

*Е.В. БІЛЕЦЬКИЙ*, д-р техн. наук, проф., ХТЕІ КНТЕУ, Харків

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕ НЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН**

У статті розглянуто перспективний спосіб досліджень реологічних характеристик течії не ньютонівських рідин таких, як витрата, в'язкість і граничне напруження зрушення, що є важливими параметрами з точки зору ефективної організації протікання технологічних процесів переробної, харчової і хімічної промисловості.. За допомогою експериментального стенду та на підставі розв'язання системи математичних рівнянь дається адекватна оцінка реологічних характеристик широкої номенклатури речовин без використання складного та коштовного експериментального обладнання. Наведені порівняльні дані вірогідності теоретичних рішень, які добре погоджуються з результатами експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** не ньютонівські рідини, реологічні характеристики, в'язкість, напруження зрушення, витрати, пристрій, тиск.

**Постановка проблеми і її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями.** Більшість процесів хімічної, харчової та переробної промисловості присвячено вирішенню проблем удосконалення та надання нових якостей хімічним, харчовим продуктам при одночасному зменшенні енерговитрат. Особливості переробки в'язких матеріалів насамперед пов'язані з їх реологічними властивостями [1, 2].

Відомо, що більшість технологічних середовищ є складними дисперсними системами, які складаються з багатьох компонентів і, як правило, мають різноманітні реологічні властивості [3, 4]. З практики хімічних та харчових виробництв відомо багато процесів, коли один і той самий матеріал переходить з одного реологічного стану в інший. Наприклад, в харчовій галузі, при виробництві шоколаду, де в процесі шоколад переходить з в'язкого стану в твердий. В хімічній галузі, при виробництві полімерів, пластмас, будівельних сумішей. Матеріали, які зазнають механофізичні або механохімічні перетворення, як правило, мають відносно велику в'язкість, яка залежить від таких факторів як напруженість, швидкість зрушення, передісторії рідини. Ці матеріали не підпорядковуються закону Ньютона і їх не можливо описати одним параметром – коефіцієнтом в'язкості, і залежність напруження від швидкості зрушення має нелінійний характер.

© Е.В. Білецький, 2014

На сьогоднішній час існує декілька підходів до вивчення поведінки не ньютонівських систем [4]. Перший підхід – це вивчення хімічних та фізичних властивостей рідини і на підставі отриманих даних (форма і розташування молекул, міцелоутворення, концентрація) описують поведінку не ньютонівської рідини, яка досліджується.

Другий підхід – це вивчення реологічних властивостей, а саме – встановлюється зв'язок між напруженням і швидкостями зрушення шляхом побудови математичної реодинамічної моделі. Такий підхід називається феноменологічним. Дані про в'язкість матеріалів для побудови математичних моделей отримують за допомогою експериментальних реометричних досліджень.

В реальних умовах виробництва об'єкт досліджень не може бути повністю адекватним побудованій моделі так, як при її побудові використовуються різні приближення та узгодження. З огляду на це основним засобом підтвердження вірогідності отриманих теоретичних рішень є експериментальні дослідження та на їх підставі оцінка адекватності отриманих моделей [3, 4].

З огляду на вище сказане, у даній статті наведено порівняльні данні експериментів з висновками теоретичної моделі течії неньютонівської рідини.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Як вже було зазначено, метою експериментальних досліджень є перевірка деяких реологічних характеристик течії не ньютонівських рідин. У якості об'єкта перевірки обирається модель течії бінгамовської рідини в пласкому каналі. Перевірка відповідності модельної течії в пласкому каналі здійснювалася на різних матеріалах таким чином, що реологічні характеристики цих матеріалів приймали різні за величинами значення в'язкості та граничного напруження зрушення. Експериментальні дослідження проводилися в широкому діапазоні зміни швидкості зрушення. Вимірювальні величини мають інтегральний характер. Вимір локальних характеристик течії не проводився.

З огляду на це, нами було розроблено та виготовлено експериментальний стенд (рис. 1), який дозволив дослідити та адекватно оцінити такі реологічні характеристики течії не ньютонівських рідин, як витрата, в'язкість і граничне напруження зрушення, що є важливими з точки зору ефективності протікання технологічних процесів харчової і хімічної промисловості [5].

Новизна технічного рішення підтверджена патентом України на корисну модель [6]. Вимірювання реологічних характеристик не ньютонівських рідин на даному стенді безпосередньо відбувалося за допомогою живильного циліндру 6 з охолоджуючою сорочкою 8, що покрита теплоізоляцією, всередині

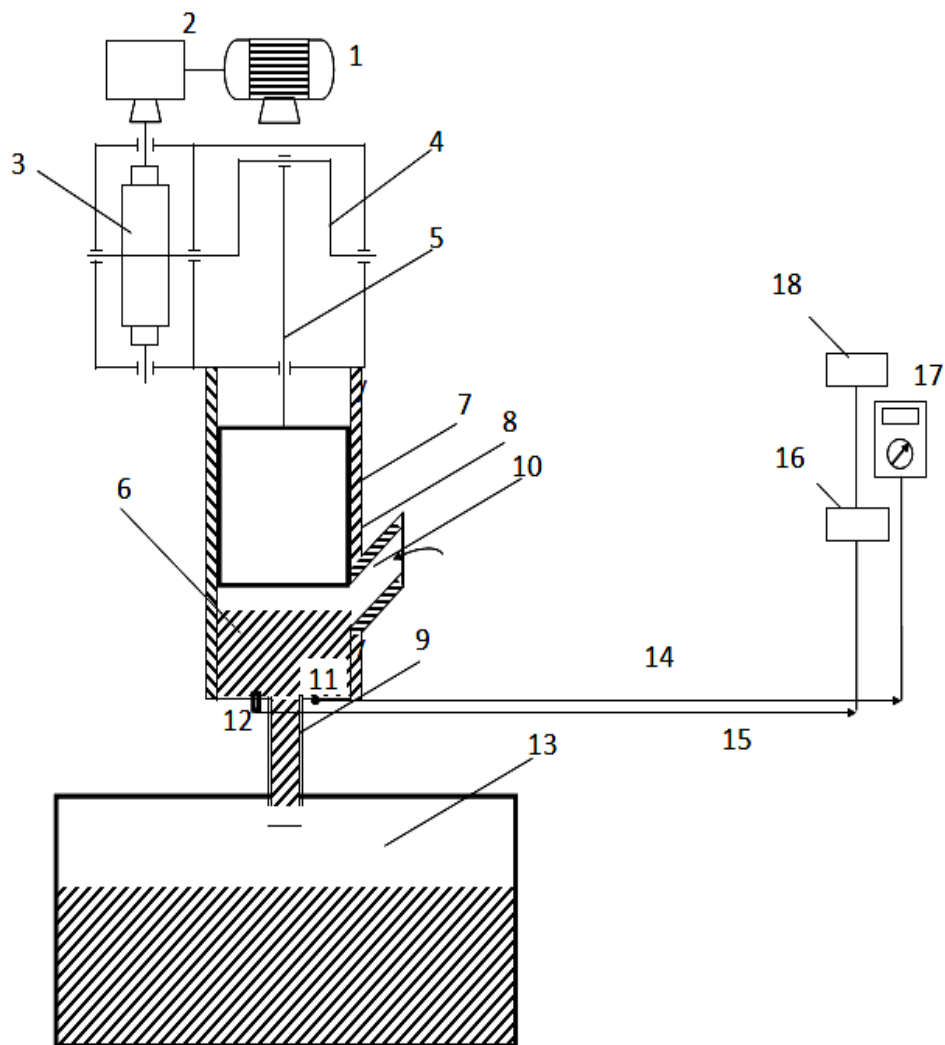


Рис. 1 – Пристрій для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських рідин: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – черв'ячний редуктор; 4 – колінчатий вал; 5 – шток; 6 – живильний циліндр; 7 – поршень; 8 – охолоджуюча сорочка; 9 – капіляр; 10 – завантажувальна воронка; 11 – термопара; 12 – тензодатчик; 13 – приймальна ємність; 14 – дріт термопари; 15 – дріт тензодатчика; 16 – тензопосилувач; 17 – вольтметр; 18 – самописний прилад.

живильного циліндра 6 розміщено поршень 7 зі штоком 5, шток 5 робить зворотно-поступальний рух, який здійснюється шляхом передачі обертання через черв'ячний редуктор 3 на колінчатий вал 4, до нижнього торця живильного циліндру 6 приварено гладку трубку у вигляді капіляра 9, через який досліджувана рідина поступала в приймальну ємність 13, під час знаходження поршня 7 у крайньому верхньому положенні нова порція рідини поступала через завантажувальну воронку 10 у живильний циліндр 6, у нижній частині живильного циліндру 6 розташовано термопару 11 з наступним виведенням сигналу за допомогою дроту термопари 14 на вхід цифрового вольт-

метра 17, і тензодатчик 12 з наступним виведенням сигналу за допомогою дроту тензодатчика 15 через тензопосилувач 16 на самописний прилад 18.

За допомогою даного пристрою нами було досліджено: величину тиску, витрати, в'язкість та граничне напруження зрушення матеріалів, що підлягали дослідженню.

Вимірювання реологічних характеристик течії неньютонівських рідин здійснювалось наступним чином. Порція досліджуваного матеріалу після підготовки зважувалась і поміщалась в живильний циліндр 6 через завантажувальну воронку 10, коли поршень 7 знаходився у крайньому верхньому положенні. Після заповнення живильного циліндру 6 досліджуваним матеріалом поршень 7 повертався назад. Шток 5 поршня 7 здійснював зворотно-поступальний рух від приводу таким чином, щоб витрати матеріалу через капіляр 9 складали  $1 \text{ см}^3/\text{с}$  або  $2 \text{ см}^3/\text{с}$ .

При цьому за допомогою термopари 11 контролювалась температура, а за допомогою тензoметричного датчика 12 – тиск. Тензoметричний датчик 12 розміщено у нижній частині живильного циліндра 6 в місці його з'єднання з капіляром 9. Час проходження досліджуваної рідини через капіляр 9 контролювався секундоміром. За величинами витрати і тиску визначалися величини в'язкості та граничного напруження зрушення розрахунковим шляхом.

Як об'єкти досліджень характеристик течії неньютонівських рідин нами було обрано матеріали, які завдяки своїм властивостям дають змогу найбільш повно оцінити вище названі характеристики.

В таблиці 1 наведено значення основних властивостей харчових матеріалів за якими проводився експеримент [6].

Вимірювання реологічних характеристик в'язкості  $\mu_0$  та граничного напруження зрушення  $\tau_0$  неньютонівських рідин визначалися за величинами витрат і тисків у пристрою для виміру реологічних характеристик шляхом розв'язання наступної системи рівнянь:

$$\dot{V}_n^1 = \frac{\pi r_{0n}^3 \Delta P_n^{(1)}}{8 \mu_0 L_n} \left( 1 - \frac{2 L_n \tau_0}{r_{0n} P_n^{(1)}} \right), \quad (1)$$

$$\dot{V}_n^2 = \frac{\pi r_{0n}^3 \Delta P_n^{(2)}}{8 \mu_0 L_n} \left( 1 - \frac{2 L_n \tau_0}{r_{0n} P_n^{(2)}} \right),$$

у яких верхні індекси у величинах витрати й тиску означають приналежність

до першого й другого дослідів, відповідно, індекс « $n$ » ставиться до вимірювального гнізда з поршнем.

Величини витрат  $\dot{V}_n^1$  и  $\dot{V}_n^2$  визначалися за формулами:

$$\dot{V}_n^1 = \pi r_n^2 L_n / \tau_n^1, \quad (2)$$

$$\dot{V}_n^2 = \pi r_n^2 L_n / \tau_n^2,$$

у яких у чисельниках стоїть об'єм живильного циліндра, а в знаменниках – час видавлювання.

Таблиця 1 – Значення основних властивостей харчових матеріалів, що підлягали дослідженням

№ з/п	Продукт	Властивості, за температури 20 °С					
		Вологість, %	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Ефективна в'язкість, Па·с	Напруження зрушення, Па	Жирність, %	Вміст цукру, %
1	Фарш рибний (тріски)	60	1060...1080	16	180	–	–
2	Фарш рибний (скумбрія)	67	1090...1120	9	690	–	–
3	Фарш яловичий	67	1060...1080	74	825	–	–
4	Сир нежирний	74	1060...1090	32	278	–	–
5	Маса сирна	33/44	–	24/32	78/92	–	37/31
6	Сир плавлений*	33	1050...1090	18	1,5	45...50	–
7	Сир плавлений**	33	1050...1090	6	0,7	45...50	–
8	Сир плавлений***	33	1050...1090	2,4	0,4	45...50	–
9	Цукеркова маса праліне «кара-кум»*	2,4	1260...1280	130	1380	34	–
10	Цукеркова маса праліне «кара-кум»**	2,4	1260...1280	20	93	34	–

Примітка: Сир плавлений\* – значення за температури 50 °С; Сир плавлений\*\* значення за температури 60 °С; Сир плавлений\*\*\* значення за температури 80 °С; Цукеркова маса праліне «кара-кум»\* значення за температури 25 °С; Цукеркова маса праліне «кара-кум»\* значення за температури 50 °С.

Виходячи з досліджених значень витрат і тисків  $\dot{V}_n^1, \dot{V}_n^2$  та  $\Delta P_n^1, \Delta P_n^2$  були визначені значення в'язкості  $\mu_0$  та швидкості зрушення  $\tau_0$  за наступними формулами:

$$\tau_0 = \frac{\gamma_0}{2L} \cdot \frac{\dot{V}^{(1)} \Delta P^{(2)} - \dot{V}^{(2)} \Delta P^{(1)}}{\dot{V}^{(1)} - \dot{V}^{(2)}}, \quad (3)$$

$$\mu_0 = \frac{\pi r_0^4}{8 L} \cdot \frac{\Delta P^{(1)} - \Delta P^{(2)}}{\dot{V}^{(1)} - \dot{V}^{(2)}}.$$

На рис. 3, 4 наведено порівняння експериментальних даних з розрахунковими значеннями  $\mu_0$  та  $\tau_0$  отриманих за допомогою виразів 2 – 3 для матеріалу № 1 фарш рибний:

При обробці даних експериментів застосовувалися методи варіаційної статистики регресійного та дисперсійного аналізу, а також методи перевірки статистичних гіпотез.

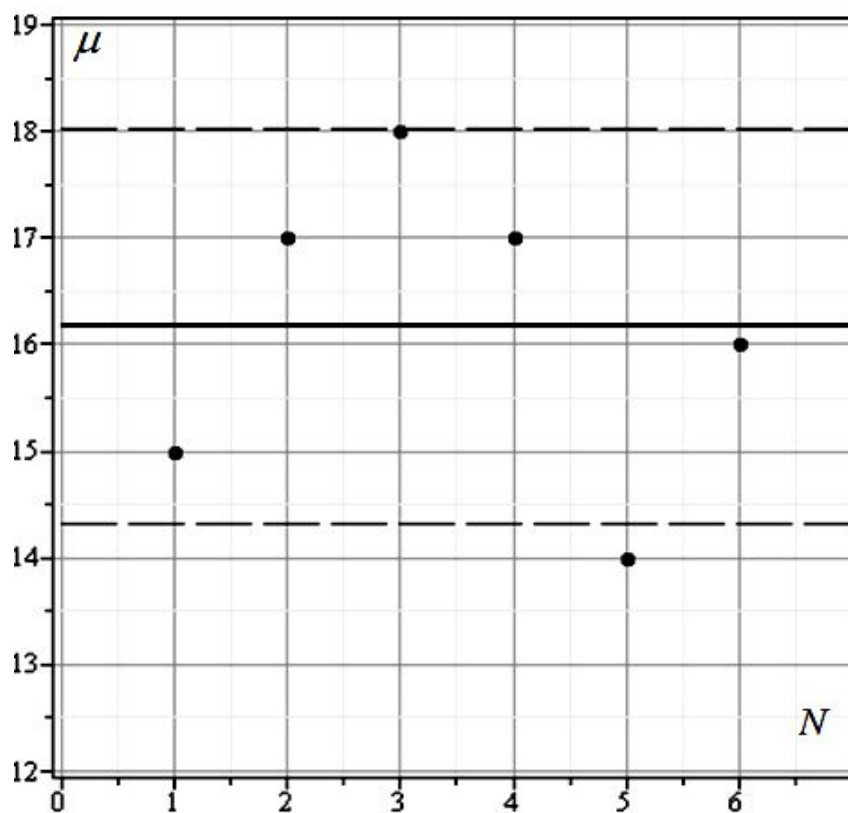


Рис. 2 – Порівняння експериментальних даних з розрахунковими значеннями  $\mu_0$  отриманих за допомогою виразів 2 – 3 для матеріалу № 1 (фарш рибний): суцільна лінія – розрахункове значення, ● – експериментальні дані.

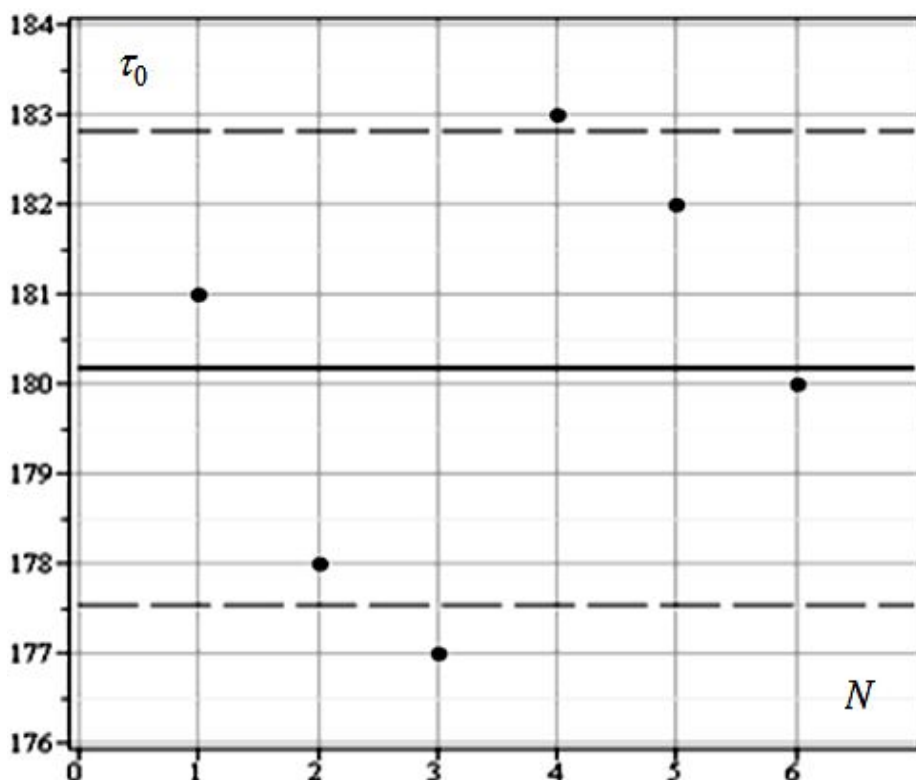


Рис. 3 – Порівняння експериментальних даних з розрахунковими значеннями  $\tau_0$  отриманих за допомогою виразів 2 – 3 для матеріалу № 1 (фарш рибний): суцільна лінія – розрахункове значення, • – експериментальні дані.

### Висновки.

Проведений аналіз показав, що експериментальні дані добре погоджуються з розрахунковими залежностями і підтверджують адекватність наведених теоретичних залежностей для визначення показників течії.

Розбіжність між теоретичними розрахунками та експериментальними даними оцінювалася методами дисперсійного аналізу з застосуванням критерію Фішера.

Обчислені фактичні значення критерію Фішера показали, що в середньому розбіжність між теоретичними кривими та експериментальними даними була не більше за 5 %.

В подальшому використання запропонованого пристрою та рішення системи рівнянь дає змогу проводити адекватну оцінку реологічних характеристик широкої номенклатури речовин без використання дорогого експериментального обладнання.

**Список літератури:** 1. *Мачихин Ю.А.* Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с. 2. *Гуць В.С.* Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-

р техн. наук.: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / В.С. Гуць – К., 1999. – 35 с. **3.** Товажнянський Л.Л. Моделювання течій не ньютонівських рідин у каналах базової геометрії: монографія / Л.Л. Товажнянський, Е.В. Білецький, Ю.А. Толчинський. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – 319 с. **4.** Арет В.А. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев. – С.-Пб.: ГИОРД, 2009. – 448 с. **5.** Білецький Е.В. Закономірності реодинаміки та теплообміну не ньютонівських рідин у каналах хіміко-технологічного обладнання: дис. ... доктора техн. наук: 05.18.08 / Білецький Едуард Володимирович. – Х., 2013. – 393 с. **6.** Пат. на корисну модель № 80031, Україна, МПК G05D 7/00, B01F 3/10 (2006.01). Пристрій для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських рідин / Білецький Е.В., Чуйко А.М.; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № у 2012 13476; заявл. 26.11.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Machihin Y.A. Inzhenernaja reologija pishhevih materialov (Engineering rheology of food stock) / Y.A. Machihin, S.A. Machihin. – Moscow: Legkaja i pishhevaja promyshlennost', 1981. – 216 p. (in Russian) **2.** Huts' V.S. Prykladna reolohiya ta intensyfikatsiya protsesiv kharchovykh vyrobnytstv (Applied rheology and intensification of food production processes) / avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya d-r tekhn. nauk.: spets. 05.18.12 «Protsesy ta obladdannya kharchovykh, mikrobiologichnyh ta pharmatsevychnykh vyrobnytstv» / V.S. Huts'. – Kyiv, 1999. – 35 p. (in Russian). **3.** Tovazhnyanskiy L.L. Modelyuvannya techiy nenyutonivskykh ridyn u kanalakh bazovoyi heometriyi: monohrafiya (Modeling of the currents non-Newton liquids in channel of base geometry) / L.L. Tovazhnyanskiy, E.V. Biletskiy, Y.A. Tolchyns'kyu. – Kharkov: NTU «HPI», 2013. – 319 p. **4.** Aret V.A. Fiziko-mehaniicheskie svojstva syr'ja i gotovoj produkcii (Physico-mechanical properties of raw materials and finished products) / V.A. Aret, B.L. Nikolaev, L.K. Nikolaev. – St.-Peterburg: GIORД, 2009. – 448 p. ( in Russian). **5.** Biletskiy E.V. Zakonomirnosti reodinamiki ta teploobminu nenyutonivskih ridyn u kanalakh himiko-tehnologichnogo obladdannya (Behavior of non-Newtonian liquid rheodynamics and heat transfer in chemical engineering equipment channels): dis. d-r tehn. nauk: 05.18.08 / Biletskiy Eduard Volodimirovich. – Kharkov, 2013. – 393 p. **6.** Pat. for useful model 80031, Ukraine, MPK G05D 3/10 (2006/01), G05D 7/00, V01F. Device for measurement of the rheological features non-Newton liquids / Biletskiy E.V., Chuiko, A.M.; proposer and patent owner Kharkov trade-economic institute KNTEU. – № u 2013 13476; decl. 26.11.12; publ. 13.05.13, Bul. № 9.

*Поступила (Received) 15.10.14*