

## ГІДРОДИНАМІЧНА НЕСТАБІЛЬНІСТЬ ПОТОКУ РІДИНИ ПІСЛЯ СИМЕТРИЧНОГО РАПТОВОГО ЗВУЖЕННЯ ТРУБИ

Вадим Орел<sup>1</sup>, Богдан Піцишин<sup>2</sup>, Оксана Мацієвська<sup>3</sup>, Тетяна Коник<sup>4</sup>

Національний університет «Львівська політехніка»

12, вул С. Бандери, м. Львів, Україна, 79013

<sup>1</sup>канд. тех. наук, доцент, vadyim.i.orel@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-3518-4597

<sup>2</sup>bohdan.s.pitsyshyn@lpnu.ua, orcid.org/0000-0001-9145-876X

<sup>3</sup>канд. тех. наук, доцент, Oksana.O.Matsiievska@lpnu.ua, http://orcid.org/0000-0001-5784-0236

<sup>4</sup>tetiana.konyk.bd.2017@lpnu.ua, https://orcid.org/0000-0002-8502-6423

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.39.44-52

**Анотація.** Заходи зі зменшення втрат енергії в системах трубопровідного транспорту необхідно впроваджувати вже на етапі проектування. Зокрема це стосується й місцевих гідравлічних опорів трубопроводів. У статті досліджено розміри вирового поясу після симетричного раптового звуження круглої труби при течії ньютонівської рідини. Розглянуто ступені звуження потоку 0,250 та 0,321. Адже заходи, направлені на зменшення втрат енергії на раптовому звуженні круглої труби, мають бути ефективними при ступенях звуження потоку не менших за 0,250. Розміри вирового поясу мають екстремальну залежність з максимумом при переході від ламінарного режиму руху рідини до турбулентного. Зі збільшенням значень критерію Рейнольдса за ламінарного режиму ці розміри зростають, а за турбулентного режиму – мають зменшуватися. У першому випадку точка відриву потоку зміщується вниз за течією від площини зміни діаметрів раптового звуження труби. Розміри вирового поясу є пропорційними до критерію Рейнольдса. Описана поведінка є аналогічною зміні розмірів вирового поясу перед симетричним раптовим звуженням круглої труби. Перехідна зона між ламінарним і турбулентним режимами руху рідини є в межах від 9650 до 40000 та від 1200 до 5000 для критерію Рейнольдса, визначеного за діаметром малої труби та висотою уступу відповідно. Розміри вирового поясу після уступу зменшуються, якщо віднесені до діаметру малої труби, та збільшуються, якщо віднесені до висоти уступу. Зміна довжини вирового поясу є більшою за зміну його висоти. Отримані результати узгоджуються з наведеними в літературі даними. Для з'ясування щодо застосування заходів для зменшення втрат енергії на цьому місцевому гідравлічному опорі пропонується дослідити розміри вирового поясу після раптового звуження круглої труби за інших значень ступеня звуження потоку, більших за 0,250.

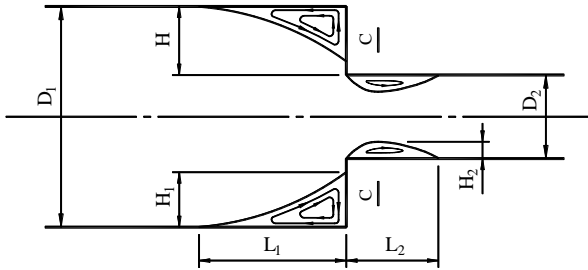
**Ключові слова:** раптове звуження труби; ступінь звуження потоку; діаметр труби; висота уступу; розміри вирового поясу.

### ВСТУП

Теоретичний аналіз течій з відривом у загальному випадку є неможливим. Єдиним визначенням гідравлічних характеристик руху поки залишається експеримент [1, с.142].

Турбулентні потоки крізь раптові звуження труб поширені у багатьох промислових сферах, включаючи трубопровідні системи, аеронавтику, транспортування шламу, формування та екструзію [2]. Втрати напору на цих місцевих гідравлічних опорах зумовлені, по-перше,

тертям потоку при вході в трубу діаметром  $D_2$  та, по-друге, утворенням кільцевих вихрових поясів з розмірами  $(L_1; H_1)$  та  $(L_2; H_2)$  [3, с.100] (рис. 1).



**Рис. 1.** Розміри кільцевих вихрових поясів перед та після симетричного раптового звуження труби

**Fig. 1.** Sizes of vortex regions of upstream and downstream on axisymmetric sudden contraction

Вихровий пояс у трубі діаметром  $D_1$  виникає через різке звуження, коли потік рідини біля стінки сповільнюється з подальшим прискоренням центральної області, яке триває до стисненого перерізу С–С, де кінетична енергія потоку є максимальною. Далі потік уповільнюється, розширюючись до труби діаметром  $D_2$  [4]. За дослідними даними для турбулентного потоку втрати напору частини струменя, який звужується до перерізу С–С, є відносно малими через зменшення пульсації швидкостей [5, с.191]. Тому втрати тиску на раптовому звуженні труби є в основному на ділянці розширення потоку після перерізу С–С [1, с.150].

Приділимо увагу розмірам вихрового поясу після симетричного раптового звуження труби при течії ньютонівської рідини.

Протяжність довжини вихрового поясу після уступу висотою  $H$  можна визначити за формулою [6]:

$$\frac{L_2}{D_2} = a \cdot m, \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт;  $m$  – ступінь звуження потоку,

$$m = \frac{\Omega_2}{\Omega_1}; \quad (2)$$

де  $\Omega_1, \Omega_2$  – площа поперечного перерізу відповідно перед і після уступу висотою  $H$ , або за формулами [7]:

$$\frac{L_2}{D_2} = b_1 \cdot \frac{Re_{D_2}}{m}; \quad (3)$$

$$\frac{L_2}{H} = b_2 \cdot \frac{Re_H}{m}, \quad (4)$$

де  $b_1, b_2$  – емпіричні коефіцієнти.

На оберненому вперед уступі при зростанні відстані  $x/H$  в межах  $0,5 \dots 4,0$  відносна довжина  $L_2/H$  нелінійно збільшується від 2,4 до 4,4 [8].

При визначенні довжини  $L_2$  на оберненому вперед уступі, який відповідає двовимірному випадку раптового звуження труби [9], при  $m_{\min} = 0,027$  критичне значення критерію Рейнольдса при переході від ламінарного режиму до турбулентного  $(Re_H)_{кр} = 8500$ , де  $Re_H$  – критерій Рейнольдса, визначений за висотою уступу  $H$  [10]. Для обох режимів є лінійна тенденція збільшення  $L_2$  зі зростанням  $Re_H$ , але за турбулентного режиму ця довжина є менш чутливою до зміни критерію Рейнольдса.

При  $m = 0,800$  довжину  $L_2$  визначали на гладкому та шорсткому обернених вперед уступах висотою  $H = 9$  мм. У разі гладкого уступу  $L_2$  різко лінійно збільшується від  $L_2/H = 1,4$  при  $Re_H = 2040$  до  $L_2/H = 2,2$  при  $Re_H = 4940$  та стає незалежною від критерію Рейнольдса при  $Re_H = 6380$ . Критичним значенням є  $(Re_H)_{кр} = 5800$  [11]. Натомість при  $m = 0,636$  та  $H = 20$  мм відбулося збільшення  $L_2$ : від  $L_2/H = 1,5$  при  $Re_H = 8800$  до  $L_2/H = 2,1$  при  $Re_H = 26300$  [12]. У разі шорсткого уступу поведінка  $L_2$  є аналогічною. Але спочатку  $L_2$  лінійно зменшується від  $L_2/H = 1,4$  при  $Re_H = 2225$  до  $L_2/H = 1,2$  при  $Re_H = 4010$ , а потім залишається майже незалежною від  $Re_H$ . Ці результати демонструють, що шорсткість уступу значно зменшує довжину вихрового поясу  $L_2$  [11].

Розглянемо результати чисельного моделювання. За ламінарного режиму руху рідини довжина  $L_2$  збільшується зі збільшенням критерію Рейнольдса, визначеного за діаметром  $D_2$ , в межах  $Re_{D2} = 1...50$  та незначно зростає зі зменшенням співвідношення діаметрів труб  $D_2/D_1 = 0,25...0,8$  ( $m = 0,063...0,640$ ) [13].

За  $m = 0,285$  ( $D_1 = 19,1$  мм,  $D_2 = 10,2$  мм) за ламінарного режиму руху рідини довжина  $L_2$  та висота  $H_2$  не залежить від критерію Рейнольдса в межах  $Re_{D1} = 23...103$ , а потім лінійно зростає до  $Re_{D1} = 1200$ , де  $Re_{D1}$  – критерій Рейнольдса, визначений за діаметром  $D_1$ . При цьому значення  $L_2$  є більшими за значення  $H_2$  [14].

За  $m = 0,284$  ( $D_1 = 0,60$  мм,  $D_2 = 0,32$  мм) довжина  $L_2$  та висота  $H_2$  збільшуються при зростанні критерію Рейнольдса за ламінарного режиму ( $Re_{D2} = 700...1820$ ). При цьому зміна довжини вихилового поясу є більшою ніж зміна його висоти. Крім того, залежність  $L_2 = f(Re_{D2})$  є майже лінійною, а залежність  $H_2 = f(Re_{D2})$  – лінійною. За турбулентного режиму ( $Re_{D2} = 3650...5825$ ) характер зміни висоти вихилового поясу є аналогічним. Проте, довжина  $L_2$  спочатку від  $Re_{D2} = 3650$  лінійно зростає, досягаючи максимуму при  $Re_{D2} = 4400$ , а потім зменшується; в межах

$Re_{D2} = 4750...5825$  ця зміна є лінійною [15].

Розглянуті результати отримано за різних ступенів звуження потоку  $m$ , що утруднює їхнє порівняння.

### МЕТА І МЕТОДИ

Метою даної роботи є виявлення закономірностей зміни розмірів вихилового поясу після уступу за однакових ступенів звуження потоку при русі однофазної ньютонівської рідини. Використовуватимуться емпіричні методи дослідження.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Визначення розмірів кільцевого вихилового поясу після раптового звуження труби проводили за даними, наведеними в табл. 1. Розглядали ступені звуження потоку  $m \geq 0,250$ . Адже заходи, направлені на зменшення втрат енергії на раптовому звуженні круглої труби, мають бути ефективними саме за цих значень  $m$  [16]. Деякі з них наведено в [17; 18]. Для систем трубопровідного транспорту їх треба впроваджувати вже на етапі проектування.

Площі поперечного перерізу відповідно до  $\Omega_1$  та після  $\Omega_2$  уступу:

– для раптового звуження труби

$$\Omega_i = \frac{\pi D_i^2}{4} . \quad (5)$$

**Табл.1.** Досліджені раптові звуження труб  
**Table 1.** Investigated sudden contractions

Ч/ч	Робоча рідина	Діаметри труб, мм		Ступінь звуження потоку $m$	Висота уступу		Використане джерело
		$D_1$	$D_2$		абсолютна $H$ , мм	відносна $H/D_2$	
1.	олива	200	100	0,250	50,0	0,500	[19]
2.	вода	60	30	0,250	15,0	0,500	[8; 20]
3.			34	0,321	13,0	0,382	
4.			44	0,538	8,0	0,182	
5.			—	—	0,875	20,0	
6.	вода	110,17	—	0,332	23,3	0,368	[5]
7.	вода	19,1	10,2	0,285	4,45	0,436	[14]
8.	вода	0,60	0,32	0,284	0,14	0,438	[15]

$$\Omega_i = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (5)$$

де  $D_i$  – діаметр труби перед чи після уступу висотою

$$H = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (6)$$

Тоді формулу (2) запишемо як:

$$m = \frac{D_2^2}{D_1^2}; \quad (7)$$

– для оберненого вперед уступу

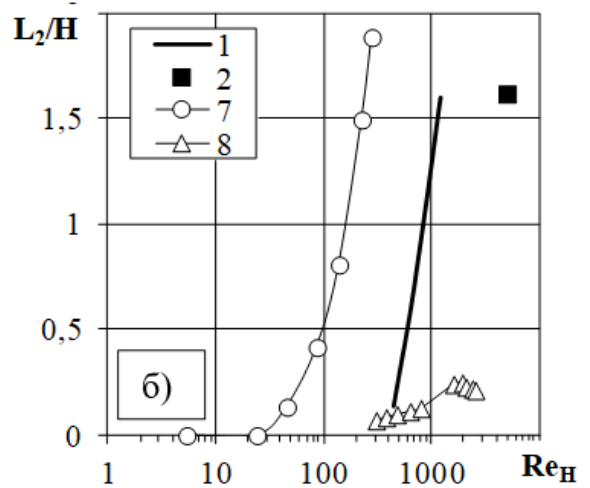
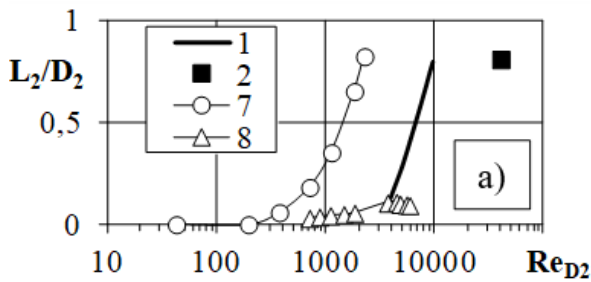
$$\Omega_1 = H_k \times b; \quad (8)$$

$$\Omega_2 = (H_k - H) \times b; \quad (9)$$

де  $H_k$  – висота каналу перед оберненим вперед уступом висотою  $H$ ;  $b$  – ширина каналу. Тоді формулу (2) запишемо як:

$$m = 1 - \frac{H}{H_k} \quad (10)$$

Для довжини вирового поясу  $L_2$  при ступені звуження потоку  $m = 0,250$ , за аналогією з [21], має бути два режими руху рідини з максимумом, що відповідає критичному значення критерію Рейнольдса  $(Re_i)_{кр}$  (рис.2).



**Рис. 2.** Довжина вирового поясу після симетричного раптового звуження труби залежно від критерію Рейнольдса (позначки відповідають позиціям в табл. 1)

**Fig. 2.** Length of the vortex region of downstream on axisymmetric sudden contraction vs Reynolds number (notations match those in the Table 1)

Це якісно узгоджується з даними чисельного моделювання [15] при  $m = 0,284$ . Зі збільшенням значень критерію Рейнольдса точка відриву потоку рідини після уступу висотою  $H$  за ламінарного режиму зміщується вниз за течією від площини зміни діаметрів, що вказує на збільшення  $L_2$ . При цьому зміна довжини  $L_2$  є прямо пропорційною до зміни  $Re_i$ , що нагадує зміну довжини вирового поясу  $L_1$  [21]. Це можна апроксимувати як [22]:

$$\frac{L_2}{D_2} = c_1 \cdot Re_{D_2}^{k_1}; \quad (11)$$

$$\frac{L_2}{H} = c_1 \cdot Re_H^{k_2}, \quad (12)$$

де  $c_1, c_2$  – емпіричні коефіцієнти;  $k_1, k_2$  – показники ступеня.

За турбулентного режиму, за аналогією з [21], можна очікувати зменшення  $L_2$ , обернено пропорційне до  $Re_i$ . Тому критичні значення критерію Рейнольдса можуть бути в межах  $(Re_{D1})_{кр} = 9650 \dots 40000$  (рис. 2,а) та  $(Re_H)_{кр} = 1200 \dots 5000$  (рис. 2,б). Це узгоджується з наведеними в літературі даними.

Зі зростанням ступеню звуження потоку  $m$  довжина  $L_2$  зменшується, якщо

віднесена до діаметру  $D_2$  малої труби, та збільшується, якщо віднесена до висоти уступу  $H$  (рис. 3,а). Це можна описати або формулою (1), або формулами (3) та (4).

Отже, довжина вирового поясу після раптового звуження труби за  $m = 0,250$  повинна мати екстремальну залежність з максимумом при переході від ламінарного режиму руху рідини до турбулентного. При цьому зі збільшенням значення критерію Рейнольдса за ламінарного режиму вона зростає, а за турбулентного – має зменшуватися. Ця довжина змінюється пропорційно зростанню ступеню звуження потоку  $m$ : зменшується, якщо віднесена до діаметру малої труби, та збільшується, якщо віднесена до висоти уступу.

Зміни висоти  $H_2$  кільцевого вирового поясу після уступу висотою  $H$  при  $m = 0,250$  (рис. 4, рис. 3,б) є аналогічною до зміни довжини  $L_2$ . Збільшення зна-

чення ступеню звуження потоку до  $m = 0,321$  змінює  $H_2$ , зокрема за турбулентного режиму (рис. 4).

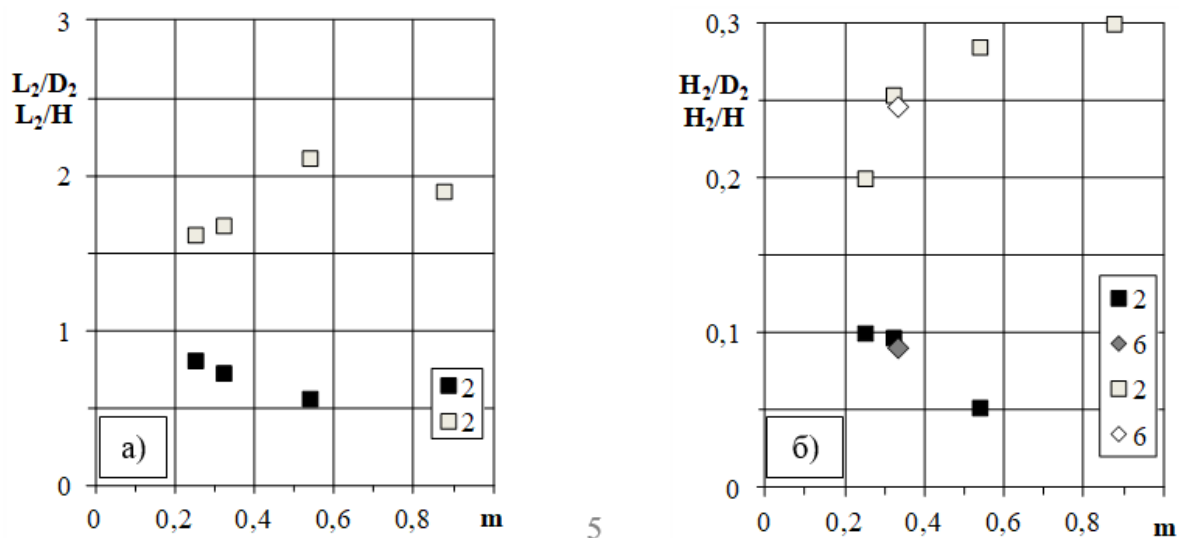
### ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даній роботі показано, що розміри вирового поясу після уступу висотою  $H$ :

1) мають екстремальну залежність з максимумом при переході від ламінарного режиму руху рідини до турбулентного: зі збільшенням критерію Рейнольдса за ламінарного режиму зростають, а за турбулентного – мають зменшуватися.

2) змінюються зі збільшенням ступеню звуження потоку рідини: зменшуються, якщо віднесені до діаметру малої труби, та збільшуються, якщо до висоти уступу.

Для підтвердження отриманих результатів необхідно дослідити розміри вирового поясу за інших значень ступеня  $m > 0,250$ .



**Рис. 3.** Довжина (а) та висота (б) вирового поясу після симетричного раптового звуження труби залежно від ступеню звуження потоку (позначки відповідають позиціям в таблиці): темні позначки відповідають  $L_2/D_2 = f(m)$  та  $H_2/D_2 = f(m)$ ; ясні позначки –  $L_2/H = f(m)$  та  $H_2/H = f(m)$

**Fig. 3.** Length of the vortex region (a) and height of the vortex region (b) of downstream on axisymmetric sudden contraction vs area ratio (notations match those in the Table 1): shaded notations match of  $L_2/D_2 = f(m)$  and  $H_2/D_2 = f(m)$ ; unshaded notations match of  $L_2/H = f(m)$  and  $H_2/H = f(m)$

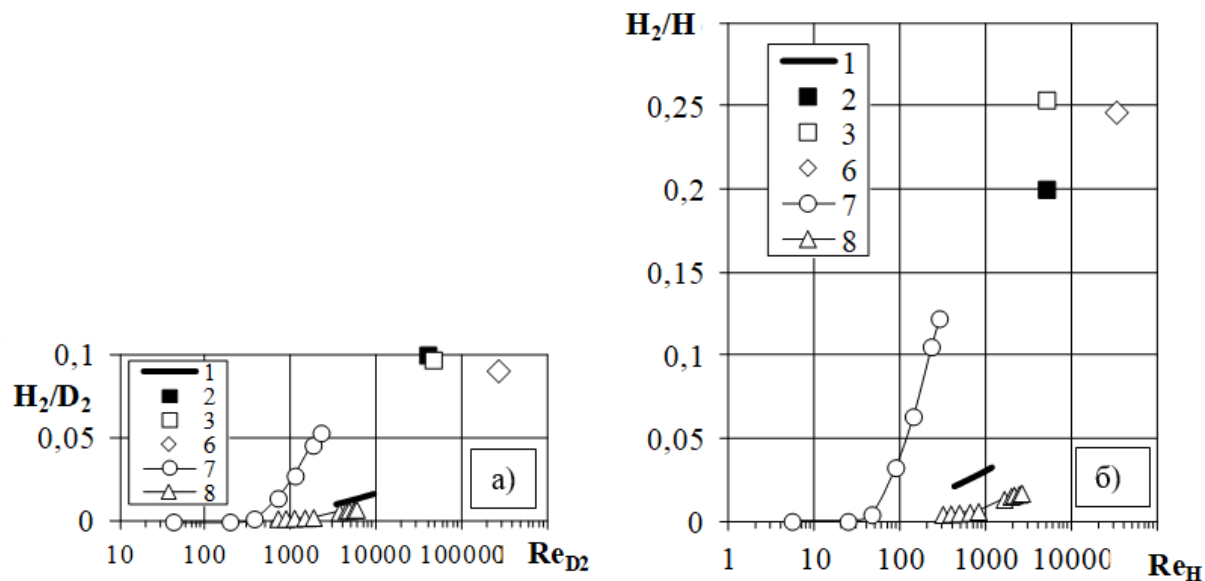


Рис. 4. Висота вихрового поясу після симетричного раптового звуження труби залежно від критерію Рейнольдса (позначки відповідають позиціям в таблиці)

Fig. 4. Height of the vortex region of downstream on axisymmetric sudden contraction vs Reynolds number (notations match those in the Table 1)

#### ЛІТЕРАТУРА

1. **Тананаев А. В.** Течения в каналах МГД-устройств. Москва : Атомиздат, 1979. 368 с.
2. **Palacios, S. F., Machuca, J., Franco, T. A., & Morales, R. E. M.** Experimental and Numerical Study of Turbulent Newtonian Flow through an Axisymmetric Sudden Contraction: Proceedings of the ENCIT by ABCM, ENC10-0572. 2010, 10 p. URL: <https://www.abcm.org.br/anais/encit/2010/PDF/ENC10-0572.pdf>. (дата звернення: 20.05.2022).
3. **Байбаков О. В., Башта Т. М., Кирилловский Ю. Л., Некрасов Б. Б., Руднев С. С.** Гидравлика, гидромашини и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
4. **Bullen, P. R., Cheeseman, D. J., & Hussain, L. A.** A study of Turbulent Flow in Pipe Contractions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*; 1996, 210 (3), 171–180. DOI: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1996\\_210\\_312\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_312_02).
5. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика (Техническая механика жидкости). Ленинград : Энергоиздат, Ленинградское отд-ние, 1982. 672 с.
6. **Носко С. В., Булигін В. О.** Дослідження кінематичних характеристик аномально-в'язких рідин в каналах з різко змінною геометрією методами візуалізації. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2012. 6 (7(60)). С.47–50. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.5559>.
7. **Самохвалов А. С.** *Закономерности течений неьютоновских жидкостей на переходных участках каналов* : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.14.09 "Гидравлика и инженерная гидрология" / А. С. Самохвалов; Киев. инж.-строит. ин-т. – К., 1989. 19 с.
8. **Simpson, R. L.** Two-Dimensional Turbulent Separated Flow. Ed. Young, A. D. AGARD-AG-287. 1985, Vol. 1. NATO. 104 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA160659>. (дата звернення: 20.05.2022)
9. **Ando, T. & Shakouchi, T.** Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction. Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ. 2004, Vol. 29. pp. 1–8. URL: [www.eng.mie-u.ac.jp/research/activities/29/29\\_1.pdf](http://www.eng.mie-u.ac.jp/research/activities/29/29_1.pdf). (дата звернення: 20.05.2022)
10. **Sherry, M., Lo Jacono, D., & Sheridan, J.** An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a

- forward facing step. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2010, vol. 98 (n°12). pp. 888-894. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.09.003>.
11. Essel, E. E., Mali, S., Thacher, E. W., & Tachie, M. F. Upstream roughness effects on reattached turbulent flow over forward facing step. In *10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Spain*. 2014. URL: <https://torroja.dmt.upm.es/congresos/ETMM10/4-Essel.pdf>. (дата звернення: 20.05.2022)
12. Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Aloisio, G., & Di Marco, A. Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step. *Physics of Fluids*, 2008, 20(7), 075113. DOI: <http://doi.org/10.1063/1.2959172>.
13. Борзенко Е. И., Рыльцева К. Е., Фролов О. Ю., Шрагер Г. Р. Расчет коэффициента местного сопротивления для течения вязкой несжимаемой жидкости в трубе с внезапным сужением. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2017, №48, С.36–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-koeffitsienta-mestnogo-soprotivleniya-dlya-techeniya-vyazkoy-neszhimaemoy-zhidkosti-v-trube-s-vnezapnym-suzheniem/viewer>. (дата звернення: 20.05.2022)
14. Krhan, A., & Giorgini, F. Numerical investigations of laminar flow in a pipe with a sudden contraction of his cross-sectional area. Tech. rep. Linköping University. 2016. URL: [https://www.academia.edu/23612237/Numerical\\_investigations\\_of\\_laminar\\_flow\\_in\\_a\\_pipe\\_with\\_a\\_sudden\\_contraction\\_of\\_his\\_cross-sectional\\_area](https://www.academia.edu/23612237/Numerical_investigations_of_laminar_flow_in_a_pipe_with_a_sudden_contraction_of_his_cross-sectional_area). (дата звернення: 20.05.2022)
15. Cherrared, D., & Filali, E. G. Hydrodynamics and Heat Transfer in Two and Three-Dimensional Minichannels. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2013, 9.2, 127-151. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00259871/document>. (дата звернення: 20.05.2022)
16. Орел В. І. Дослідження вкладу необоротних втрат у загальні втрати тиску при раптовому звуженні труби. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник*. К.: КНУБА, 2013. Вип. 21. С. 181–190.
17. Орел В. І. Зменшення гідравлічного опору раптового звуження трубопроводу за допомогою прямолінійної циліндричної вставки. *Труды Второго международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения» / под общ. ред. А.Б. Ступина. Донецк: ДонНУ, 2012. С. 28–33.*
18. Chernyuk, V.V., Pitsishin, B.S., Orel, V.I. *et al.* Influence of Polyacrylamide Additions on the Head Loss in Abrupt Contractions and Expansions of Pipes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2002, 75, 910–919. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020319219729>.
19. Попов А. М. *Разработка и реализация гидродинамического метода расчета характеристик дроссельных элементов гидротехники при докритических числах Рейнольдса*: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 05.04.13. М.: МЭИ (ТУ), 2000. 20 с.
20. Ando, T., Shakouchi, T., & Miyata, K. Drag Reduction of Abrupt Contraction Pipe (Control of Flow Separation by Small Obstacle). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B*; 2004, 70 (691). 650–656. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/70/691/70\\_691\\_650/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/70/691/70_691_650/pdf). (дата звернення: 20.05.2022)
21. Orel, V., Pitsyshyn, B., & Konyk T. Hydrodynamical instability of newtonian flow before an axisymmetric sudden contraction. *Theory and Building Practice*. 2021, 3(2), 32–38. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.032>.
22. Квитковский Ю. В. О структуре и содержании раздела гидродинамики "Неравномерное напорное движение жидкости". *Методика преподавания гидравлики напорных течений: Сб. науч. тр. ЛПИ*, 1986. С.64–73.

## REFERENCES

1. Tananaev, A. V. (1979). *Techenie v kanalah MGD-ustrojstv*. Moskva: Atomizdat [in Russian]
2. Palacios, S. F., Machuca, J., Franco, T. A., & Morales, R. E. M. (2010). Experimental and Numerical Study of Turbulent Newtonian Flow through an Axisymmetric Sudden Contraction: *Proceedings of the ENCIT by ABCM*, ENC10-0572. Retrieved from <https://www.abcm.org.br/anais/encit/2010/PDF/ENC10-0572.pdf>.
3. Vajbakov, O. V., Bashta, T. M., Kirillovskij, Yu. L., Nekrasov, B. B., & Rudnev,

- S. S. (1982). *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody*: Uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov. Moskva: Mashinostroenie. [in Russian]
4. Bullen, P. R., Cheeseman, D. J., & Hussain, L. A. (1996). A study of Turbulent Flow in Pipe Contractions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*; 210 (3), 171–180. [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1996\\_210\\_312\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_312_02).
5. Chugaev, R. R. (1982). *Gidravlika (Tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti)*. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie [in Russian]
6. Nosko S. V., & Bulygin, V.O. (2012). Research of kinematic characteristics of abnormally viscous fluids in channels with high-speed variable geometry by visualization methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(60)), 47–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.5559>. [in Ukrainian]
7. Samohvalov, A. S. (1989). *Zakonomernosti techenij nen'yutonovskih zhidkостей na perekhodnyh uchastkah kanalov* (Doctor of philosophy thesis, Kyiv Civil Engineering Institute, Kyiv, USSR) [in Russian]
8. Simpson, R. L. (1985). *Two-Dimensional Turbulent Separated Flow*. AGARD-AG-287. Vol. 1. NATO. Retrieved from: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA160659>.
9. Ando, T., & Shakouchi, T. (2004). Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction. *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.*, 29. 1–8. Retrieved from [www.eng.mie-u.ac.jp/research/activities/29/29\\_1.pdf](http://www.eng.mie-u.ac.jp/research/activities/29/29_1.pdf). (Retrieved May 20, 2022)
10. Sherry, M., Lo Jacono, D., & Sheridan, J. (2010). An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 98(12). 888–894. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.09.003>.
11. Essel, E. E., Mali, S., Thacher, E. W., & Tachie, M. F. (2014). Upstream roughness effects on reattached turbulent flow over forward facing step. In *10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Spain*. Retrieved from <https://torroja.dmt.upm.es/congresos/ETMM10/4-Essel.pdf>
12. Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Aloisio, G., & Di Marco, A. (2008). Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step. *Physics of Fluids*, 20(7), 075113. <http://doi.org/10.1063/1.2959172>.
13. Borzenko, E. I., Ryltseva, K. E., Frolov, O. Yu., & Shrager, G. R. (2017). Calculation of the local resistance coefficient of viscous incompressible fluid flow in a pipe with sudden contraction. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 48, 36–48. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-koeffitsienta-mestnogo-soprotivleniya-dlya-techeniya-vyazkoy-neszhimaemoy-zhidkosti-v-trube-s-vnezapnym-suzheniem/viewer>. [in Russian]
14. Krhan, A., & Giorgini, F. (2016). Numerical investigations of laminar flow in a pipe with a sudden contraction of his cross-sectional area. *Tech. rep. Linköping University*. Retrieved from [https://www.academia.edu/23612237/Numerical\\_investigations\\_of\\_laminar\\_flow\\_in\\_a\\_pipe\\_with\\_a\\_sudden\\_contraction\\_of\\_his\\_cross-sectional\\_area](https://www.academia.edu/23612237/Numerical_investigations_of_laminar_flow_in_a_pipe_with_a_sudden_contraction_of_his_cross-sectional_area).
15. Cherrared, D., & Filali, E. G. (2013). Hydrodynamics and Heat Transfer in Two and Three-Dimensional Minichannels. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 9.2, 127–151. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00259871/document>.
16. Orel, V. I. (2013). Investigation of the proportion of irreversible losses in total pressure losses at the sudden narrowing of pipe. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 21, 181–190. [in Ukrainian]
17. Orel, V. I. (2012). Zmenshennia hidravlichnoho oporu raptovoho zvuzhennia truboprovodu za dopomohoiu priamoliniinoi tsylindrychnoi vstavky. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. sci.-pract. seminar 'Povhovskie nauchnye chtenija'*. Donetsk: Donetsk National University. 28–33. [in Ukrainian]
18. Chernyuk, V. V., Pitsishin, B. S., Orel, V. I. & Zhuk, V. M. (2002). Influence of Polyacrylamide Additions on the Head Loss in Abrupt Contractions and Expansions of Pipes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 75, 910–919. <https://doi.org/10.1023/A:1020319219729>.



19. **Popov, A. M. (2000).** *Razrabotka i realizaciya gidrodinamicheskogo metoda rascheta harakteristik drossel'nyh elementov gidroapparatury pri dokriticheskikh chislah Rejnol'dsa* (Doctor of philosophy thesis, Moskovskij energeticheskij institut (tehnicheskij universitet), Moskva, Russia) [in Russian]

20. **Ando, T., Shakouchi, T., & Miyata, K. (2004).** Drag Reduction of Abrupt Contraction Pipe (Control of Flow Separation by Small Obstacle). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B*; 70 (691). 650–656. Retrieved from

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/70/691/70\\_691\\_650/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/70/691/70_691_650/pdf).

21. **Orel, V., Pitsyshyn, B., & Konyk T. (2021).** Hydrodynamical instability of newtonian flow before an axisymmetric sudden contraction. *Theory and Building Practice*. 3(2), 32–38. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.032>.

22. **Kvitkovskij, Ju. V. (1986).** O strukture i sodержanii razdela gidrodinamiki 'Neravnomernoe napornoe dvizhenie zhidkosti'. In *Metodika prepodavanija gidravliki napornyh techenij* 64–73. Leningrad: Leningradskij politehnicheskij institut. [in Russian]

### Hydrodynamical instability of newtonian flow of downstream on axisymmetric sudden contraction

Vadym Orel, Bohdan Pitsyshyn, Oksana Matsievskaja, Tetiana Konyk

**Abstract.** Measures to reduce energy losses in pipeline transport systems must be implemented already at the design stage. In particular, this also applies to local resistances of pipelines. In the paper, the separation length and separation height downstream of the contraction plane of axisymmetric sudden contraction of the circular pipe of a single-phase Newtonian flow have been investigated. Area ratios 0.250 and 0.321 were considered. After all, measures to reduce energy losses on the axisymmetric sudden contraction must be effective at values of the area ratio not less than 0.250. The separation length and separation height have the extreme dependence with a maximum at the transition of the laminar flow into a turbulent flow one. When the values of the Reynolds number at the laminar flow increase, these sizes increase, and they decrease at the turbulent flow. In the first case, the separation point is shifted downstream from the plane of contraction. The separation length and separation height are proportional to the Reynolds number. This is similar to changing the separation length and separation height of upstream from the plane of contraction. A transition zone be located between 9650 and 40000 and 1200 and 5000 if the Reynolds number is based on smaller pipe diameter and step height correspondingly. The separation length of downstream of the contraction plane are decreased if these sizes are length - smaller pipe diameter ratio, and increase if these sizes are length - step height ratio. The changing of separation height is similar. But the change of the separation length is greater than the change of separation height. There is enough good agreement between the experimental results and the results described in the literature. For taking measures providing decrease in energy losses, the investigation of the separation length and separation height downstream of the contraction plane at different values of area ratio being more than 0.250 is proposed.

**Key words:** sudden contraction; area ratio; pipe diameter; step height, separation length, separation height.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2022