

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ РАПТОВОГО ЗВУЖЕННЯ КРУГЛОЇ ТРУБИ НА КОНФІГУРАЦІЮ ПОТОКУ В НЬОМУ

© В.І. Орел, 2005

The change of pressure on sudden narrowing of a round pipe is better described by the square-law in the formula (9) is determined. The linear dependence of inclination of a vector of the average speed in section of entrance in sudden narrowing of a pipe (β) from the area of ratio of circular section tubes (m) is offered.

Постановка проблеми

Дослідження течій у трубах різних діаметрів є однією з актуальних задач механіки. Особливий інтерес тут становить турбулізація течії в місцях локальних неоднорідностей труб.

Всупереч загальному принципу найменшого опору, відповідно до якого в природі звичайно відбуваються різні процеси, при русі рідин у трубопроводах, навпаки, кожен раз встановлюється такий режим руху, при якому з усіх можливих варіантів виникає найбільший опір [1]. Так, у раптовому звуженні при переході труби від діаметра D до діаметра d (рис. 1) відбувається відрив транзитного струменя від стінок труби. Відрив турбулентного потоку погіршує робочі характеристики багатьох машин і технічних пристроїв [2].

Але надійних методів розрахунку течій з відривом немає. Проте, мінімальна вимога до способу управління відривом потоку полягає в тому, що він повинен так покращити робочу характеристику гідродинамічного пристрою, щоб застосування цього способу окупилося [2]

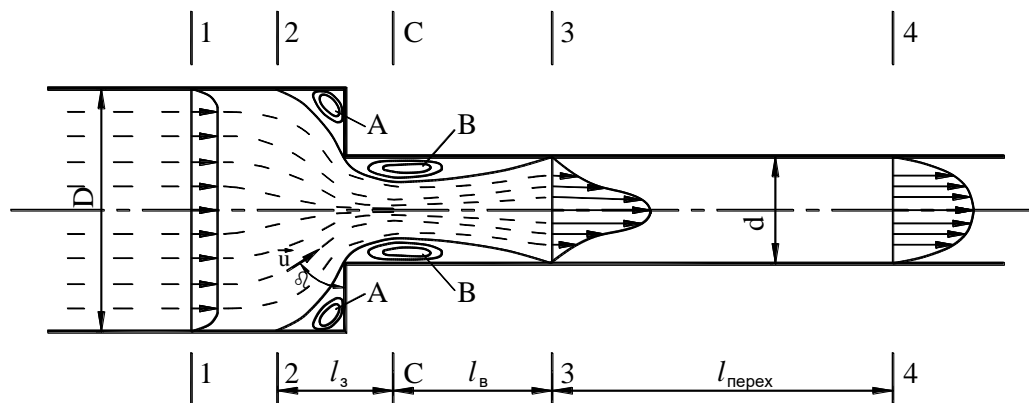


Рис. 1. Раптове звуження потоку: l_3 – ділянка звуження; l_v – вихрова ділянка; $l_{перех}$ – перехідна ділянка; A, B – кільцеві вихрові зони; C-C – стиснений переріз; β – кут нахилу вектора осередненої швидкості

Аналіз досліджень

Місцеві втрати напору при раптовому звуженні поперечного перерізу труби зумовлені в основному розширенням струменя, стисненого після входу з широкої труби у вузьку (переріз С–С), до повного перерізу вузької труби (переріз 3–3) [3, с.151] (рис. 1), оскільки ці втрати є необоротними [4, с.71]. Оборотні втрати напору при звуженні струменя до перерізу С–С для турбулентного потоку відносно малі в зв'язку з тим, що пульсації швидкостей на ділянці звуження завжди зменшуються; крім того, довжина стисненої частини струменя складає приблизно $0,5d$ [5, с.191].

Коефіцієнт раптового звуження труби ζ при великих числах Рейнольдса ($Re > 10^4$) для води можна визначити наближено за формулою Ідельчика [3, с.151], яка краще відповідає дослідним даним при $d/D < 0,5$ [6, с.42]:

$$\zeta = 0,5 \cdot (1 - m), \quad (1)$$

де m – ступінь звуження потоку, $m = d^2/D^2$.

При $d/D > 0,5$ коефіцієнт раптового звуження труби ζ визначається за наближено за формулою Альтшуля [6, с.42]:

$$\zeta = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

де ε – коефіцієнт стиснення струменя,

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - m}. \quad (3)$$

На підставі обробки експериментальних даних різних дослідників Ідельчиком одержано [3, с.151] формулу для будь-якого співвідношення d/D :

$$\zeta = 0,5 \cdot (1 - m)^{3/4}. \quad (4)$$

Також було запропоновано формулу, яка збігається з експериментальними даними при $m \leq 0,433$ [7]:

$$\zeta = A - \alpha_1 \cdot m^2, \quad (5)$$

де α_1 – коефіцієнт кінетичної енергії в перерізі 1–1 (рис. 1). Для повністю розвинутого турбулентного режиму руху рідини в трубопроводі прийнято $A = 0,48$; $\alpha_1 = 1,05$ [7].

Коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon = \frac{\omega_c^2}{\omega_d^2}$, де ω_c , ω_d – площа струменя, відповідно, в

перерізі С–С та в трубі діаметром d (рис. 1), є функцією ступеню звуження потоку m . Класичні значення Вайсбаха для коефіцієнта ε [4, с.72] наведено в табл.1.

Таблиця 1

Залежність $\varepsilon = f(m)$ за даними Вайсбаха

Ступінь m	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Коефіцієнт ε	0,617	0,632	0,658	0,712	0,813	1,0

У першому наближенні залежність $\varepsilon = f(m)$ можна представити так [8]:

$$m = 2\varepsilon - 1. \quad (6)$$

Порівняння формул (3) та (6) і даних табл. 1 наведено на рис. 2. Дані табл. 1 описано залежністю

$$\varepsilon = \frac{1}{1,612 - 0,612 \cdot m^{2,1}}. \quad (7)$$

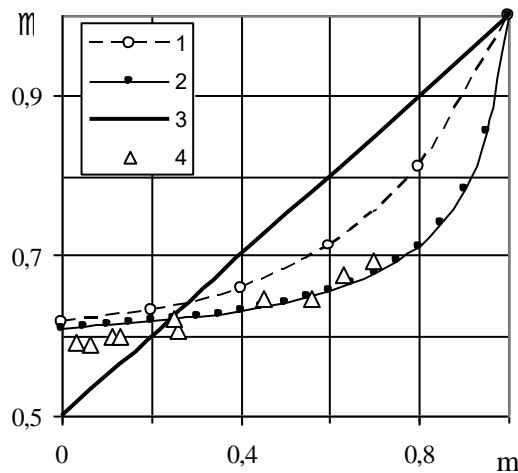


Рис. 2. Залежність $\varepsilon = f(m)$: 1 – за даними Вайсбаха (табл.1); 2 – за формулою (3); 3 – за формулою (6); 4 – дані табл. 5, побудовані за формулою (13)

Як видно з рис. 2, дані табл. 1 та формули (3) та (6) узгоджуються тільки в малому діапазоні зміни ступеню m : від 0,25 до 0,35.

Покращення гідродинамічних якостей місцевих опорів досягається шляхом ліквідації умов, які сприяють відриву потоку та утворенню відривних течій, тобто зменшення коефіцієнта місцевого опору [9]. У випадку раптового розширення труби цього можна досягти, наприклад, закручуванням потоку на вході [10], введенням у потік полімерних додатків (для $m > 0,7$ при діаметрах менших за 50 мм) [11] чи здійсненням плавного переходу від широкого перерізу до вузького за допомогою колектора з криволінійними (рис.3,а) або прямолінійними твірними (рис.3,б) [3, с.151].

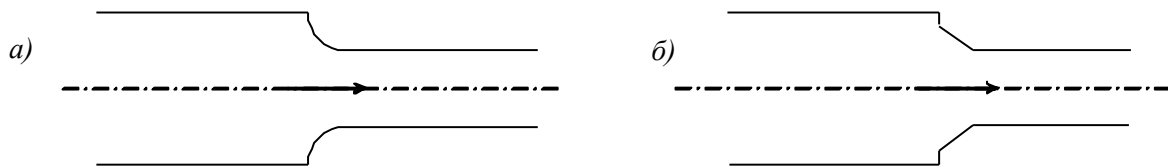


Рис. 3. Зменшення опору на раптовому звуженні труби влаштуванням кромки на вході: а – заокругленої; б – зрізаної під кутом [3, с.165]

Якщо необхідно змінити турбулентний потік, щоб зменшити опір, ми повинні проаналізувати і розрахувати, як на потік впливає, наприклад, форма границь [12, с.9].

Задачі досліджень

Метою роботи є аналіз впливу стінок труб, які утворюють раптове звуження потоку, на коефіцієнт місцевого опору. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз існуючих літературних даних.

Залежність конфігурацію потоку в раптовому звуженні круглої труби від його геометрії

Для достовірності подальших висновків порівняємо експериментальні значення коефіцієнтів раптового звуження труби для різних значень ступеню m [13, 14, 15] (табл. 2) з теоретичними формулами (1), (2), (4), (5), що відобразимо на рис. 4.

У табл. 2 також наведено розраховані за формулою (2) з використанням формул (3) та (6) і табл. 1 значення коефіцієнтів ζ для тих самих ступенів m . Як видно, найкраще збігається з експериментальними даними формула (3).

Значення коефіцієнта ζ для раптового звуження труби

Ч/ч	Діаметри труб, мм		Співвідношення $\frac{d}{D}$	Ступінь звуження потоку m	Коефіцієнт ζ , визначений експериментально	Джерело	Коефіцієнт ζ , розрахований за формулою (2) та		
	D	d					формулою (3)	табл. 1	формулою (6)
1.	103,1	26,0	0,252	0,064	0,490	[13]	0,4036	0,3722	0,7739
2.	51,0		0,510	0,259	0,420		0,3718	0,3318	0,3464
3.	26,0	20,6	0,792	0,630	0,228		0,2618	0,1443	0,0515
4.	—	6,02	0,334	0,112	0,444	[14]	0,3966	0,3668	0,6377
5.	—		0,500	0,250	0,370		0,3737	0,3344	0,3600
6.	—		0,673	0,453	0,300		0,3318	0,2570	0,1417
7.	—		0,834	0,696	0,197		0,2618	0,1443	0,0321
8.	33,42	5,72	0,171	0,029	0,480	[15]	0,4081	0,3741	0,8904
9.	15,85		0,361	0,130	0,445		0,3942	0,3643	0,5928
10.	33,42	25,01	0,748	0,560	0,300		0,2910	0,1856	0,0796

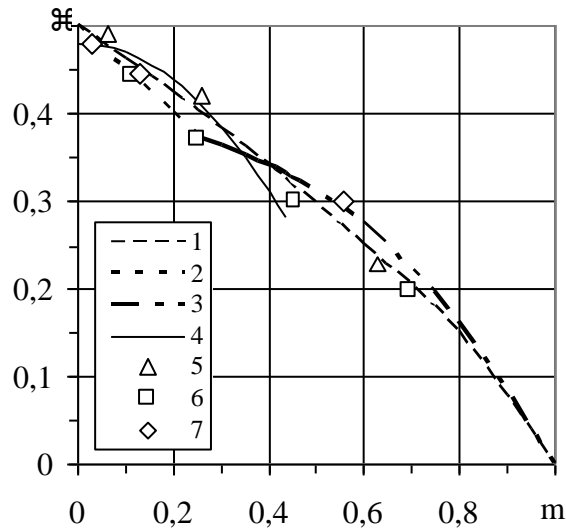


Рис. 4. Залежність коефіцієнта раптового звуження труби ζ від ступеню звуження потоку m : 1 – за формулою (4); 2 – за формулою (1); 3 – за формулою (2); 4 – за формулою (5); 5 – дані [13]; 6 – дані [14]; 7 – дані [15]

У моделі [16] зміна діаметра струменя при раповому звуженні труби

$$D(x) = d + (D - d) \cdot \left(1 - \frac{x}{x_R}\right)^k \quad (8)$$

залежить від зміни тиску на раповому звуженні труби

$$p(x) = p_D - (p_D - p_d) \cdot \left(\frac{x}{x_R}\right)^t, \quad (9)$$

оскільки $k = f(t)$.

У формулах (8) та (9): x – поточна координата; x_R – довжина ділянки повторного приєднання потоку; k , t – показники степеню; p_D , p_d – тиск у трубі діаметром D та d відповідно.

Зміна тиску відбувається за квадратичним ($t = 2$) або кубічним ($t = 3$) законом [16]. Залежність $k = f(t)$ в діапазоні $d/D = 0,7 \dots 0,3$ [16] наведено в табл. 3.

Залежність $k = f(t)$

Співвідношення d/D		0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
Показник степеню k	при $t = 2$	0,822	0,926	1,071	1,264	1,511
	при $t = 3$	0,573	0,627	0,699	0,784	0,873

Ці дані (рис. 5) апроксимуються формулами:

– при $t = 2$ (коефіцієнт кореляції 0,9864; середньоквадратичне відхилення 0,045; ймовірність 0,95 за критерієм Стьюдента)

$$k = (2,000 \pm 0,035) - (1,76 \pm 0,09) \cdot d/D ; \quad (10)$$

– при $t = 3$ (коефіцієнт кореляції 0,9693; середньоквадратичне відхилення 0,030; ймовірність 0,95 за критерієм Стьюдента)

$$k = (1,000 \pm 0,023) - (0,59 \pm 0,06) \cdot d/D . \quad (11)$$

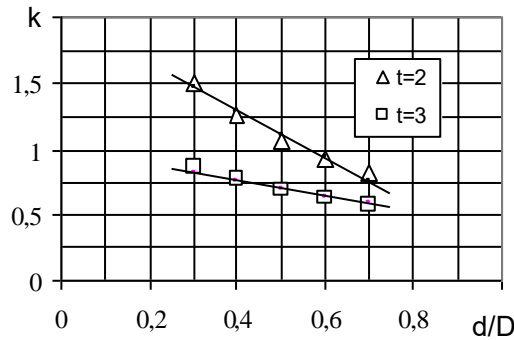


Рис. 5. Залежність $k = f(t)$: 1 – при $t = 2$; 2 – при $t = 3$

На рис. 6 наведено графіки $D(x) = f\left(\frac{x}{x_R}\right)$. Як видно з цих графіків, чим більше m , тим

криві зміни діаметра при зміні тиску за квадратичним ($t = 2$) та кубічним ($t = 3$) законами є ближчими.

Щоб визначити який закон розподілу тиску найбільше відповідає раптовому звуженню труби, використаємо поняття середнього діаметру за поверхнею струменя [16]:

$$\bar{D} = \frac{d^2 + \frac{2d \cdot (D-d)}{k+1} + \frac{(D-d)^2}{2k+1}}{d + \frac{D-d}{k+1}} . \quad (12)$$

Для експериментальних даних табл. 2 так, як це робилося в [17], проведемо порівняння між діаметром \bar{D} та діаметром $\frac{1}{2} \cdot (D + d)$, що є середнім арифметичним між діаметрами D та d , які утворюють раптове звуження труби. Екстраполюючи формули (10) і (11) до 0 та 1, розрахунок зведемо в табл. 4.

З табл.4 видно, що з похибкою менше 4% формула (8) краще справджується тоді, коли показник степеню k визначений за формулою (10), тобто при квадратичному законі зміни тиску в моделі [16]. При цьому з ймовірністю 0,95 за критерієм Стьюдента

$$1/2 \cdot (d + D) = (1 \pm 0,016) \cdot \bar{D} . \quad (13)$$

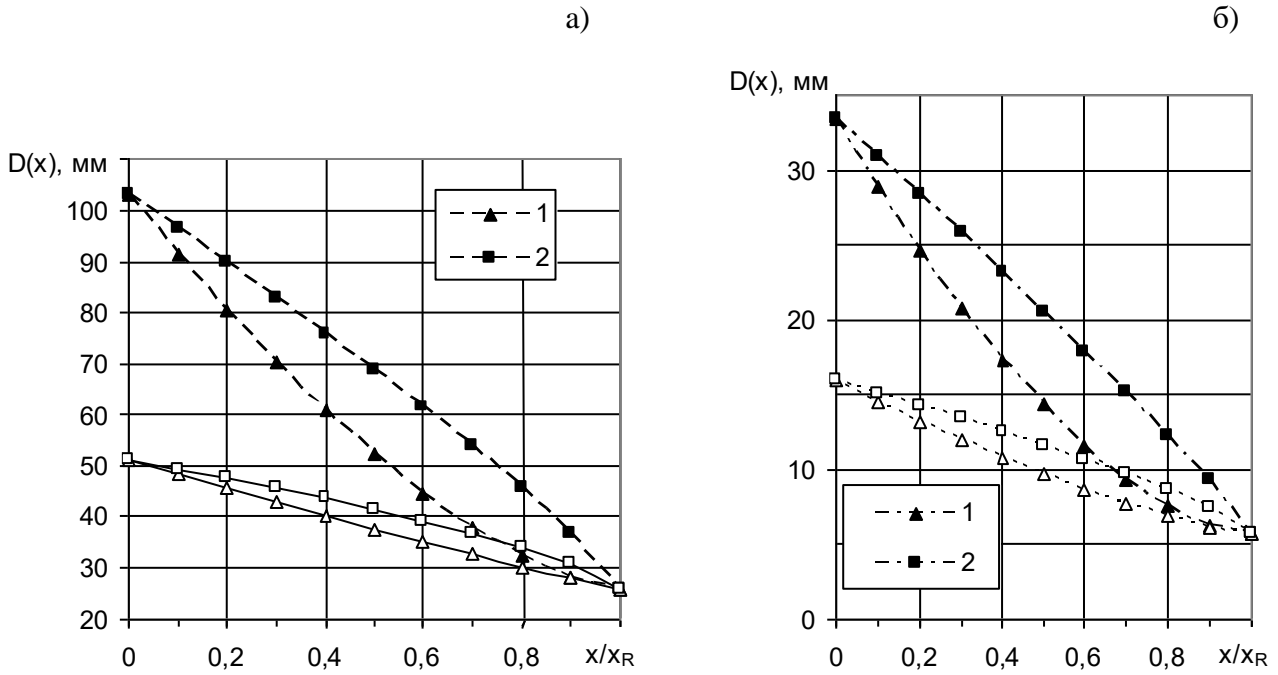


Рис. 6. Залежність $D(x) = f\left(\frac{x}{x_R}\right)$: а – для даних [13]; б – для даних [15]

при k за формулою: (10) – 1; (11) – 2

Таблиця 4

Порівняння значень діаметрів \bar{D} та $\frac{1}{2}(D + d)$

Ч/ч	Діаметри труб, мм		Діаметр \bar{D} , мм, при k за формулою		Діаметр $\frac{1}{2}(D + d)$, мм	Похибка δ , %, при k за формулою	
	D	d				(10)	(11)
			(10)	(11)			
1.	103,1	26,0	65,7	74,5	64,55	- 1,8	- 15,4
2.	51,0		39,3	41,8	38,5	- 2,1	- 8,6
3.	26,0	20,6	24,0	24,2	23,3	- 3,0	- 3,9
4.	—	6,02	12,1	13,4	11,915	- 1,6	- 12,5
5.	—		9,2	9,8	9,02	- 2,0	- 8,6
6.	—		7,8	8,0	7,58	- 2,9	- 5,5
7.	—		7,0	7,1	6,80	- 2,9	- 4,4
8.	33,42	5,72	20,3	23,3	19,57	- 3,7	- 19,1
9.	15,85		10,9	12,1	10,785	- 1,1	- 12,2
10.	33,42	25,01	30,2	30,55	29,215	- 3,4	- 4,6

При проектуванні в таких галузях, як нафтова промисловість, машинобудування, архітектура, медицина тощо, також представляє інтерес визначення кута β нахилу вектора осередненої швидкості в перерізі входу в трубу діаметром d (рис. 1).

Виходячи з формули (2) і взявши до уваги, що [18]

$$\varepsilon = \frac{1}{\text{ctg}(\beta) + 1}, \quad (14)$$

маємо

$$\beta = \text{arc ctg}(\sqrt{\zeta}). \quad (15)$$

Для експериментальних даних табл. 2 визначасмо кут β за формулою (15). Розрахунок зведемо в табл. 5. Наприклад, для плоского каналу з раптовим звуженням потоку $\beta = 63,22^\circ$ [18]. Дані табл. 5 нанесено на рис. 2, з якого видно, що значення коефіцієнта ε добре відповідають формулі (2).

У діапазоні зміни $m = 0,029 \dots 0,696$ (табл. 5, рис. 6) залежність $\beta = f(m)$ можна виразити формулою (коефіцієнт кореляції 0,977; середньоквадратичне відхилення 0,247; ймовірність 0,975 за критерієм Стьюдента):

$$\beta = (54,252 \pm 0,115) + (15,475 \pm 0,456) \cdot m. \quad (16)$$

На рис. 6 відносне значення похибки складає 2,5%.

Таблиця 5

Визначення кута нахилу вектора осередненої швидкості

Ч/ч	Діаметри труб, мм		Ступінь звуження потоку m	Коефіцієнт ζ (експеримент)	Кут β , град.	Коефіцієнт стиснення струменя ε
	D	d				
1.	103,1	26,0	0,064	0,490	55,0	0,588
2.	51,0		0,259	0,420	57,1	0,607
3.	26,0	20,6	0,630	0,228	64,5	0,677
4.	—	6,02	0,112	0,444	56,3	0,600
5.	—		0,250	0,370	58,7	0,622
6.	—		0,453	0,300	61,3	0,646
7.	—		0,696	0,197	66,1	0,693
8.	33,42	5,72	0,029	0,480	55,3	0,591
9.	15,85		0,130	0,445	61,3	0,646
10.	33,42	25,01	0,560	0,300	56,3	0,600

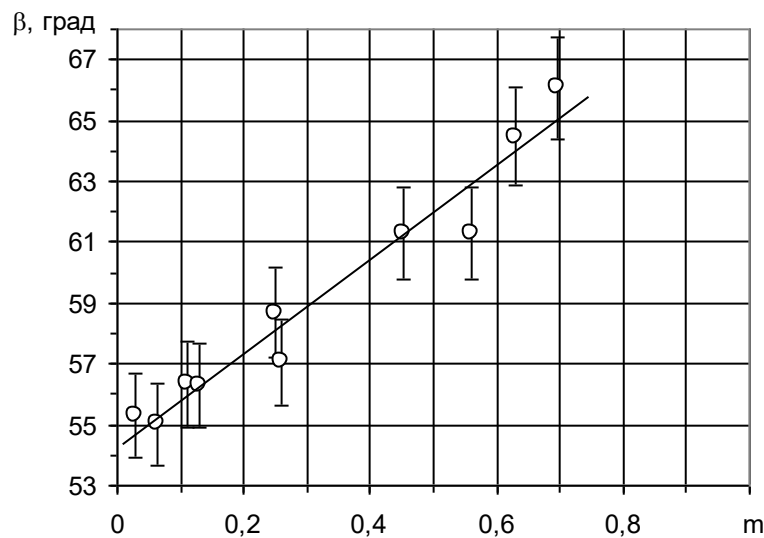


Рис. 6. Графік залежності $\beta = f(m)$

Висновок

Виходячи з моделі [16], визначено, що зміна тиску на раптовому звуженні круглої труби краще описується квадратичним законом – показник степеню $t = 2$ в формулі (9). Запропоновано залежність кута β нахилу вектора осередненої швидкості в перерізі входу в раптове звуження від ступеню звуження потоку m – формула (16).

1.Егоров С.А. О принципе наименьшего сопротивления // Изв. вузов. Строит. и архитектура. – 1966. – № 6. – С.136-137. 2.Симпсон. Обзор некоторых явлений, возникающих при отрыве турбулентного потока // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. – 1981. – Т.103, № 4. – С.131-149. 3.Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с. 4.Хьюит Дж., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 408 с. 5.Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости): Учебник для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с. 6.Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 343 с. 7.Александров В.А. Уравнения движения несжимаемой жидкости, находящейся под суммарным воздействием консервативных и неконсервативных сил // Гидравл. приводы и элементы гидроневоавтомат.: Сб. научн. тр. – М.: МАДИ, 1984. – С.109-117. 8.Носко С.В., Ковалев В.А. Методика гидродинамического расчета смазочных систем машиностроительного оборудования // Вестн. Нац. техн. ун-та "КПИ". Машиностроение. – 2002. – Вып. 42, т.1. – С.93-94. 9.Анискин Ю.В. Влияние гидродинамики потока гидросмеси с мелкими частицами на износ местных сопротивлений типа внезапного расширения и сужения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.278 / МИСИ. – М., 1972. – 14с. 10.Харитонов В.П., Мочалин Е.В. Винтовой поток в каналах переменного сечения / Н.-и. проект.-конструкт. ин-т "Параметр". – Алчевск, 1994. – 10 с. – Деп. в ГНТБ Украины 17.10.94, № 2062-Ук94. 11.Чернюк В.В., Пицишин Б.С., Орел В.И., Жук В.М. Влияние добавок полиакриламида на потери напора во внезапных сужениях и расширениях труб // Инж.-физ. ж. – 2002. – Т.75, № 4. – С.115-122. 12.Молло-Кристенсен. Физика турбулентных течений // Ракетная техника и космонавтика. – 1971. – Т.9, № 7. – С.3-16. 13.Карев В.Н. Потери напора при внезапном сужении трубопровода и влияние местных сопротивлений на нарушение потока // Нефтяное хозяйство. – 1953. – № 8. – С.50-56. 14.Альтиуль А.Д., Везирян Р.Е. Исследование потерь напора при внезапном сужении трубопровода // Гидравлика однородных и неоднородных жидкостей: Сб. тр. МИСИ. – 1972. – № 89. – С.8-12. 15.Гнатів Р.М. Вплив добавок поліакриламід у на гідрравлічні опори раптових звужень труб // Вісн. Львів. політехн. ін-ту. Теплоенергетичні системи та пристрої. – 1992. – № 266. – С.27-32. 16.Иньков А.П., Ярхо С.А. К расчету местных коэффициентов гидравлического сопротивления // Науч. тр. Всес. заочн. машиностроит. ин-та. – 1973. – Вып.9. – С.167-176. 17.Орел В. Застосування формули зміни діаметра струменя рідини стосовно раптового розширення трубопроводу // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехн.". Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2001. – № 432. – С.11-14. 18.Гришин Ю.А. Метод расчета отрывного течения // Изв. вузов. Машиностр. – 1983. – № 5. – С.79-84.