

УДК 532.555.2

В.І. Орел, кандидат технічних наук
Національний університет “Львівська політехніка”

ДОСЛІДЖЕННЯ ВКЛАДУ НЕОБОРОТНИХ ВТРАТ У ЗАГАЛЬНІ ВТРАТИ ТИСКУ ПРИ РАПТОВОМУ ЗВУЖЕННІ ТРУБИ

Показано, що заходи, направлені на зменшення втрат енергії на раптовому звуженні круглої труби, мають бути ефективними при ступені звуження потоку $m \geq 0,250$, коли частка необоротних втрат від загальних втрат тиску не перевищує 84,4%.

Ключові слова: втрати тиску, раптове звуження труби.

В.И. Орел

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА НЕОБРАТИМЫХ ПОТЕРЬ В ОБЩИЕ ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВНЕЗАПНОМ СУЖЕНИИ ТРУБЫ

Показано, что меры, направленные на уменьшение потерь энергии на внезапном сужении круглой трубы, должны быть эффективными при степени сужения потока $m \geq 0,250$, когда доля необратимых потерь от общих потерь давления не превышает 84,4%.

Ключевые слова: потери давления, внезапное сужение трубы.

V.I. Orel

INVESTIGATION OF THE PROPORTION OF IRREVERSIBLE LOSSES IN TOTAL PRESSURE LOSSES AT THE SUDDEN NARROWING OF PIPE

Measures to reduce energy losses by the sudden narrowing of round pipes shall be effective when the contraction area ratio of the flow $m \geq 0,250$, while the proportion of irreversible losses of total pressure losses not exceeds 84,4% it is shown.

Keywords: pressure losses, sudden narrowing of pipe.

Постановка проблеми

Головним завданням при розрахунку трубопроводів є визначення загального перепаду тиску Δp , Па, на робочій ділянці трубопроводу довжиною L , м, з наступним обчисленням потужності N , Вт, необхідної для транспортування рідини об'ємною витратою Q , м³/с [1, 243]:

$$N = \Delta p \cdot Q . \quad (1)$$

При цьому потужність N є середньою енергією \bar{W} , Дж, що підводиться на робочій ділянці трубопроводу за одиницю часу, с, за рахунок роботи сил

тиску при транспортуванні рідини [2]. Цю енергію можна привести або до довжини трубопроводу, Дж/м [3]:

$$\bar{W}_2 = \frac{N}{L} = \frac{\Delta p}{L} \cdot Q, \quad (2)$$

або до об'єму рідини в трубопроводі, Дж/м³ [2]:

$$\bar{W}_1 = \frac{N}{L \cdot \omega} = \frac{\Delta p}{L} \cdot V, \quad (3)$$

де V – середня швидкість руху транспортованої рідини, м/с,

$$V = Q/\omega; \quad (4)$$

ω – площа живого перерізу трубопроводу, м².

Оскільки у системах трубопровідного транспорту необхідним є зменшення втрат енергії [4], то кількість споживаної електроенергії, Дж, яка характеризує технічну ефективність транспортування рідин, можна записати як [5]:

$$E \approx \frac{\bar{W}}{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\bar{W}_{\zeta i}}{\bar{W}} \right), \quad (5)$$

де \bar{W}/η – споживана енергія при перепомповуванні рідини без використання заходів, направлених на зменшення втрат енергії;

η – коефіцієнт корисної дії нагнітача; при заходах, направлених на зменшення втрат енергії, $\eta \leq \eta_{\text{зм}}$;

$\bar{W}_{\zeta i} / \bar{W}$ – симплекс, який характеризує гідродинамічну ефективність цих заходів; $\bar{W}_{\zeta i} / \bar{W} \approx \zeta_{\zeta i} / \zeta$ [6];

$\bar{W}_{\zeta i}, \bar{W}$ – середня енергія, що підводиться на робочій ділянці трубопроводу, при цих заходах і без них відповідно;

$\zeta_{\zeta i}, \zeta$ – коефіцієнт гідравлічного опору системи, що відповідає $\bar{W}_{\zeta i}, \bar{W}$.

Для зменшення опору турбулентного потоку необхідно проаналізувати і розрахувати, як на потік впливає, зокрема, форма границь каналу [7].

Розглянемо осесиметричне раптове звуження круглої труби як один з найпростіших місцевих гідравлічних опорів. Спочатку, від перерізу 1–1 (рис. 1) до перерізу зміни діаметрів на так званій гідродинамічній кінцевій ділянці довжиною L_k відбувається дестабілізація потоку, де порушується структура, що була при рівномірному русі. Потім після вищезгаданого перерізу до перерізу 4–4 на гідродинамічній початковій ділянці довжиною L_n стабілізація потоку формує його структуру до такої, що відповідає рівномірному рухові рідини [8]. Між перерізами 1–1 та 4–4 відбувається трансформація епюри швидкостей.

Втрати тиску на раптовому звуженні труби є розподіленими на значній довжині руху, а не зосереджені на цьому місцевому гідравлічному опорі [8]. Ці ділянки руху рідини називають зонами впливу гідравлічного опору. Зазвичай зона впливу вверх за течією є істотно меншою, ніж униз [9, 141], що

підтверджують дослідження [10]. Тому вважають, що втрати тиску зумовлені, по-перше, тертям потоку при вході в трубу діаметром d та, по-друге, утворенням вихорів A та B [11, 100] (рис. 1).

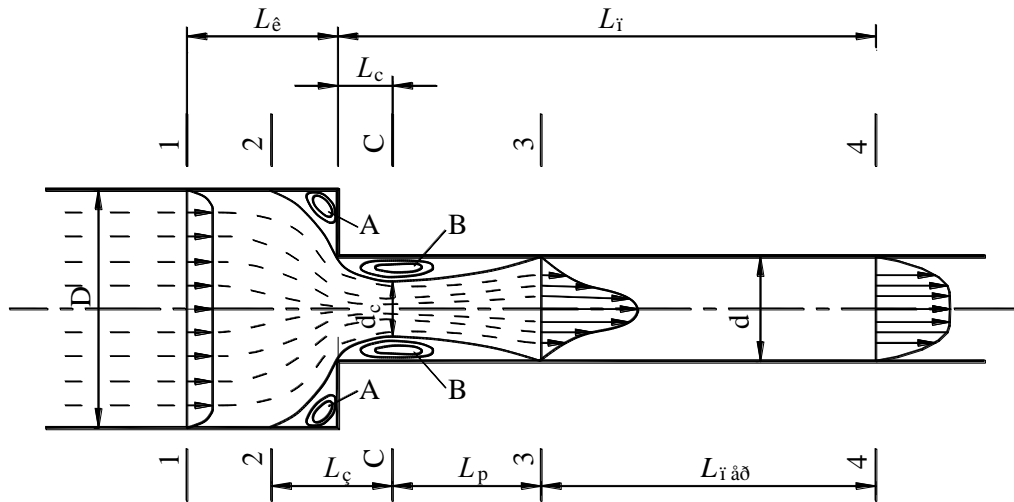


Рис. 1. Раптове звуження потоку: L_k – гідродинамічна кінцева ділянка; L_n – гідродинамічна початкова ділянка; L_3 – ділянка звуження; L_c – ділянка стиснення; L_p – ділянка розширення; $L_{пер}$ – перехідна ділянка (ділянка стабілізації епюри швидкостей); A, B – кільцеві вихоріві зони; $C-C$ – стиснений переріз

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Втрати тиску, Па, на раптовому звуженні труби [12, 71]:

$$\Delta p_{p.з} = \Delta p_l + \Delta p_R, \quad (6)$$

де Δp_l – необоротна складова втрат тиску, Па, що пов'язана з в'язкісною дисипацією енергії [12, 68-69];

Δp_R – оборотна складова втрат тиску, Па, що виникає за рахунок збільшення потенціальної енергії та може бути знову перетворена в кінетичну енергію [12, 68-69].

З метою корегування результатів формулу (6) пропонується [13] записувати як:

$$\Delta p_{p.з} = k \cdot \Delta p_l + \Delta p_R, \quad (7)$$

де k – поправковий коефіцієнт [13], для ньютонівської рідини $k = f_1(m)$;

m – ступінь звуження потоку (рис. 1),

$$m = \frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{d^2}{D^2}. \quad (8)$$

Оборотна складова втрат напору для турбулентного режиму руху є відносно малою в зв'язку з тим, що пульсації швидкостей на ділянці звуження довжиною L_3 завжди зменшуються; крім того, довжина стисненої частини струменя $L_c \approx 0,5d$ [14, 191]. Тому особливості течії на ділянці раптового звуження трубопроводу зручно характеризувати [13] часткою необоротних втрат тиску від загальних втрат $\Delta p_l / \Delta p_{p.з}$. Зменшенням необоротної складової втрат тиску Δp_l можна досягти, згідно з формулою (5), зниження кількості спожитої електроенергії E .

Уважатимемо [9, 151], що $\Delta p_l \approx \Delta p_{p,p}$, де $\Delta p_{p,p}$ – втрати тиску на раптовому розширенні потоку після стисненого перерізу С–С в трубі діаметром d [9, 151; 12, 68-69]:

$$\Delta p_{p,p} = \zeta_{p,p} \cdot \frac{\rho V_d^2}{2}; \quad (9)$$

де $\zeta_{p,p}$ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору при раптовому розширенні;
 ρ – питома маса рідини, кг/м³.

При раптовому розширенні потоку втрати енергії на ділянці розширення довжиною L_p (рис. 1) є більш визначальними, ніж на ділянці стабілізації епюри швидкостей довжиною $L_{пер}$, оскільки, згідно з [15], частка перших становить 80%, а других – 20%. Тому вказується [9, 150; 16, 151], що втрати тиску на раптовому звуженні труби є в основному на ділянці розширення потоку. Згідно з [9, 151], коефіцієнт

$$\zeta_{p,p} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2; \quad (10)$$

де ε – коефіцієнт стиснення струменя,

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_3} = \frac{d_c^2}{d^2}; \quad (11)$$

d_c – діаметр струменя, м, що відповідає площі струменя ω_c , м², в стисненому перерізі С–С (рис. 1).

Зазначимо, що формулу (10) було одержано з урахуванням втрат напору від розширення потоку та без урахування втрат напору на тертя. При цьому у формулі (7) коефіцієнт $k = 1$ [17].

Взявши до уваги, що

$$\Delta p_{p,\zeta} = \zeta_{p,\zeta} \cdot \frac{\rho V_d^2}{2}, \quad (12)$$

де $\zeta_{p,\zeta}$ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору при раптовому звуженні труби, маємо:

$$\frac{\Delta p_l}{\Delta p_{p,\zeta}} \approx \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2}{\zeta_{p,\zeta}}. \quad (13)$$

Хоча коефіцієнт $\zeta_{p,\zeta}$ – первинний показник, бо його розраховують безпосередньо за результатами вимірювань, але він є латентним, оскільки його не визначають на основі прямих вимірювань [18].

Для практичного використання формули (13) необхідно знати залежність $\varepsilon = f_2(d/D)$ або $\varepsilon = f_3(m)$.

Метою роботи є з'ясування вкладу необоротної складової втрат тиску у загальні втрати. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючі експериментальні дані.

**Вклад частки необоротної складової втрат тиску
у загальні втрати при раптовому звуженні круглої труби**

Згідно з даними Вайсбаха [12, 72; 19] (табл. 1), коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon = f_3(m)$, що можна описати формулою [20, 232]:

$$\varepsilon = 0,63 + 0,37 \cdot m^3 . \quad (14)$$

Таблиця 1

Залежність $\varepsilon = f_3(m)$ за даними Вайсбаха [12, 72; 19]

Ступінь m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Коефіцієнт ε	0,617	0,624	0,632	0,643	0,658	0,681	0,712	0,755	0,813	0,892	1,000

Дані табл. 1 добре описують формули (15) та (16), наведені відповідно в [19] та [21]:

$$\varepsilon = 0,61375 + 0,13318 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0,26095 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4 + 0,51146 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^6 ; \quad (15)$$

$$\varepsilon = 0,6349 - 0,1697 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 0,5145 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4 , \quad (16)$$

а також наша залежність (при коефіцієнті кореляції $r = 0,9999$ та стандартному квадратичному відхиленні $S = 0,0022$):

$$\varepsilon = \frac{1}{1,609 - 0,609 \cdot m^{2,1}} , \quad (17)$$

та дещо гірше – формула Гейгера [22]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - m}{2,08 \cdot (1 - m) + 0,5371} . \quad (18)$$

Вказується, що для $0,05 \leq m \leq 0,55$, згідно з Букінгемом [20, 233], можна користуватися формулою:

$$\varepsilon = 0,598 + 0,395 \cdot m^2 , \quad (19)$$

яка при $0,05 \leq m \leq 0,35$ з відносною похибкою до 3% відповідає формулі Альтшуля [23, 145]:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - m} . \quad (20)$$

Обчислення частки необоротних втрат від загальних втрат тиску, згідно з формулою (12), наведено в табл. 2. При цьому, оскільки $\varepsilon = f_4(\text{Re})$ [19], використовували значення $\zeta_{p,z}$, які не залежать від критерію Рейнольдса Re .

За даними табл. 2 збудовано графічну залежність $m - \Delta p_l / \Delta p_{p,z}$ (рис. 2), яку описано формулою (при коефіцієнті кореляції 0,933; середньоквадратичне відхилення 0,0455):

$$\frac{\Delta p_l}{\Delta p_{p,z}} = -1,700 \cdot m^2 + 0,853 \cdot m + 0,737 . \quad (21)$$

Як видно з рис. 2, частка необоротних втрат тиску від загальних $\Delta p_l / \Delta p_{p,z}$ зменшується зі збільшенням ступеня звуження потоку. Це дійсно підтверджує те, що втрати тиску при раптовому звуженні круглої труби зумовлені

розширенням струменя від стисненого перерізу С–С до повного перерізу труби діаметром d . Показано [19], що $\Delta p_l/\Delta p_{p.3} = 1,0$ при $d/D = 0,687$ (тобто $m = 0,472$). Згідно з формулою (21), співвідношення $(\Delta p_l/\Delta p_{p.3})_{\max} = 0,844$ при $m = 0,250 \dots 0,258$ (тобто $d/D = 0,500 \dots 0,508$), а $\Delta p_l/\Delta p_{p.3} \rightarrow 0$ при $m \rightarrow 0,960 \approx 1,0$.

Відомо [24], що встановлення кільцевої перешкоди перед перерізом зміни діаметра раптового звуження труби зменшує опір останньої при $m > 0,250 \dots 0,526$ при течії в ній води.

Таблиця 2

**Обчислення частки необоротних втрат тиску
при раптовому звуженні труби**

Ч/ч	Діаметри труб, мм		Відносний діаметр труби d/D	Ступінь звуження потоку m	Коефіцієнт стиснення струменя ϵ	Коефіцієнт $\zeta_{p.3}$, визначений експериментально	Джерело	Частка втрат тиску $\Delta p_l/\Delta p_{p.3}$
	D	d						
1.	103,10	26,00	0,252	0,064	0,622	0,490	[25]	0,754
2.	51,00		0,510	0,260	0,636	0,420		0,780
3.	26,00	20,60	0,792	0,628	0,725	0,228		0,631
4.	33,42	25,01	0,748	0,560	0,700	0,300	[26]	0,612
5.	33,42	5,72	0,171	0,029	0,622	0,480		0,769
6.	15,85		0,361	0,130	0,625	0,445		0,809
7.	29,60	22,50	0,760	0,578	0,706	0,280	[27]	0,619
8.	23,90	12,15	0,508	0,258	0,635	0,366	[10]	0,903
9.	—	6,02	0,334	0,112	0,624	0,444	[28]	0,818
10.	—		0,500	0,250	0,635	0,370		0,893
11.	—		0,673	0,453	0,670	0,300		0,809
12.	—		0,834	0,696	0,755	0,197		0,535
13.	—	—	0,510	0,260	0,636	0,395	[29]	0,829

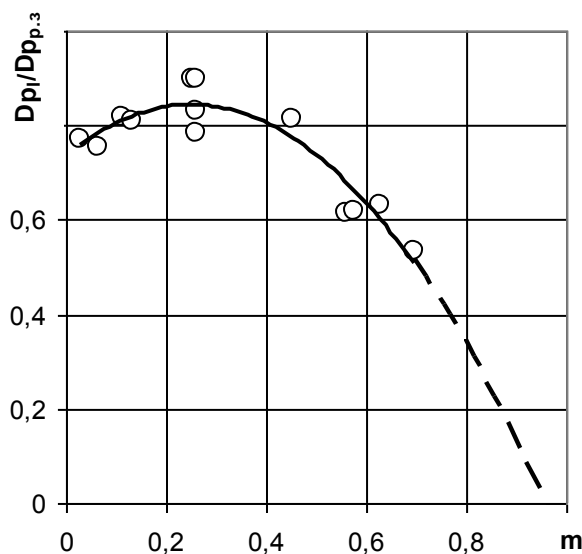


Рис. 2. Залежність частки необоротних втрат тиску від ступеню звуження потоку

Вказується [13], що $\Delta p_l / \Delta p_{p,з} \rightarrow 0$, коли розмір кільцевої вирової зони B (рис. 1) наближається до нуля. Тоді немає відриву потоку від стінок труби. При цьому втрати напору на раптовому звуженні труби відповідають втратам напору по довжині [13]. Це підтверджується зменшенням опору раптового звуження труб при $m > 0,700$ при течії в трубопроводі водних розчинів поліакриламід, коли втрати на тертя домінують над втратами на зміну форми [30].

Отже, можна стверджувати, що істотним вклад необоротної складової у загальні втрати тиску на раптовому звуженні круглої труби є при $m \geq 0,250$ (тобто $d/D \geq 0,500$), становлячи при цьому $\Delta p_l / \Delta p_{p,з} \leq 84,4\%$. Саме тоді необхідно застосовувати заходи, направлені на зменшення втрат енергії. Для раптового звуження трубопроводу цього досягають зниженням значення коефіцієнта місцевого гідравлічного опору за рахунок ліквідації відриву потоку від стінок.

Висновки

Можна вважати, що втрати тиску на раптовому звуженні круглої труби зумовлені розширенням струменя рідини в трубі меншого діаметру від стисненого перерізу до її стінки. Заходи, направлені на зменшення втрат енергії на цьому місцевому гідравлічному опорі мають бути ефективними при ступені звуження потоку $m \geq 0,250$ (тобто при відносному діаметрі труби $d/D \geq 0,500$), коли частка необоротних втрат тиску від загальних втрат є меншою за 84,6%.

Перспективи подальших досліджень

Наступним етапом може бути з'ясування вкладу необоротних втрат тиску у загальні втрати для більш складних місцевих гідравлічних опорів, наприклад запірних пристроїв.

Список літератури

1. Дейч М.Е. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие для вузов / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
2. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
3. Пеев Г.А. К вопросу об оптимизации транспортирования реологически сложных жидкостей по трубопроводам / Г.А. Пеев, В.А. Герасименко // Теор. основы хим. технологии. – 1979. – Т. 13, № 2. – С.290-293.
4. Повх И.Л. Гидродинамика труб переменного сечения / И.Л. Повх, Н.В. Фиошин // Инж.-физ. журн. – 1992. – Т. 62, № 4. – С.525-533.
5. Орел В.І. Ефект від використання гідродинамічно активних додатків при транспортуванні рідин у трубопроводах / В.І. Орел // Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехн.". Теплоенергетика. Інженерія докiллля. Автоматизація. – 2008. – № 617. – С.63-68.
6. Орел В.І. Вплив додатків поліакриламід на втрати напору в раптових звуженнях і розширеннях труб: дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук:

спец. 05.23.16 «Гідравліка та інженерна гідрологія» / В.І. Орел; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2003. – 160 с.

7. Молло-Кристенсен. Физика турбулентных течений / Молло-Кристенсен // Ракетная техника и космонавтика. – 1971. – Т.9, № 7. – С.3-16.

8. Квитковский Ю.В. О структуре и содержании раздела гидродинамики "Неравномерное напорное движение жидкости" / Ю.В. Квитковский // Методика преподавания гидравлики напорных течений: Сб. науч. тр. ЛПИ. – 1986. – С.64-73.

9. Тананаев А.В. Течение в каналах МГД-устройств / А.В. Тананаев. – М.: Атомиздат, 1979. – 368 с.

10. Palacios S. Fredy M. Estudo Experimental do Escoamento de Fluido Newtoniano em Contração Abrupta Axissimétrica com a Técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 174 p. – Режим доступа: www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/SANCHEZ,%20Fredy%20Palacios.pdf.

11. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

12. Хьюит Дж. Кольцевые двухфазные течения / Дж. Хьюит, Н. Холл-Тэйлор; Пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.

13. Тютчев И.И. Особенности течения неньютоновских жидкостей в области внезапного сужения канала / И.И. Тютчев, Н.Т. Романенко, О.М. Яхно // Хим. машиностроение: Республ. межвед. н.-т. сб. – 1975. – № 22. – С.110-116.

14. Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости): Учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с.

15. Баланин В.В. Определение коэффициента сопротивления при резком расширении потока методом теории турбулентных струй / В.В. Баланин, В.П. Василевский // Водные пути и гидротехнические сооружения: Тр. Ленингр. ин-та водн. транспорта. - 1977. - Вып.158. - С.10-15.

16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; Под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

17. Благов Э.Е. Предельный максимальный коэффициент расхода сужающих устройств гидросистем / Э.Е. Благов // Арматуростроение. – 2007. – №2 (47). – С.57-63. – Режим доступа: www.valve-industry.ru/pdf_site/47/47_nauka_blagov_gidrosyst.pdf.

18. Благов Э.Е. Расчет интегральных гидродинамических показателей трубопроводных сужающих устройств / Э.Е. Благов // Арматуростроение. – 2006. – №6 (45). – С.44-49. – Режим доступа: www.valve-industry.ru/pdf_site/45/45_nauka_blagov_raschet.pdf.

- 19.** Бенедикт. Потери давления в резко сужающихся и расширяющихся потоках / Бенедикт, Карлуччи, Светц // Энергетические машины и установки. – 1975. – № 4. – С.79-89.
- 20.** Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
- 21.** Streeter V.L. Fluid Mechanics / V.L. Streeter, E.B. Wylie, K.W. Badford. – WCB McGraw-Hill, 1998.
- 22.** Chalfi Toufik Y. Pressure loss associated with flow area change in micro-channels: Thesis Master of Science / Georgia Institute of Technology. – August 2007. – 80 p. – Режим доступа: www.smartech.gatech.edu/jspui/bitstream/1853/24725/1/chalfi_Toufik_y_200708_mast.pdf.
- 23.** Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
- 24.** Ando T. Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction / T. Ando, T. Shakouchi // Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ. – 2004. – Vol.29. – P.1-8.
- 25.** Карев В.Н. Потери напора при внезапном сужении трубопровода и влияние местных сопротивлений на нарушение потока / В.Н. Карев // Нефтяное хозяйство. – 1953. – № 8. – С.50-56.
- 26.** Гнатів Р.М. Вплив добавок поліакриламід у на гідрравлічні опори раптових звужень труб / Р.М. Гнатів // Вісн. Львів. політехн. ін-ту. Теплоенергетичні системи та пристрої. – 1992. – № 266. – С.27-32.
- 27.** Fyrrillas Marios M. Fluid Mechanics / Marios M. Fyrrillas; Frederick University Cyprus. – Режим доступа: www.staff.fit.ac.cy//eng.fm/classes/amee202/Fluids%20Lab%20Friction%20losses.pdf.
- 28.** Альтшуль А.Д. Исследование потерь напора при внезапном сужении трубопровода / А.Д. Альтшуль, Р.Е. Везирян // Гидравлика однородных и неоднородных жидкостей: Сб. тр. МИСИ. – 1972. – № 89. – С.8-12.
- 29.** Верховкер Г.П. К вопросу использования эффекта Томса в энергетике / Г.П. Верховкер, Т.А. Роговский, Ю.А. Дудин // Теплоэнергетика. – 1972. – № 1. – С.85-86.
- 30.** Чернюк В.В. Влияние добавок полиакриламида на потери напора во внезапных сужениях и расширениях труб / В.В. Чернюк, Б.С. Пицишин, В.И. Орел, В.М. Жук // Инж.-физ. журн. – 2002. – Т.75, № 4. – С.115-122.