

## **ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ ПІД ЧАС ТЕЧІЇ СТЕПЕНЕВИХ РІДИН**

**Е.В. Білецький, О.В. Петренко**

*Розглянуто дослідження гідравлічних характеристик течії ньютонівських рідин під час звуження, розширення та повороту в каналі технологічного обладнання, що є важливими з точки зору ефективності протікання технологічних процесів харчової та хімічної промисловості. Уперше визначено гідравлічні місцеві опори під час течії кремнійорганічних рідин.*

**Ключові слова:** степенева рідина, течія, гідравлічні опори, теплоносій, ступінчастий канал.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ТЕЧЕНИИ СТЕПЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

**Э.В. Белецкий, Е.В. Петренко**

*Рассмотрены исследования гидравлических характеристик течения ньютоновских жидкостей при сужении, расширении и повороте в канале технологического оборудования, что являются важными с точки зрения эффективности протекания технологических процессов пищевой и химической промышленности. Впервые определены гидравлические местные сопротивления кремнийорганических жидкостей.*

**Ключевые слова:** степенная жидкость, течение, гидравлические сопротивления, теплоноситель, ступенчатый канал.

## **THE DEFINITION OF HYDRAULIC RESISTANCES UNDER FLOWING OF NON-NEWTONIAN FLUIDS**

**E. Biletsky, O. Petrenko**

*The research paper is devoted the study of non-Newtonian fluid flowing in channels of technological equipment in food production.*

*Local resistance coefficients in the form of integrated formulae for wide range of Reynolds numbers were theoretically and experimentally studied and determined. The formulae for description of hydraulic resistances at tapering, widening and bending of the channel were built with use of the analogy approach.*

*The experimental installation which allows measuring of pressure losses at the mentioned sections for flowing of organosilicic non-Newtonian fluids like PMS-5, PMS-6, PMS-20, PMS-25 was proposed.*

*The obtained data are the crucial factors for making hydraulic processes calculations in food production technological equipment for reducing of energy costs and materials consumption.*

**Keywords:** *non-Newtonian fluid, flow, hydraulic resistance, coolant, stepped channel.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Основні процеси хімічної та харчової промисловості пов'язані з рухом складних дисперсних систем, більшість із яких є неньютонівськими рідинами. Течії рідин із малими значеннями в'язкості знаходять застосування як проміжні теплоносії в оболонках теплових апаратів. Як правило, рух рідини з великою в'язкістю відбувається в каналах робочих камер різноманітних технологічних машин і залежить від багатьох параметрів, а саме: тиску, витрати, швидкості зрушення, температури, ступеня перемішування, дисперсності та ін. Таким чином, знання структури та режимів течії відіграє важливу роль в організації технологічних процесів і дозволяє впливати на їх енергоефективність шляхом установлення раціональних значень гідродинамічних, теплових, масообмінних та інших показників.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гідродиніка течії ньютонівських матеріалів у трубопроводах розглянута в багатьох працях [1–4], але течія неньютонівських рідин вивчена значно менше. Із технічної літератури [4–6] відомі різні інженерні методики, які дозволяють обчислити витрати рідини, установити значення місцевих опорів та тертя під час течії неньютонівських рідин. Рівняння, які пропонують автори А.В. Горбатов, Г.В. Маслов, Д.Е. Шліхтінська для визначення коефіцієнтів опору різняться й залежать від індивідуальних реологічних особливостей модельних середовищ. Розроблені математичні моделі течії неньютонівських матеріалів повинні мати достатню достовірність отриманих результатів. У реальних умовах об'єкт досліджень не може бути повністю адекватним побудованій моделі тому що під час її побудови застосовувалися різні приближення та узгодження. Тому основним засобом підтвердження достовірності отриманих теоретичних рішень є експериментальні дослідження та на їх підставі оцінка адекватності отриманих моделей. Проте варто зазначити, що це є дуже складним завданням і на сьогодні більшість результатів, які отримані емпіричними методами, відрізняються один від одного.

**Мета статті.** Дослідження течії ступеневої рідини з метою побудови виражень для визначення місцевих опорів у ступінчастому каналі та в процесі повороту на основі аналогічних гідравлічних опорів під час течії ньютонівської рідини. Достовірність отриманих рішень

підтверджується шляхом проведення експериментальних досліджень та на їх підставі оцінки адекватності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для побудови виразень визначення місцевих опорів під час течії ступінчастої рідини в ступінчастому каналі та в процесі повороту (які є найбільш поширеними в технологічному обладнанні) було проаналізовано поведіння течії ньютонівської рідини в каналах з аналогічними гідравлічними опорами. Використовуючи відомі вираження [4–6], за допомогою методу аналогії [7] побудовано формули для опису гідравлічних опорів під час звуження каналу (1) та розширення каналу (2):

$$\xi_{\mathcal{M}} = 0,5 \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{3}{4}} + \frac{15}{\sqrt{\text{Re}}} \cdot \left[ 1 - f_1 \left( \text{Re}, \frac{S_1}{S_2} \right) \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (1)$$

$$\xi_{\mathcal{M}} = 0,5 \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 + \frac{9}{\sqrt{\text{Re}}} \cdot \left[ 1 - f_1 \left( \text{Re}, \frac{S_1}{S_2} \right) \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (2)$$

де  $\xi_{\mathcal{M}}$  – коефіцієнти місцевого опору;  $S_1/S_2$  – відношення площ поперечних перетинів вузької та широкої частини каналу, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса.

Наведені формули подані у вигляді суми величин, що пов'язані з прискоренням або уповільненням потоку, якщо є звуження або розширення, і поворотом потоку на деякий кут. Прискоренню або уповільненню відповідають перші доданки, а повороту ліній струму – другі доданки виразень (1, 2). Частина енергії, яка витрачається на поворот, є пропорційною величині кута повороту  $f_1$ , який можна виразити через поперечні розміри каналу та довжину відрізка лінії струму під час повороту за допомогою співвідношення:

$$f \sim \arcsin \frac{\left[ 1 - \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\text{Re}^{\frac{m}{-}}}. \quad (3)$$

Течія ньютонівської рідини під час повороту визначається дією відцентрової сили, що спричиняє вторинні вихрові течії та обертання рідини. Так, цю течію представлено, як течію зі звуженням та розширенням із відокремленням від неї вторинної течії.

Використовуючи принцип аналогії, для різних випадків числа Рейнольдса отримано формули для визначення місцевих опорів.

Для випадку  $500 \leq Re \leq 6000$  для поворотів із малим радіусом закруглення (4), для поворотів із великим радіусом закруглення (5):

$$\xi_M \approx \frac{25\varphi}{\left(\operatorname{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,5}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,58}, \quad (4)$$

$$\xi_M \approx \frac{35\varphi}{\left(\operatorname{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,5}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,28}. \quad (5)$$

Для випадку  $6000 \leq Re \leq 40000$  для поворотів із малим радіусом закруглення (6), для поворотів із великим радіусом закруглення (7):

$$\xi_M \approx \frac{5\varphi}{\left(\operatorname{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,45}, \quad (6)$$

$$\xi_M \approx \frac{7\varphi}{\left(\operatorname{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,23}, \quad (7)$$

де  $\frac{d}{D}$  – відношення діаметрів окружностей повороту.

Для визначення місцевих опорів, у випадку течії степеневі рідини, у наведених рівняннях залежність від числа  $Re$ , яке визначене для ньютонівської рідини, підставлено число Рейнольдса для степеневі рідини, яке визначено за формулами:

$$\text{Re}_n = \frac{d^n \cdot v^{2-n} \rho}{\frac{\mu_0}{8} \left(6 + \frac{2}{n}\right)^n}, \quad \mu = \mu_0 \varepsilon^{n-1}, \quad (8)$$

де  $v$  – швидкість течії, м/с;  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_0$  – в'язкість рідини за нульової швидкості зрушення, Па;  $\varepsilon$  – швидкість зрушення, с<sup>-1</sup>.

Отримані залежності дають достатнє наближення до експериментальних даних (у межах 5...15%) та представляють простий аналітичний метод визначення гідравлічних опорів під час течії в трубопроводах та оболонках технологічних апаратів хімічних та харчових виробництв.

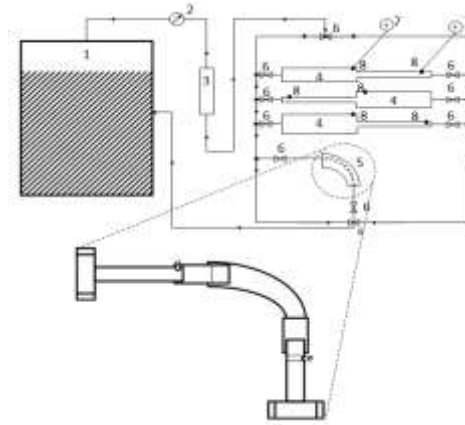
Як зазначалося раніше, для підтвердження адекватності теоретичної моделі було проведено серію експериментів із вимірювання гідравлічних місцевих опорів ступеневих рідин. Як об'єкт дослідження ступеневих рідин було обрано кремнійорганічні теплоносії – поліметилсилоксанові рідини (ПМС). Значення основних властивостей кремнійорганічних рідин, що підлягали дослідженням, наведено в таблиці.

Таблиця

**Значення основних властивостей кремнійорганічних рідин,  
що підлягали дослідженням**

Марка ступеневої рідини	Властивість		
	Кінематична в'язкість за температури 20 <sup>0</sup> С, 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	Температура спалаху у відкритому тиглі, <sup>0</sup> С	Масова частка кремнію, %
ПМС-5	4,5...5,5	116	35,5...37
ПМС-6	5,6...6,6	130	35,5...37
ПМС-20	19,2...20,8	200	37...38,5
ПМС-25	22,5...27,5	200	37...38,5

Для підтвердження висновків теоретичних моделей було розроблено та виготовлено експериментальний стенд для вимірювання втрат тиску на ділянках розширення, звуження та повороту труби гідравлічних місцевих опорів ступеневих рідин (рис. 1) [7].



**Рис. 1. Пристрій для вимірювання гідравлічних місцевих опорів ступеневих рідин: 1 – живильний циліндр; 2 – насос; 3 – ротаметр; 4 – система труб змінного діаметра; 5 – поворот; 6 – вентилі; 7 – манометри; 8 – пробки для вводу манометричних трубок**

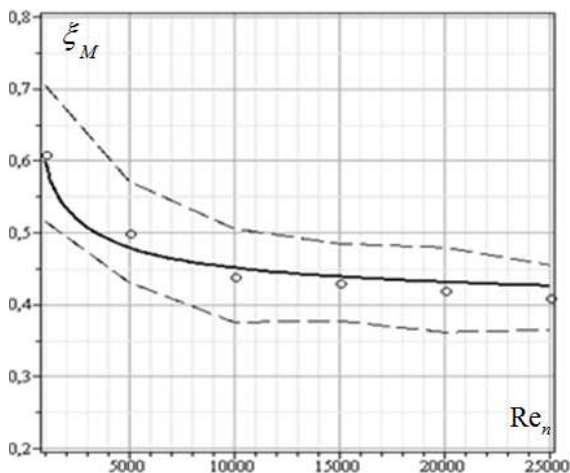
За допомогою даного стенда було проведено вимірювання гідравлічного опору кремнійорганічних рідин таким способом: теплоносієм, що підлягав дослідженню, заповнювався живильний циліндр 1, через заглиблену трубу теплоносієй засмоктувався насосом 2 і надходив у трубу, у розриві якої розміщено ротаметр 3. Після проходження ротаметра теплоносієй надходив в одну з гілок системи, кожна з яких складається з паралельно розташованих опорів розширення, звуження 4, повороту 5. Перепад тисків до і після місцевого опору вимірювався за допомогою манометрів 7, які розташовано в пробках для вводу манометричних трубок 8. Напрямок потоку теплоносія здійснювався за допомогою вентилів 6. За однокових або близьких значень висоти розташування ротаметра 3 проводилися виміри різниці тисків до й після місцевого опору. Потім розрахунковим шляхом було визначено величини місцевого опору.

Місцеві опори під час течії ступеневої рідини (кремнійорганічних теплоносіїв) визначали за формулою:

$$\xi_n = \frac{P_{\text{після}} - P_{\text{до}}}{P_{\text{тн}}} \cdot \frac{W^2}{2}, \quad (8)$$

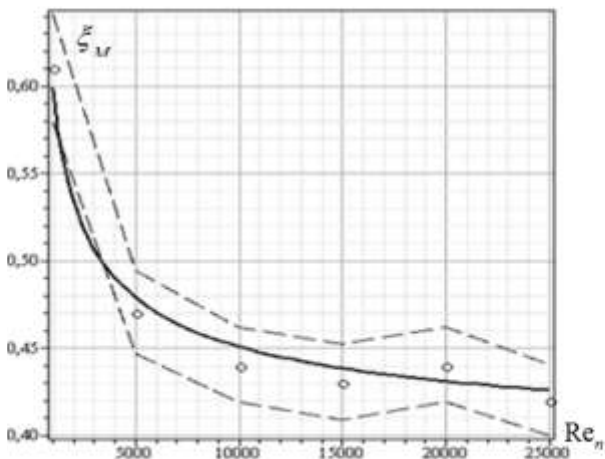
де  $P_{\text{після}}$  та  $P_{\text{до}}$  – значення тисків після й до проходження місцевого опору, Па;  $\rho_{\text{тн}}$  – густина теплоносія,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  – швидкість течії кремнійорганічних теплоносіїв.

Швидкість течії  $W$  визначалася за показниками ротаметра. Результати визначення коефіцієнтів місцевих опорів під час течії степеневих (кремнійорганічних рідин) та порівняння з експериментальними даними відповідно до значень наведених в табл. подано на рис. 2–3.



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнта гідравлічного опору розширення від числа  $Re$  при значенні  $S_0/S_1 = 0,3$ : суцільна лінія – розрахункові значення, о – експериментальні дані

За допомогою наведених графіків встановлено експериментальні залежності значень коефіцієнтів місцевих опорів під час течії степеневих (кремнійорганічних рідин) від числа Рейнольдса. На підставі порівняльного аналізу можна констатувати, що отримані дані узгоджуються з теоретичними розрахунковими значеннями для відповідних коефіцієнтів гідравлічних опорів та знаходяться в межах допустимої похибки.



**Рис. 3.** Залежність коефіцієнта гідравлічного опору розширення від числа  $Re$  при значенні  $S_0/S_1 = 0,5$ : суцільна лінія – розрахункове значення,  $\circ$  – експериментальні дані

**Висновки.** Отримані рівняння дозволяють проводити обчислення гідравлічних втрат тиску під час течії ступеневих рідин, у трубопроводах та оболонках технологічних апаратів хімічних та харчових виробництв. Запропонована експериментальна установка дозволяє вимірювати втрати тиску на вказаних ділянках під час течії неньютонівських рідин.

### Список джерел інформації / References

1. Пустовот Б. М. Механика движения жидкости в трубах / Б. М. Пустовот. – Л. : Надра, 1980. – 153 с.  
Pustovot, B.M. (1980), *Mechanics of fluids in pipes [Mehanika dvizheniya zhidkosti v trubah]*, Nadra, Leningrad, 153 p.
2. Романков А. Г. Гидродинамические процессы химической технологии / А. Г. Романков, М. И. Курочкина. – М. : Химия, 1974. – 228 с.  
Romankov, A.G., Kurochkina, M.I. (1974), *Hydrodynamic processes of chemical technology [Gidrodinamicheskie protsessy himicheskoy tehnologii]*, Himiya, Moscow, 228 p.
3. Рабинович Е. З. Гидравлика / Е. З. Рабинович. – 3-е изд. – М. : Физматгиз, 1961. – 396 с.  
Rabinovich, E.Z. (1961), *Hydraulics [Gidravlika]*, Fizmatgiz, Moscow, 396 p.
4. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) /



А. Д. Гиргидов. – СПб. : СПбПУ, 2007 – 545 с.

GirgidoV, A.D. (2007), *Fluid Dynamics (hydraulics) [Mehanika zhidkosti i gaza (gidravlika)]*, SPbPU, St. Petersburg, 545 p.

5. Маслов А. М. Инженерная реология, пищевой промышленности / А. М. Маслов. – Л. : ЛТИ ХП, 1977. – 88 с.

Maslov, A.M. (1977), *Engineering rheology, food industry [Inzhenernaya reologiya, pischevoy promyishlennosti]*, LTI HP, Leningrad, 88 p.

6. Горбатов А. В. Гидравлика и гидравлические машины для пластинчато-вязких мясных и молочных продуктов / А. В. Горбатов, В. Д. Косой. – М. : Агропромиздат, 1991. – 175 с.

Gorbatov, A.V., Kosoy, V.D. (1991), *Hydraulics and hydraulic machines for plate-viscous meat and dairy products [Gidravlika i gidravlicheskie mashiny dlya plastinchato-vyazkih myasnyih i molochnyih produktov ]*, Agropromizdat, Moscow, 396 p.

7. Білецький Е. В. Закономірності реодинаміки та теплообміну ньютонівських рідин у каналах хіміко-технологічного обладнання : дис. ... д-р техн. наук : 05.18.08 : захищена 25.10.2013. : затверджена 15.04.2014. / Білецький Едуард Володимирович. – Х., 2013. – 393 с.

Biletskiy, E.V. (2013), *Patterns reodynamiky and heat transfer of non-Newtonian fluids in channels of Chemical Technology Equipment: dissertation [Zakonomirnosti reodinamiki ta teploobminu nyenyutonivskih ridin u kanalah himiko-tehnologichnogo obladnannya: dis. ... d-r tehn. nauk]*, Kharkiv, 393 p.

8. Пат. 80032 Україна, МПК G05D 16/08 (2006/01), G05D 7/00. Пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик кремнійорганічних рідин / Білецький Е. В., Чуйко А. М. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № у 2012 13477 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл.

Biletskiy, E.V., Chuiko, A.M. (2013), *A device for measuring the hydraulic characteristics of silicone fluids: patent right [Pristriy dlya vimiryuvannya gidravlichnih karakteristik kremniyorganichnih ridin: patent]*, Kharkiv, 4 p.

**Білецький Едуард Володимирович**, д-р техн. наук, доц., факультет торгівлі, готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету. Адреса: пров. Отакара Яроша, 8, м. Харків, Україна, 61045. Тел.: 340-38-24, (067)9053732; e-mail: bileckyj@meta.ua.

**Білецький Едуард Владимирович**, д-р техн. наук, доц., факультет торгівлі, гостинично-ресторанного и туристического бизнеса, Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета. Адрес: пер. Отакара Яроша, 8, г. Харьков, Украина, 61045. Тел.: 340-38-24, (067)9053732; e-mail: bileckyj@meta.ua.

**Biletsky Eduard**, Dr. of technical sciences, Sc. Associate Professor, faculty of commerce, hospitality and tourism businesses, Kharkiv Trade and Economics Institute Kyiv National Trade and Economic University. Address: side-str. O.Yarosha, 8, Kharkiv, Ukraine, 61045. Tel.: 340-38-24, (067)9053732; e-mail: bileckyj@meta.ua.

**Петренко Олена Володимирівна**, канд. техн. наук, факультет обладнання та технічного сервісу, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: 349-45-88, (067)7342916; e-mail: elena\_lion\_71@mail.ru.

**Петренко Елена Владимировна**, канд. техн. наук, факультет оборудования и технического сервиса, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61045. Тел.: 349-45-88, (067)7342916; e-mail: elena\_lion\_71@mail.ru.

**Olena Petrenko, PhD**, faculty of equipment and technical services, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: str. Klochkovskaya, 333, Kharkiv, Ukraine, 61045/ Tel.: 349-45-88, (067)7342916; e-mail: elena\_lion\_71@mail.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.О. Потаповим.  
Отримано 15.03.2014. ХДУХТ, Харків.*