

УДК 643.33:547.128

Білецький Е.В., Толчинський Ю.А.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН У КАНАЛАХ

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** В реальних умовах технологічного процесу об'єкт досліджень не може бути повністю адекватним побудованій математичній моделі так, як при її побудові застосовувалися різні приближення та узгодження. Тому основним засобом підтвердження вірогідності отриманих теоретичних рішень є експериментальні дослідження та на їх підставі оцінка адекватності отриманих моделей [1–4]. З огляду на вище сказане, у даній статті пропонується пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії неньютонівських рідин та спеціальна розрахункова методика, яка дозволяє провести перевірку експериментальних даних з теоретичними результатами моделей течії.

**Мета та задачі статті.** На сьогоднішній день для проведення досліджень гідравлічних характеристик у роботах [5–7] запропоновані різноманітні методики та установки, які мають певні недоліки і не в повній мірі відповідають усім вимогам, щодо проведення експерименту. З огляду на це, для дослідження течії неньютонівських рідин в плоскому каналі було розроблено та виготовлено експериментальний стенд (рис. 1), який дозволив дослідити та адекватно оцінити наступні характеристики: тиск, температуру, витрату і потужність, що є найголовнішими з точки зору ефективності протікання технологічних процесів хімічної і харчової промисловості [1–4].

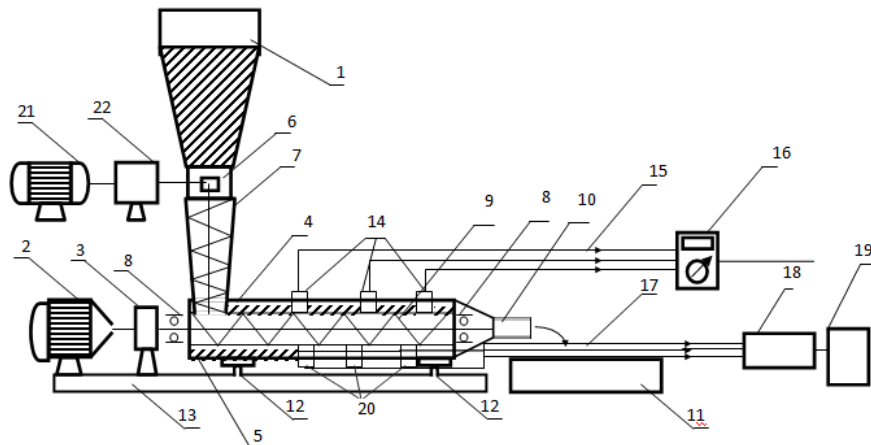


Рисунок 1 – Пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії неньютонівських рідин:

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – шнековий нагнітач;
- 5 – охолоджуюча сорочка; 6 – з'єднувальна труба; 7 – живильник-дозатор; 8 – підшипникові вузли; 9 – черв'як; 10 – мундштук; 11 – приймальна ємність; 12 – опори; 13 – опорна рама;
- 14 – термопари; 15 – дроти термопар; 16 – вольтметр; 17 – дроти; 18 – тензопосилувач;
- 19 – самописний прилад; 20 – тензодатчики; 21 – електродвигун; 22 – редуктор

**Викладення основного матеріалу.** Як видно з рис. 1 нижня частина завантажувального бункера 1 виконана у вигляді конуса, до якого прикріплена з'єднувальна труба 6, що переходить в корпус живильника-дозатора 7, який являє собою конічний корпус, одна основа якого кріпиться до з'єднувальної труби 6, а друга

основа з'єднана живлячим отвором шнекового нагнітача 4, в середині живильника-дозатора 7 розташований шнековий елемент зі шагом, що зменшується до виходу шагом і розміром пера витків, шнековий нагнітач 4 виконаний у вигляді циліндричної товстостінної труби з охолоджуючою сорочкою 5, в якій з обох сторін розташовані підшипникові вузли 8, в яких розміщено суцільний однохідний черв'як 9, поверхня якого разом з внутрішньою поверхнею циліндричної труби утворює гвинтовий канал постійного перетину прямокутної форми, на вихідному кінці шнекового нагнітача 4 розташований конічний перехідник, до кінця якого кріпиться мундштук 10, який являє собою циліндричну товстостінну трубку і через який рідина поступає в приймальну ємність 11, корпус шнекового нагнітача 4 разом з понижуючим редуктором 3 і електродвигуном 2 за допомогою спеціальних опор 12 прикріплюється жорстко до опорної рами 13 анкерними болтами, у верхній частині робочої камери шнекового нагнітача 4 розташовані термопар 14 з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів термопар 15 на вхід цифрового вольтметра 16, у нижній частині робочої камери шнекового нагнітача 4 розташовані тензодатчики 20 з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів тензодатчиків 17 через тензопосилувач 18 на самописний прилад 19. У якості об'єкта перевірки було обрано 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.

Як вказувалося вище, за допомогою даного пристрою було проведено вимірювання величин тиску, температури, витрати і швидкості руху досліджуваних матеріалів. Величина тиску вимірювалася за допомогою спеціальних тензометричних датчиків тиску в'язкопластичних матеріалів 20, в якості чутливого елемента датчика використовувалась пластина з нержавіючої сталі X18H10T, яка має високу механічну міцність та корозійну стійкість. Дані тензодатчики дозволяли проводити вимірювання у діапазоні температур від 273–475 К з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів тензодатчиків 17 через тензопосилувач «ТОПА3-3» 18 на самописний прилад 19 типу КСП-4. Використання тензопосилувача дозволяло одночасно визначати тиск у всіх точках нагнітача. Перед початком експерименту тензодатчики були проградуировані на гідравлічному пресі з використанням трансформаторного мастила. Тензометричні датчики тиску з термокомпенсаторами включалися за напівмостовою схемою, в якій діючий і пасивний терморезистори розміщено в сусідніх плечах моста, а в двох інших плечах моста знаходилися постійні резистори. Діючий і пасивний терморезистори було наклеєні на дно і бокову стінку спеціального стакану, а сам стакан розміщувався в міцному корпусі. Фіксація всієї системи вимірювання здійснювалася притискною гайкою. Стакани з тензодатчиками 20 розміщувалися в боковій стінці шнекового нагнітача 4 в спеціальному заглибленні таким чином, щоб вимірювався подовжній тиск в матеріалі максимальної величини. Шнековий нагнітач 4 під час роботи виділяв дисипативне тепло, яке відводилося через охолоджуючу сорочку 5 з холодною водою.

Температура матеріалу в робочій камері шнекового нагнітача 4 вимірювалася за допомогою хромель-капелевих термопар 14 з діапазоном зміни температур від 273–380 К з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів термопар 15 на вхід цифрового вольтметра 16.

Вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин здійснювалося наступним чином. Порція досліджуваного матеріалу зважувалась на електронних вагах ВН-13Ц та поміщалась в завантажувальний бункер 1. В завантажувальному бункері 1 матеріал за допомогою електродвигуна 21, редуктора 22 і лопатного змішувача перемішувалася, кондиціонувалася за температурою і поступала в живильник-дозатор 7. В живильнику-дозаторі матеріал ущільнювався і поступав через живильний отвір шнекового нагнітача 4 в його робочу камеру. Проходячи крізь шнековий нагнітач 4 досліджуваний матеріал виходив через отвір мундштука 10 в приймальну ємність 11. Тривалість кожного окремого дослідження контролювалася за допомогою секундоміра (близько 60 секунд). В ході дослідів температура контролювалася за допомогою термопар 14, розташованих на вході і виході шнекового нагнітача 4. За рахунок відведення дисипативного тепла температура в робочій камері шнекового нагнітача 4 підтримувалася на рівні 20 °С. У ході експериментів також змінювалось число обертів валу шнекового нагнітача 4, що досягалось зміною діаметра з'йомного шківів. Таким чином регулювалася швидкість руху досліджуваних матеріалів та визначалась потужність електродвигуна.

На підставі отриманих значень витрат та тиску було розроблено спеціальну розрахункову методику та проведено перевірку експериментальних даних з теоретичними результатами моделей течії.

Методика розрахунку полягає в наступному. Ґрунтуючись на виборі геометричних розмірів каналу черв'яка, можна вважати цей канал близьким до плоского [8–9]. У цьому випадку, впливом другої пари стінок можна зневажити так, що для розрахунків можна застосовувати теоретичні моделі опису течії у каналах базової геометрії, які наведені у роботах [8,9]. Звідки, вираження для визначення координат границь мають такий вигляд:

$$\gamma^{\pm} = \delta\gamma \pm \gamma; \quad \gamma = \frac{\tau_0}{dP}; \quad \delta\gamma = \frac{\mu(W^+ - W^-)}{2h\tau_0}. \quad (1)$$

Підстановка цих виражень у формулу для визначення витрати (8,9) приводить до такого його вираження:

$$V_1 = (W^+ + W^-)h - (W^+ - W^-)h\delta\gamma_1 - \frac{2}{3} \frac{h^2}{\mu_0} \frac{dP_1}{d\zeta_1} \left(1 - \frac{3}{2}\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma_1^3 - \frac{3}{2}\gamma_1(\delta\gamma_1)^2 - 3(\delta\gamma_1)^2\right). \quad (2)$$

Формула (2) описує витрату при течії у плоскому каналі. Течія у круглій трубі має витрату, що обчислюється за наступною формулою:

$$V_2 = \frac{\pi r_0^3}{8\mu_0} \frac{dP_2}{d\zeta_2} \left(1 - \frac{4}{3}\gamma_2 + \frac{1}{3}\gamma_2^4\right). \quad (3)$$

Слід пояснити, що у формулах (2) і (3) для розрізнення характеристик течії, що відносяться до плоского каналу й труби, використовуються індекси «1» і «2» відповідно. Система рівнянь для обчислення витрати течії має такий вигляд:

$$V_1 = V_2; \quad \frac{dP_1}{dZ_1} L_1 + \frac{dP_2}{dZ_2} L_2 = 0, \quad (4)$$

де  $L_1$  – довжина плаского каналу, м;  $L_2$  – довжина труби, м.

Стосовно до черв'ячного обладнання, приймаємо, що величина  $L_1$  це довжина гвинтової лінії каналу витків,  $L_2$  – довжина мундштука;  $r_0$  – радіус мундштука. Чисельний аналіз показує, що без значної втрати точності можливі наступні спрощення:

$$1 - \frac{3}{2}\gamma_i + \frac{1}{2}\gamma_i^3 \approx 1 - \gamma_i; \quad (5)$$

$$1 - \frac{4}{3}\gamma_2 + \frac{1}{3}\gamma_2^4 \approx 1 - \gamma_2.$$

Рішення системи рівнянь (4-5) приводить до наступних результатів:

$$\frac{dP_1}{d\zeta_1} = \frac{3\mu_0(W^+ - W^-)}{2h_1} \left\{ 1 + \frac{\mu_0(W^+ - W^-)}{2h\tau_0} \times \frac{\gamma_1}{(1-\gamma_1)^2} \right\} \times \frac{1}{1 + \xi \frac{3\pi r_0^3}{s16a_1h_1^2} \times \frac{1-\gamma_1/\xi_s}{1-\gamma_1}},$$

$$V_1 = V_2 = V = (W^+ + W^-) a_1 h_1 \left\{ 1 + \frac{\mu_0(W^+ - W^-)}{2h\tau_0} \times \frac{\gamma_1}{(1-\gamma_1)^2} \right\} \times$$

$$\times \frac{\xi_s (\pi r_0^3 / 16a_1 h_1^2) \times (1 - \gamma_1 / \xi_s)}{1 + \xi_s (\pi r_0^3 / 16a_1 h_1^2) \times (1 - \gamma_1 / \xi_s)},$$

$$\xi_s = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{r^0}{h}.$$

У випадку гвинтового каналу в системі координат, що обертається разом із черв'яком, величину швидкості  $W_1$  слід вважати рівною нулю. Для величини  $\gamma^\pm$  добрим наближенням є наступне вираження:

$$\gamma_1 \approx \frac{2h\tau_0}{3\mu_0 W_1^+} \times \left( 1 + \frac{2}{3} \times \frac{3\pi r_0^3}{16a_1 h_1^2} \xi_s \right). \quad (7)$$

Дослідження проводилися з використанням двох варіантів черв'яків. Характеристики плаского каналу визначалися за допомогою наступних співвідношень:

$$L_1 = n \times \sqrt{t_B^2 + \pi^2 D^2}, \quad \text{tg}\varphi_B = t_B / \pi D, \quad (8)$$

$$a_1 = t_B \cos \varphi_B,$$

де  $t_B$  – крок черв'яка, мм;  $n$  – число витків;  $\varphi_B$  – кут підйому пера черв'яка, град.

Підстановка результатів розрахунків по формулах (8) у формули (6) приводить до таких виражень для визначення величини витрати черв'ячного пристрою:

$$\dot{V} = 33,2 \times N \left\{ 1 + \frac{0,63\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,60(1-\gamma/7,14)}{1+0,60 \times (1-\gamma/7,14)/(1-\gamma)},$$

$$\gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0},$$
(9)

$$\dot{V} = 83,5 \times N \left\{ 1 + \frac{0,67\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,68(1-\gamma/5,80)}{1+0,68 \times (1-\gamma/5,80)/(1-\gamma)},$$

$$\gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0}.$$

Перша з формул (9) відноситься до черв'яка із кроком  $t_B = 86$  мм і глибиною каналу  $2h = 7$  мм; а друга до черв'яка із кроком  $t_B = 132$  мм і глибиною каналу  $2h = 14$  мм.

Повна потужність черв'ячного пристрою являє собою суму потужностей, що складається з холостого ходу, переміщення матеріалу, теплової дисипації в каналі черв'яка й теплової дистанції в трубі мундштука. Вираження для цих потужностей має такий вигляд:

$$W_{\text{трансп.}} = \frac{3\mu_0 L_1 \dot{V}^2}{2a_1 h_1^3 \left( \frac{3\pi r_0^3}{16a_1 h_1^2} \xi_s \right) \times \frac{1-\gamma_1/\xi_s}{1-\gamma_1}}.$$
(10)

Підстановка геометричних характеристик черв'ячного пристрою у формулу (10) приводить до таких результатів:

$$W_{\text{трансп.}} = \frac{\mu_0 \dot{V}^2}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \cdot 5,25 \cdot 10^{-4}.$$
(11)

$$W_{\text{дисс.черв.}} = 5,94 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times \left[ (1-\gamma_1^+)^3 + (1+\gamma_1^-)^3 \right].$$
(12)

$$W_{\text{дисс. мундит.}} = 8,67 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times 2(1-\gamma_1/7,14)^3. \quad (13)$$

$$W_{\text{трансп.}} = 0,36 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_0 \dot{V}^2}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}}. \quad (14)$$

$$W_{\text{дисс. черв.}} = 0,19 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times \left[ (1-\gamma_1^+)^3 + (1+\gamma_1^-)^3 \right]. \quad (15)$$

$$W_{\text{дисс. мундит.}} = 0,22 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times 2(1-\gamma_1/5,80)^3. \quad (16)$$

Наведені формули (11–16) дозволяють порівняти отримані результати експерименту з розрахунковими даними для умов експерименту і розраховувалися для черв'яків двох видів. Вимір числа оборотів вала пристрою відбувався в межах:  $0,5 \leq N \leq 4$  об/с. Отримані формули записані в такому вигляді й з такими множниками, щоб величина  $\dot{V}$  обчислювалася в  $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$  для спрощення порівняння з експериментальними даними.

При обробці даних експериментів застосовувалися методи варіаційної статистики, регресійного та дисперсійного аналізу, а також методи перевірки статистичних гіпотез [10–11].

**Висновки.** Проведений аналіз показав, що експериментальні дані добре погоджуються с розрахунковими залежностями та знаходяться у межах припустимої погрішності. Новизна технічного рішення підтверджена патентом України на корисну модель [12].

#### Література

1. Процеси та апарати хімічної технології : у 2 ч. Ч. 1 / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.П. ГОТЛИНСЬКА, В.О. ЛЕЩЕНКО [та інші]; під загальною редакцією Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО.– Х. : НТУ"ХПІ", 2004. – 632 с.
2. Андреев А.А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей / А.А. Андреев. – М. : Госэнергоиздат, 1961 – 116 с.
3. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М. : Химия, 1987. – 496 с.

4. Машини та апарати у хімічних, харчових і переробних виробництвах: підручник / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, В.П. ШАПОРЕВ, В.Ф. МОІСЕЄВ [та ін.]. – Х. : Колегіум, 2011. – 606 с.
5. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение : учебн. пособие / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, С.И. БУХКАЛО, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН. – Х. : НТУ «ХПИ», 2005. – 460 с.
6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / В.Т. Чоу; пер с англ. – М. : Стройиздат, 1968. – 464 с.
7. Jansseune T. Rheology and rheological morphology determination in immiscible two-phase polymer model blends / T. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [et. al.] // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2000. – P. 153–165.
8. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Моделювання течій неньютонівських рідин у каналах базової геометрії : монографія / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е.В. Білецький, Ю.А. Толчинський. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 319 с.
9. Білецький Е.В. Течія в'язкопластичної рідини в плоскому каналі / Е.В. Білецький, Ю.А. Толчинський, О.В. Петренко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – №37(10). – С. 122–126.
10. Агошков В.И. Проекционные и вариационные методы анализа / В.И. Агошков, Г.И. Марчук. – М. : Наука, 1986. – 360 с.
11. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц; пер. с немец. – М. : Финансы и статистика, 1993. – 302 с.
12. Пат. на корисну модель 80033 Україна, МПК G05D 7/00, B01F 3/10 (2006.01). Пристрій для вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин / Білецький Е.В., Чуйко А.М.; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2012 13479 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл.

**Bibliography (transliterated)**

1. Protsesi ta aparati himichnoyi tehnologiyi : u 2 ch. Ch. 1 L.L. Tovazhnyanskiy, A.P. Gotlinska, V.O. Leschenko [ta inshi] ; pid zagalnoyu redaktsieyu L.L. Tovazhnyanskogo.– H. : NTU "HPI", 2004. – 632 p.
2. Andreev A.A. Teploobmennyie apparaty dlya vyazkih zhidkostey A.A. Andreev. – M. : Gosenergoizdat, 1961 – 116 p.
3. Planovskiy A.N. Protsessyi i apparaty himicheskoy i neftyanoy tehnologii A.N. Planovskiy, P.I. Nikolaev. – M. : Himiya, 1987. – 496 p.
4. Mashini ta aparati u himichnih, harchovih i pererobnih virobnitstvah: pidruchnik L.L. Tovazhnyanskiy, V.P. Shaporev, V.F. Moiseev [ta in.]. – H. : Kolegium, 2011. – 606 p.
5. Osnovnyie tehnologii pishevyih proizvodstv i energosberezhenie : uchebn. posobie L.L. Tovazhnyanskiy, S.I. Buhkalo, P.A. Kapustenko, G.L. Havin. – H. : NTU «HPI», 2005. – 460 p.
6. Chou V.T. Gidravlika otkryityih kanalov V.T. Chou; per s angl. – M. : Stroyizdat, 1968. – 464 p.
7. Jansseune T. Rheology and rheological morphology determination in immiscible two-phase polymer model blends T. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [et. al.] J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2000. – P. 153–165

8. Tovazhnyanskiy L.L. Modelyuvannya techiy nenyutonivskih ridin u kanalah bazovoyi geometriyi : monografiya L.L. Tovazhnyanskiy, E.V. Biletskiy, Yu. A. Tolchinskiy. – H. : NTU «НПІ», 2013. – 319 p.

9. Biletskiy E.V. Techiya vyazkoplachichnoyi ridini v ploskomu kanali E.V. Biletskiy, Yu.A. Tolchinskiy, O.V. Petrenko Naukovi pratsi ONAHT. – Odesa : ONAHT, 2010. – #37(10). – P. 122–126.

10. Agoshkov V.I. Proektsionnyie i variatsionnyie metody analiza V.I. Agoshkov, G.I. Marchuk. – M. : Nauka, 1986. – 360 p.

11. Ferster E. Metodyi korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza E. Ferster, B. Rents; per. s nemets. \* M. : Finansyi i statistika, 1993. – 302 p.

12. Pat. na korisnu model 80033 UkraYina, MPK G05D 7/00, V01F 3/10 (2006.01). Pristriy dlya vimiryuvannya harakteristik techiyi nenyutonivskih ridin / Biletskiy E.V., Chuyko A.M.; zayavnik ta patentovlasnik Harkivskiy torgovelnо-ekonomichniy Institut KNTEU. – # u 2012 13479 ; zayavl. 26.11.2012 ; opubl. 13.05.2013, Byul. # 9. – 4 p. : il.

УДК 643.33:547.128

Белецкий Э.В., Толчинский Ю.А.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ  
ЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ**

В статье предлагается стенд для измерения гидравлических характеристик течений неньютоновских жидкостей и специальная расчетная методика, которая позволяет исследовать и адекватно оценить следующие показатели процесса: давление, температуру, расход, и мощность.

Biletskiy E.V., Tolchinskiy Y.A.

**EXPERIMENTAL DEVICE FOR MEASURING HYDRAULIC CURRENT  
OF NON-NEWTONIAN LIQUIDS IN CHANNELLS**

The article presents a device for measuring hydraulic behaviour of non-newtonian liquid currents which makes it possible to study and adequately evaluate the following characteristics of the process – pressure, temperature, losses, and capability.