

ВПЛИВ ДОДАТКІВ ПОЛІМЕРІВ НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР ДІАФРАГМ

© Орел В.І., Чернюк В.В., 2006

Додатки полімерів, зменшуючи турбулентне тертя, змінюють втрати тиску на витратомірних діафрагмах, чим вносять похибку в їхні покази.

Polymer additions, reducing turbulent friction, change the losses of pressure on orifices for measurement of the flow rate, than bring in an error in their readings.

Постановка проблеми. За допомогою діафрагм вимірюють витрату рідини у трубопроводах [1, 2]. Дія будь-яких чинників, що спричиняють зміну втрат тиску на витратомірній діафрагмі, знижує точність вимірювання витрати рідини [3, с.28]. У зв'язку з цим виникла необхідність визначення впливу різних факторів на течію рідини крізь діафрагми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Обов'язковим є безкавітаційна течія рідин через діафрагму [1, с.9], оскільки при виникненні кавітації діафрагми стають непридатними як витратоміри [3, с.28]. Проте кавітацію, яка у цьому випадку здійснює запираючу дію [3, с.28], можна використовувати в інших пристроях, що застосовуються для регулювання витрати рідини (у бік її зменшення).

При течії води крізь діафрагму з діаметром $d = 38,4$ мм, встановлену в трубопроводі з діаметром $D = 96,0$ мм ($m = 0,160$), спостерігалася кавітація при числі Рейнольдса $Re = 43 \cdot 10^4$ [4].

Втрати напору при течії глинистих розчинів крізь нормальні діафрагми, встановлені на трубопроводі з $D = 9,975$ см ($m = 0,040-0,593$), не залежать від в'язкості при числах $Re \geq 10000$ та дорівнюють втратам напору для води [5].

При накладанні пульсацій частотою від 20 до 60 Гц на течію індустріальної оливи И-20 в діафрагмах з $D/d = 4,28-10,0$ ($m = d^2/D^2 = 0,055-0,01$) у діапазоні зміни числа Re від 1000 до 7000, порашованого за середньою швидкістю руху рідини в отворі діафрагми, коефіцієнти її місцевого опору ζ для пульсуючої течії відповідають стаціонарним [6].

Впорядкована (штучна) поперечна циркуляція рідини зменшувала коефіцієнт місцевого опору ζ шайби з $d = 70$ мм та товщиною 1,5 мм, встановленій у трубопроводі з $D = 100$ мм і довжиною $L = 9,0$ м. Коефіцієнт ζ був меншим для гвинтового потоку порівняно з негвинтовим на 29,9–5,2 % при розташуванні шайби на відносних відстанях від джерела завихрення $L/D = 1,6-76,0$ [7].

Відомо, що розчини гідродинамічно активних додатків (ГДАД), які зменшують втрати напору у прямих трубопроводах, впливають на течію рідини в місцевих опорах. Так, додатки оксиду поліетилену РЕО 15 (ПЕО) з молекулярною масою $M = 3 \cdot 10^6$ та концентраціями $C = 10$ та 50 ppm при течії крізь діафрагму з $d = 8$ мм ($D = 20$ мм; $m = 0,160$) при температурі 7–12°C та числі $Re = (5,0-6,5) \cdot 10^4$ призводять до ефективного пригнічення процесів виникнення та розвитку кавітації [8].

Зменшення втрат напору на 11% спостерігалася [9] на діафрагмі з $d = 0,140$ " ($D = 0,492$ "; $m = 0,081$) при уведенні в потік води температурою 16,1°C додатків ПЕО Polyox WSR-301 ваговою концентрацією 30 ppm (вік полімерного розчину – 30 год.).

Для течій при $Re = 4 \cdot 10^2-2 \cdot 10^4$ водних розчинів ПЕО Polyox Coagulant з концентраціями $C = 300$ та 600 ppm знайдено [10], що коефіцієнт витрати діафрагм з діаметрами отворів $d = 0,016$ "; 0,070" та 0,101", установлених в трубі з $D = 0,5$ ", менший, ніж для води і залежить від C . Аналогічні результати одержано [11] і при течії ПАА з $C = 0,5\%$ крізь витратомірні діафрагми з $d = 1,375$ " ($m = 0,474$) при $Re = (1,6-1,7) \cdot 10^4$ та $d = 1,5$ " ($m = 0,563$) при $Re = (6,8-3,2) \cdot 10^4$. При менших числах

Рейнольдса коефіцієнт витрати є більшим, ніж для води, що також було виявлено і для діафрагми з $d = 1,25''$ ($m = 0,391$) [11].

Для діафрагми з $m = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$, встановлених у трубі з $D = 65$ мм, при турбулентній течії крізь них води і водних розчинів ПЕО з $C = 2,4 \cdot 10^{-4}$ та $1,64 \cdot 10^{-4}$ кг/кг не виявлено [12] істотного впливу ГДАД на місцеві втрати напору.

При течії розчину ПАА концентраціями $8 \cdot 10^{-5}$ та $5 \cdot 10^{-4}$ кг/кг крізь діафрагмами діаметрами 13,6; 17,2; 20,0; 29,1; 37,7; 47,4; 58,5 мм, встановленими в трубопроводі з $D = 68,0$ мм, одержано незначне збільшення опору [13], значення якого знаходилося в межах похибки експерименту.

Про неістотний вплив додатків ПАА на коефіцієнт опору діафрагм з $d = 13,9$ мм ($D = 40$ мм, $m \approx 0,121$), $d = 15$ мм ($D = 50$ мм, $m = 0,090$), $d = 12,25$ мм ($D = 50$ мм, $m = 0,060$) повідомляється у [14], де досліджувалися ламінарні течії з $Re < 2000$.

Результати з впливу полімерних додатків на коефіцієнт опору діафрагм наведено в табл.1.

Таблиця 1

Вплив гідродинамічно-активних полімерів на втрати напору в діафрагмах

Ч/ч	Діаметри, мм		Ступінь стиснення потоку $m = d^2/D^2$	Водний розчин ГДАД	Концентрація C			$\Delta\zeta\zeta, \%$	Число Рейнольдса Re	Література	
	D	d			кг/дм ³	%	ppm*				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	—	—	0,096	ПАА	$3 \cdot 10^{-5}$	—	—	-1,6		[15]	
2	21,5	16,0	0,554	гуарова смола	—	0,03	—	6,0	$(7,1 \dots 27,0) \cdot 10^4$	[16]	
3		12,0	0,312		—	0,03	—	2,0			$(5,3 \dots 21,0) \cdot 10^4$
4		8,0	0,138		—	0,03	—	0	$(3,5 \dots 14,0) \cdot 10^4$		
5		6,2	0,083		—	0,03	—	0	$(2,7 \dots 11,0) \cdot 10^4$		
6		4,3	0,040		—	0,09	—	-4,0	$(1,9 \dots 7,0) \cdot 10^4$		
7		4,0	0,035		ПЕО (Polyox WSR-301)	—	0,09	—	≈ 0		
8	70,0	54,0	0,595	ПОЕ (Polyox WSR-301)	$1 \cdot 10^{-3}$	—	—	1,9	[17]		
9		41,5	0,351		$2 \cdot 10^{-3}$	—	—	3,8			
10		26,5	0,143		$1 \cdot 10^{-3}$	—	—	-7,2			
					$2 \cdot 10^{-3}$	—	—	-16,5			
11	65,0	—	0,500	ПЕО, $M = (1 \dots 3) \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	—	—	2,7	$(5 \dots 15) \cdot 10^4$	[12]	
12	68,0	29,1	0,183	ПАА (ТУ 6-01-1049-81)	$1,64 \cdot 10^{-3}$	—	—	0,3			
13	10,5	8,1	0,595	ПАА (Separan AP-30)	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	-1,2	$(8 \dots 14) \cdot 10^4$	[13]	
14		7,0	0,444		$5 \cdot 10^{-4}$	—	—	-3,8			
15		5,9	0,316		—	—	300	24,0	$1,165 \cdot 10^4$		
					—	—	300	15,2	$1,05 \cdot 10^4$		
16	20,95	15,95	0,580	ПАА (ТУ 6-01-1049-81)	—	—	100	7,9	$0,89 \cdot 10^4$	[18]	
17	20,95	15,95	0,580	ПОЕ (Polyox Coagulant), $M = 6,5 \cdot 10^6$	—	—	200	11,1			
16	20,95	15,95	0,580	ПАА (ТУ 6-01-1049-81)	—	—	300	14,3	$(3,0 \dots 3,7) \cdot 10^4$		[19]
					$5 \cdot 10^{-6}$	—	—	2,2			
					$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	4,4			
					$1 \cdot 10^{-4}$	—	—	6,6			
17	20,95	15,95	0,580	ПОЕ (Polyox Coagulant), $M = 6,5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—	11,8	$4 \cdot 10^4$	[19]	
					$3 \cdot 10^{-6}$	—	—	7,2			
					$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	10,1			
					$3 \cdot 10^{-5}$	—	—	15,6			
					$1 \cdot 10^{-4}$	—	—	24,1			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18	20,95	9,2	0,193	ПАА (ТУ 6-01-1049-81)	$1 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-6}$ $1 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-4}$	—	—	≈ 0	$4 \cdot 10^4$	[19]
19	20,95	4,6	0,048	ПАА (ТУ 6-01-1049-81)	$1 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-6}$ $1 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-4}$	—	—	≈ 0	$(2,0 \dots 2,4) \cdot 10^4$	[19]

* $1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ кг/дм}^3$

У таблиці $\Delta\zeta/\zeta$ – відносна зміна коефіцієнтів ζ :

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = 1 - \frac{\zeta_s}{\zeta_w}, \quad (1)$$

де ζ_w – коефіцієнт опору при течії води; ζ_s – те ж, водних розчинів полімера за однакових чисел Re. Співвідношення ζ_s/ζ_w характеризує ефективність ГДАД.

Оскільки внаслідок літературного огляду знайдено більше джерел з впливу ГДАД, а саме високомолекулярних сполук, на течію рідини у діафрагмах, то потрібно детальніше вивчити його.

Задачі досліджень. Метою роботи є визначення впливу високомолекулярних сполук на значення коефіцієнтів місцевого опору діафрагм під час течії крізь них рідин. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати наявні експериментальні дані та пояснити одержані результати.

Аналіз наявних експериментальних даних. Нами досліджено турбулентні течії води і водних розчинів ПАА з масовими концентраціями $C = 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-4}$ кг/кг крізь діафрагми з діаметрами отворів $d = 13,65; 17,2; 20,0; 29,1; 37,7; 47,35$ і $58,5$ мм, які установлювались в трубопроводі з внутрішнім діаметром $D = 68$ мм [13]. Також діафрагми з діаметрами отворів $d = 4,6; 9,2; 13,0; 15,95$ і $18,4$ мм, змонтовані у трубопроводі діаметром $D = 20,95$ мм, випробовувались при турбулентних потоках води і водних розчинів ПАА тих самих концентрацій, а діафрагма з $d = 15,95$ мм – при течіях крізь неї водних розчинів ПОЕ (Polyox Coagulant, $M = 6,5 \cdot 10^6$) з $C = 3 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-4}$ кг/кг [19]. Деякі дослідження [19] зображено на рис.1.

Як видно з рис.1, експериментальні дані для течії води добре узгоджуються з напівемпіричною залежністю, що описує коефіцієнт опору діафрагм, встановлених у сталевих трубах діаметром 20 мм при течії води температурою $2-70^\circ\text{C}$ при $0,1 \leq m \leq 0,6$ [20]:

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

При дослідженні діафрагми з $d = 15,95$ мм, встановленій в трубі з $D = 20,95$ мм ($m = 0,580$), на відміну від ПАА з $C = 5 \cdot 10^{-4}$ кг/кг добавки ПЕО завдяки більшій молекулярній масі зменшили опір при $C = 3 \cdot 10^{-5}$ та 10^{-4} кг/кг [19]. Останні результати узгоджуються з [21], коли для одержання порівняного ефекту концентрація штучно синтезованого полімеру має бути на порядок меншою, ніж природного (гуарова смола [16]).

За даними табл.1 збудовано рис.2. Криві на рис.2 побудовано за формулою [22]

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \frac{C}{a + b \cdot C}, \quad (3)$$

де a, b – емпіричні коефіцієнти, які наведено в табл.2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів a та b в формулі (3)

Позиція в табл.1 та на рис.3	Коефіцієнти		Коефіцієнт кореляції	Середньоквадратична похибка
	a , кг/дм ³ чи ppm	b		
15	9,026	0,0411	0,9904	0,6270
16	$2,006 \cdot 10^{-6}$	0,0918	0,9044	2,1612
17	$0,580 \cdot 10^{-6}$	0,0377	0,9589	2,5829

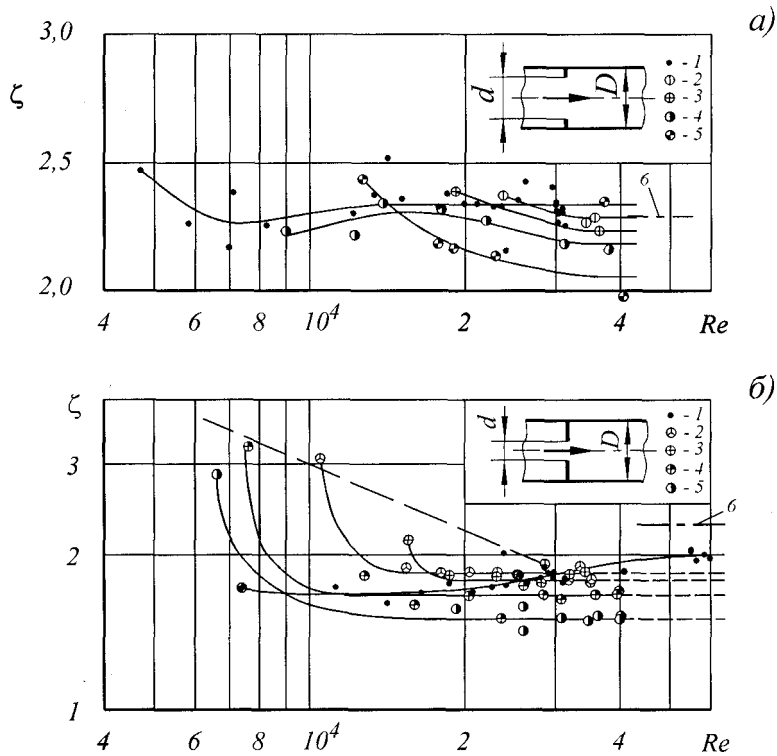


Рис. 1. Коефіцієнт опору діафрагми з $d = 15,95$ мм при течіях крізь неї різних розчинів:
 а – ПАА з концентраціями C , кг/дм³: $0 - 1$; $5 \cdot 10^{-6} - 2$; $10^{-5} - 3$; $5 \cdot 10^{-5} - 4$; $10^{-4} - 5$; $3 \cdot 10^{-4} - 6$; $5 \cdot 10^{-4} - 7$;
 б – ПОЕ з концентраціями C , кг/дм³: $0 - 1'$; $3 \cdot 10^{-6} - 2'$; $10^{-5} - 3'$; $3 \cdot 10^{-5} - 4'$; $10^{-4} - 5'$ ($D = 20,95$ мм);
 б – за формулою (2)

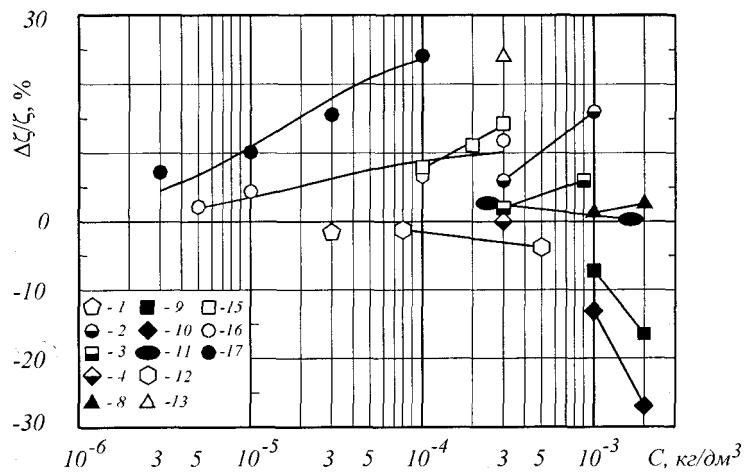


Рис. 2. Відносна зміна коефіцієнта опору діафрагми $\Delta\zeta/\zeta = f(C, m)$
 при течії водних розчинів різних полімерів (умовні позначення відповідають пунктам табл. 1)

На основі аналізу літературних даних, а також результатів наших експериментальних досліджень встановлено, що вплив додатків на значення місцевих втрат тиску підсилюється зі зменшенням діаметрів трубопроводів, в яких вони розміщені. Зміна значення опору діафрагм полімерними додатками залежить від їх виду і концентрації їх розчинів, ступеня стиснення потоку і молекулярної маси полімеру.

Було виявлено [16], що при малих ступенях стиснення потоку добавки гуарової смоли спричиняли зниження опору діафрагм, при великих ступенях стиснення потоку – збільшення, що, до того ж, є в прямій залежності від концентрації розчину C (рис.2).

Наявні експериментальні відомості підтверджують думку [23], що ГДАД спричиняють зменшення місцевого гідравлічного опору тоді, коли значну частину загального опору становлять втрати тертя, що у нашому випадку відбувається при малих значеннях ступенів стиснення потоку у діафрагмі.

До втрат напору в діафрагмах входять втрати на звуження з подільшим розширенням потоку, де частка останніх є переважаючою. Механізм впливу ГДАД на втрати напору в раптових звуженнях і раптових розширеннях наведено в [24]. При незначних ступенях стиснення потоку спостерігалось зменшення місцевих втрат напору, і навпаки, при великих ступенях стиснення потоку отримували збільшення опору.

Як видно з рис.2 та табл.1, при течії додатків високомолекулярних сполук крізь діафрагми проявляються ефекти діаметра та концентрації. Перший з них полягає у відмінності коефіцієнтів опору для розчину постійної концентрації при течії в трубах різних діаметрів, другий – в їхніх неоднакових значеннях для різних розчинів у трубопроводі одного діаметра за рівних значень числа Рейнольдса. Обидва ефекти, особливо ефект діаметра, призводять до труднощів під час порівняння результатів досліджень з різними діаметрами труб і діафрагм [25]. Проте, число Рейнольдса має другорядне значення, а за домінанту приймається напруження зсуву на стінці труби, значення яких у трубопроводах малих діаметрів є набагато більшими, ніж у трубопроводах великих діаметрів [26].

Варто зазначити, що високомолекулярні сполуки при течії в трубопроводах, зменшення турбулентного тертя, зазнають механічної деструкції, яка проявляється у послабленні їхньої гідродинамічної активності. Концентрація полімерних додатків у рідині незмінна, а їхній вплив зменшується, прямує до нуля. Отже, не можливо точно врахувати дію цих додатків на гідравлічний опір витратомірних діафрагм навіть при ступенях звуження потоку $m < 0,05$ (див. табл.1), коли вплив додатків ≈ 0 .

Варто зауважити, що на відміну від полімерних додатків такі сполуки, як міцелотворні поверхнево-активні речовини (ПАР), мають “оборотну” деструкцію [27], тобто відновлюють свої гідродинамічні властивості. Дія міцелотворних ПАР на гідравлічні опори трубопроводів є стабільною і може бути врахована при вимірюванні витратомірними діафрагмами.

Висновки. Витратомірні діафрагми даватимуть істотну похибку під час застосування їх на трубопроводах, якими транспортують рідини з високомолекулярними сполуками, що застосовують для зменшення турбулентного тертя. Гідродинамічна активність цих додатків послаблюється механічною деструкцією аж до повного зникнення і її не можна точно врахувати. На відміну від полімерних додатків дія міцелотвірних ПАР є стабільною в часі, отож, може бути прогнозованою і врахованою.

1. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 2. РД 50-411-83. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств: Метод. указания. – М.: Изд-во стандартов, 1984. 3. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 688 с. 4. Исследование структуры потока рабочей среды в геометрических неоднородностях трубопроводов гидравлических систем методами визуализации: Отчёт о НИР (заключит.) / Львов. политехн. ин-т. – 4700; № ГР 01890009056; Инв. № 02900013372. – Львов, 1989. – 58 с. 5. Мавлютов М.Р. Потери напора при прохождении глинистых растворов через диафрагму // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1960. – № 7. – С.91–95. 6. Попов Г.Н., Дудин В.М.

Экспериментальные исследования потерь давления на местных сопротивлениях при пульсирующем течении жидкости // *Строит. и доп. машины: Межвуз. сб. науч. тр. (Ярославль)*. – 1980. – Вып.4. – С.92–96. 7. Аксенов Ю.И. Исследование влияния поперечной циркуляции на местные сопротивления в напорных трубопроводах // *Гидравлика и гидротехника: Республ. межведом. науч.-техн. сб.* – 1970. – Вып.10. – С.49–52. 8. Оба, Ито, Ураниси. Влияние полимерных добавок на развитие кавитации и шума при течении водяного потока через диафрагму // *Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех.* – 1978. – № 4. – С.214–220. 9. Bate H.G. Orifice plate calibration in a dilute polymer solution // *Nature*. – 1967. – Vol.216, № 5120. – P.1100–1101. 10. Giles W.B. Orifice flows of polyethylene oxide solutions // *Nature*. – 1969. – Vol.224, № 5219. – P.584–585. 11. Harris J., Magnall A.N. The use of orifice plates and Venturi meters with non-Newtonian fluids // *Trans. Inst. Chem. Eng.* – 1972. – Vol. 50, № 1. – P.61–68. 12. Мизиренко Г.С., Мизин М.В., Семенов Б.Н., Черногузов В.Н., Шереметов В.К. Местные сопротивления течению разбавленных водных растворов полиэтиленоксида // *Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. техн. н.* – 1976. – № 3, вып. 1. – С.51–56. 13. Левицкий Б.Ф., Чернюк В.В. Местные сопротивления при многократной перекачке слабоконцентрированных водных растворов полиакриламида // *Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства*. – 1982. – № 160. – С.40–45. 14. Švec Jan. Srovnani velikosti místnich ztrat při průtoku nelineárných tekutin pseudoplastického typu a viskosní newtonské kapaliny škrceními na potrubí při nízkých číslach Re // *Vodchospodársky časopis*. – 1974. – Ročník XXII, Č.3. – S.270–292. 15. Верхивкер Г.П., Роговский Т.А., Дудин Ю.А. К вопросу использования эффекта Томса в энергетике // *Теплоэнергетика*. – 1972. – № 1. – С.85–86. 16. Липатов Б.В. Исследование влияния полимерных добавок на турбулентное трение при резких изменениях живого сечения потока в трубах // *Изв. АН СССР. Механика жидк. и газа*. – 1972. – № 2. – С.153–156. 17. Иванюта Ю.Ф., Чекалова Л.А. Исследование добавок полимера на величину коэффициента местного сопротивления // *Инж.-физ. ж.* – 1974. – Т. XXVI, № 6. – С.965–971. 18. Shima Nobuyuki. Loss and discharge characteristics a flow of polymer solution through pipe orifices // *Bull. JSME*. – 1984. – Vol.27, № 225. – P.443–449. 19. Чернюк В.В. О сопротивлении диафрагм при турбулентном течении полимерных растворов // *Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства*. – 1986. – № 208. – С.79–82. 20. Савенков Ю.И., Додусенко В.В. К расчету гидравлического сопротивления диафрагм // *Вопр. проектирования и монтажа сантехн. систем*. – Л., 1980. – С.46–50. 21. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування // *Вісн. АН УРСР*. – 1987. – № 1. – С.23–33. 22. Чернюк В.В., Орел В.І., Гнатів Р.М. Змінювання гідравлічного опору раптових розширень труб додатками поліакриламідом // *Вісн. Укр. держ. ун-ту водн. госп-ва та природокорист. Збірник наук. праць*. – 2002. – Вып.5 (18), ч.5. *Гідротехнічні споруди, гідравліка, гідрологія та гідроенергетика*. – С.202–209. 23. Повх І.Л. Зменшення турбулентного тертя – основне джерело економії енергії // *Вісн. АН УРСР*. – 1982. – №11. – С.66–74. 24. 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. 25. Амфилохийев В.Б., Артюшков Л.С. Критерии подобия турбулентных течений разбавленных растворов полимеров и обобщенная зависимость для коэффициента трения // *РАН. Изв. Академии наук. Мех. жидкости и газа*. – 1998. – №4. – С.191–196. 26. Несын Г.В., Манжсай В.Н., Илюшников А.В. Промышленный синтез и оценка гидродинамической эффективности потенциальных агентов снижения сопротивления в нефтепроводах // *Инж.-физ. ж.* – 2003. – Т.76, № 3. – С.142–146. 27. Пилипенко В.Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения // *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. Т.15*. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1980. – С.156–257.