим мостовим перетворювачем 2 з витратою  $f$ , яка є меншою за  $F$ . Конструктивно обидва мостові перетворювачі виконані однаково і містять трубки однакового діаметра  $2R$  і мають однакову різницю  $\Delta L$  між довжинами довгих та коротких трубок в суміжних плечах. З врахуванням цих особливостей перепади тиску  $\Delta P_1$  і  $\Delta P_2$  у вихідних діагоналях мостових перетворювачів 1 і 2 описуються рівняннями

$$\Delta P_1 = \frac{4\Delta L F}{\pi R^4} \eta + \frac{8\Delta L}{3R} \tau_0, \quad (12)$$

$$\Delta P_2 = \frac{4\Delta L (F - f)}{\pi R^4} \eta + \frac{8\Delta L}{3R} \tau_0. \quad (13)$$

Віднімаючи рівняння (13) з рівняння (12), одержимо

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{4\Delta L f}{\pi R^4} \eta,$$

звідки отримаємо функцію перетворення пристрою за пластичною в'язкістю

$$\eta = \frac{\pi R^4}{4\Delta L f} (\Delta P_1 - \Delta P_2). \quad (14)$$

Далі додамо рівняння (12) і (13)

$$\Delta P_2 + \Delta P_1 = \frac{4\Delta L (2F - f)}{\pi R^4} \eta + \frac{16\Delta L}{3R} \tau_0. \quad (15)$$

Підставимо  $\eta$  з рівняння (14) в (15), тоді одержимо

$$\Delta P_2 + \Delta P_1 = \left(2 \frac{F}{f} - 1\right) (\Delta P_1 - \Delta P_2) + \frac{16\Delta L}{3R} \tau_0, \quad (16)$$

звідки отримуємо функцію перетворення вимірювального пристрою за граничним напруженням зсуву  $\tau_0$  в'язкопластичної рідини

$$\tau_0 = \frac{3R}{8\Delta L} \left( \frac{F}{f} \Delta P_2 - \left( \frac{F}{f} - 1 \right) \Delta P_1 \right). \quad (17)$$

Вихідні сигнали дифманометричних перетворювачів надходять до обчислювача 5, який за формулами (14) і (17) розраховує значення пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву рідини.

### Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Стаття присвячена дослідженню способів створення потоку рідини в чутливих елементах при різних швидкостях зсуву та їх використанню для розроблення гідродинамічних пристроїв неперервного та одночасного вимірювання декількох реологічних параметрів неньютонівських рідин. Ці способи реалізують застосуванням в схемах приладів трубок різного діаметру, комбінацією послідовного та паралельного з'єднання трубок, зміною витрати рідини через кожний мостовий перетворювач за рахунок введення додаткових потоків або їх відведення. Запропоновано схеми гідродинамічних перетворювачів пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву в'язкопластичних рідин, а також показника консистенції та індексу потоку для псевдопластичних рідин. Для кожної схеми отримані функції перетворення гідродинамічного пристрою за вимірюваними параметрами, які залежать від вибраного способу зміни швидкості деформації зсуву.

В майбутньому автори планують зробити порівняльний аналіз технічних та метрологічних характеристик розроблених схем гідродинамічних пристроїв з різними способами зміни швидкості зсуву в чутливих елементах.

### Список бібліографічного опису

1. Rao, M.A. (2014) Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods, Food Engineering Series, DOI 10.1007/978-1-4614-9230-6\_2, Springer Science+Business Media New York
2. Chhabra, R.P., Richardson, J.F. (2008) Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications, 519 p.
3. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Rheology and Rheological Measurements, John Wiley & Sons, New York, 1992.
4. Van Oort, E., Vajargah, K., Hoxha, B. (2015). U.S. Patent Appl. 2015/0330213 A1. Systems and Methods for Determining a Rheological Parameter
5. 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
6. Pistun, Ye.P., Matiko, H.F., Krykh, H.B. (2022) Algorithmization of designing gas-hydrodynamic measuring transducers using structural and parametric optimization. 8th International Conference «Energy Smart Systems – 2022», ESS 2022 - Proceedings, P. 264-268. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969338
7. Древецький В.В., Восвода В.В. (2015) Патент на корисну модель 102560 (UA), МПК G01N 11/08. Пристрій для вимірювання реологічних параметрів в'язкопластичних рідин. 10.11.2015
8. Steffe, J.F. (1996) Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd edition. Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 418 p.
9. Пістун, Є.П., Матіко, Г.Ф., Крих, Г.Б. (2022) Вдосконалення гідродинамічних пристроїв для вимірювання реологічних параметрів рідин. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 48, С.5-12
10. Clarke, P.G., Murphy, M.P. (2017) Modular Capillary Bridge Viscometer, U.S. Patent 9,612,183 B2
11. Aho, J. and Syrjala S. (2006) Determination of the entrance pressure drop in capillary rheometry using Bagley correction and zero-length capillary. Annual transactions of the nordic rheology society, 14, P.1-5

### References

1. Rao, M.A. (2014) Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods, Food Engineering Series, DOI 10.1007/978-1-4614-9230-6\_2, Springer Science+Business Media New York
2. Chhabra, R.P., Richardson, J.F. (2008) Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications, 519 p.
3. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Rheology and Rheological Measurements, John Wiley & Sons, New York, 1992.

4. Van Oort, E., Vajargah, K., Hoxha, B. (2015). U.S. Patent Appl. 2015/0330213 A1. Systems and Methods for Determining a Rheological Parameter
5. 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
6. Pistun, Ye.P., Matiko, H.F., Krykh, H.B. (2022) Algorithmization of designing gas-hydrodynamic measuring transducers using structural and parametric optimization. 8th International Conference «Energy Smart Systems – 2022», ESS 2022 - Proceedings, P. 264-268. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969338
7. Drevetskyi, V.V., Voyevoda, V.V. (2015) Patent 102560 (UA), MPC G01N 11/08. Device for measuring rheological parameters of viscoplastic liquids.
8. Steffe, J.F. (1996) Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd edition. Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 418 p.
9. Pistun, Ye.P., Matiko, H.F., Krykh, H.B. (2022) Improving the hydrodynamic devices for measuring rheological parameters of liquids. Computer-integrated technologies: education, science, production, 48, P.5-12
10. Clarke, P.G., Murphy, M.P. (2017) Modular Capillary Bridge Viscometer, U.S. Patent 9,612,183 B2
11. Aho, J. and Syrjala S. (2006) Determination of the entrance pressure drop in capillary rheometry using Bagley correction and zero-length capillary. Annual transactions of the nordic rheology society, 14, P.1-5