

1. Артюшков Л.С. Переход от ламинарного течения к турбулентному для степенных чисто-вязких неньютоновских жидкостей // *Тр. Ленинградского кораблестроительного ин-та.* – 1974. – Вып.89. – С.19-24. 2. Артюшков Л.С. Исследование ламинарно-турбулентного перехода степенных неньютоновских жидкостей / *Проблемы гидродинамики судна.* – Л., 1985. – С.12-18. 3. Девисилов В.А., Белов С.В. Переходный и турбулентный режимы течения неньютоновских жидкостей в круглых трубах // *Изв. вузов. Машиностроение.* 1980. – № 2. – С.55-59. 4. Кондратьев А.С. Течение степенной жидкости в круглых трубах // *Изв. вузов. Нефть и газ.* – 1983. – № 12. – С.45-49. 5. Лецій Н.П. Розрахунок гідравлічного коефіцієнта тертя для гладкостінної та перехідної зон опору в турбулентному потоці чисто-вязких степеневих рідин // *Прикладні питання гідравл., водопостачання та водовідведення.* – Львів, 1991. – 10 с. *Рукоп. деп. в УкрНДІНТІ 28.01.91 р., Ук-91.* 6. Скрипников Ю.В. Переход от ламинарного режима к турбулентному при течении неньютоновской жидкости в трубопроводах // *Тр. ВНИИСПТнефть "Сбор, подготовка и транспорт нефти и нефтепродуктов".* – Уфа, 1973. – Вып. XI. – С.30-36. 7. Dodge D.W., Metzner A.B. Turbulent flow of non-Newtonian systems // *AICHE journ.* – 1959. – Vol.5. – № 2. – P.184-204. 8. Ryan N.W., Johnson M.M. The laminar-turbulent transition for flow in pipes // *AICHE journ.* – 1959. – Vol.5. – № 4. – P.433-435.

УДК 532.517.4:532.135:532.55

Орел В.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра гідравліки та сантехніки

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОЛІМЕРНИХ ДОДАТКІВ НА ВТРАТИ ТИСКУ В МІСЦЕВИХ ОПОРАХ ТРУБОПРОВОДІВ

© Орел В., 2000

**In the article the review and analysis of influence of the polymer additives on pressure losses in local resistances of pipelines is carried out.**

Зменшення турбулентного тертя в циліндричних трубах полімерними добавками при невеликих (порядку 10...1000 ppm) концентраціях у турбулентному потоці відоме як ефект Томса.

Протікаючи через місцеві опори, рідини з полімерними добавками впливають на них так само, як і під час руху в циліндричних трубах. Але цей вплив ще залежить від виду місцевого опору та його геометричних характеристик, а також від абсолютних значень діаметра труби до і після опору. Він стає істотним при  $d < 21$  мм, при збільшенні до 35 мм є неістотним, а при  $d \geq 50$  мм – відсутній [1]. Причому виявлено [2], що наявність на трубопроводі місцевих опорів деструктивно впливає на ефект Томса.

**Мета статті** – огляд робіт й аналіз впливу полімерних добавок на втрати тиску в місцевих опорах трубопроводів.

Особливий інтерес становлять конфузорні та дифузорні течії рідин, які є елементами потоків на складніших місцевих опорах у трубопроводах [3]. З аналізу результатів досліджень дійшли висновку [3], що вплив полімерів і поверхнево-активних речовин на місцеві втрати тиску в конфузорах і дифузорах якісно однаковий.

На експериментальному трубопроводі (рис.1) досліджено конфузори [4] та дифузори [5], що встановлювали між торцями труб з відповідними діаметрами, причому  $D=20,95$  мм=const;  $d=var$ . Конфузори мали кути конусності 10, 15, 30, 40, 50, 60, 80, 140°, а дифузори, крім того, ще й кут 20°.

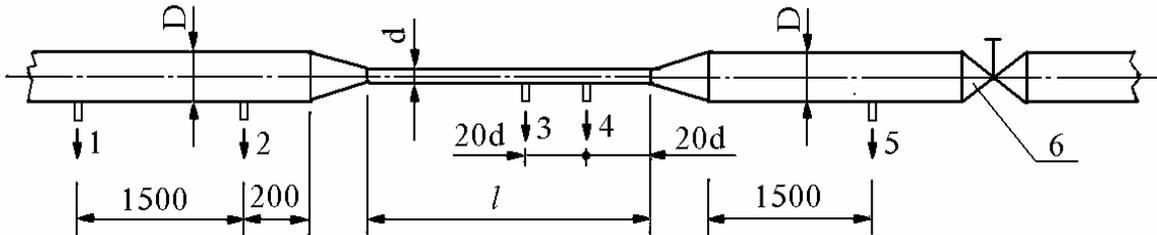


Рис.1. Схема експериментального трубопроводу:

1-5 – штуцери для відбору тисків; 6 – вентиль (розміри наведено в мм) [5]

Як добавки до води використовували технічний гель поліакриламід (ПАА) з 8 % основної речовини за масою (ТУ 6-01-1049-81). Зменшення місцевих втрат тиску виявлено в дифузорах при малих ( $\alpha_d \leq 20^\circ$ ) кутах конусності [5] (рис.2,а,б), коли втрати тертя переважали над втратами на опір форми (тиску), становлячи значну частку загального опору [6]. Це відбувалося при концентрації С розчину ПАА, яка не перевищувала 35 ppm. Зроблений висновок узгоджується з результатами [7], де при течії розчинів гуарової смоли J2-EP концентрацією 300 ppm і поліоксietилену (ПОЕ) Polyox WSR-301 концентраціями 30, 100, 300 ppm крізь безвідривний дифузор з кутом розкриття  $\alpha_d / 2 = 4^\circ$  та довжиною 250 мм при діаметрах  $d=3$  мм і  $D=10$  мм порівняно з течією води отримано максимальне зменшення втрат напору ~8 та 12 % відповідно.

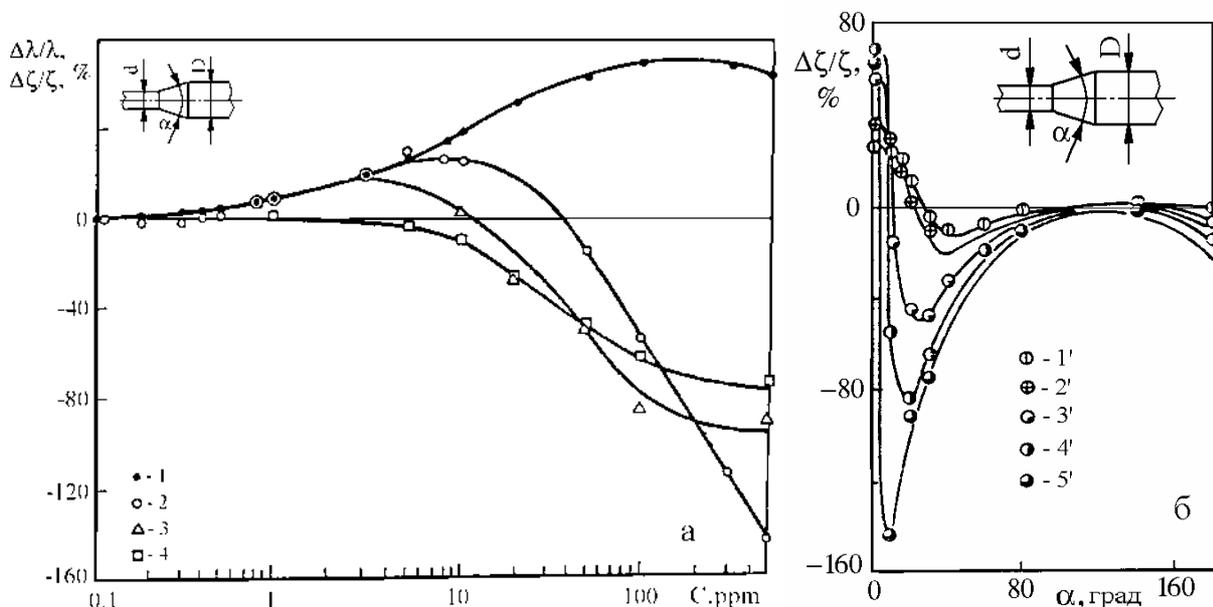


Рис.2. Залежність відносної зміни коефіцієнта опору дифузора від концентрації водного розчину ПАА при різних кутах конусності  $\alpha$ , град (а):

0 – (1); 10 – (2); 20 – (3); 30 – (4) [3]

і від кута конусності при різних концентрації С, ppm, водного розчину ПАА (б): 5 – (1'); 10 – (2'); 50 – (3'); 100 – (4'); 500 – (5') [5]. ( $D=20,95$  мм,  $d=5,81$  мм;  $Re_d=4 \times 10^4$ )

На рис.2,а,б величина  $\Delta\zeta/\zeta$  – відносна зміна коефіцієнта місцевого опору, викликана введенням у потік рідини ГДАД,

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

де w, p – індекси, що відповідають течії води та розчину полімера.

Величина  $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\zeta/\zeta|_{\alpha_d=0}$  відповідає течії в циліндричній трубці діаметром d (рис.2,а). У дифузорних течіях полімерні добавки забезпечують значніше зменшення опору, ніж у циліндричних трубах [3], оскільки опір тертя в перших становить тільки частку від загального опору (наприклад, для дифузора з кутом розкриття  $\alpha_d/2=4^\circ$  і довжиною 250 мм при діаметрах d=3 мм і D=10 мм втрати на тертя дорівнюють ~25 % від загальних втрат [7]). При цьому максимальне значення  $\Delta\zeta/\zeta$  не перевищувало відповідне значення  $\Delta\lambda/\lambda$ . При кутах конусності  $\alpha_d = 100\dots 140^\circ$  (рис.2,б) дифузори найменш підлягають впливу полімерних додатків [5]. Поява конфузорності течії знижує ефект, що зменшується зі збільшенням кута конусності аж до повної відсутності; з подальшим збільшенням конфузорності відбувається зростання опору. Але зменшення опору конфузора додатками слід очікувати при кутах конусності, близьких до нуля [4]. Це не протирічить тому, що при течії розчинів гуарової смоли J2-FP концентрацією 300 ppm і ПОЕ Polyox WSR-301 концентраціями 30, 100, 300 ppm крізь безвіддільний конфузор з кутом розкриття  $\alpha_d/2=4^\circ$  та довжиною 250 мм при діаметрах D = 10 мм і d = 3 мм вплив на потік відсутній порівняно з течією води [7]. Проте у [8] одержано зменшення опору конфузора  $\bar{K}_{\max} = 20\%$  з кутом конусності  $40^\circ 20'$  (довжина 22 мм при діаметрах D = 20 мм і d = 8 мм) при протіканні через нього водного розчину ПЕО WSR-301 з концентрацією C = 30 ppm (рис.3, крива 2).

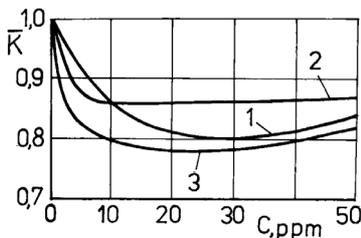


Рис.3. Залежність відносного коефіцієнта опору від концентрації водного розчину ПЕО: 1 – конфузор ( $Re_d=6000\dots 21200$ ); 2 – раптове звуження; 3 – раптове розширення ( $Re_d=5300\dots 15600$ ). Усі криві побудовано за точками, що відповідають масовим концентраціям C=0; 2; 5; 10; 20; 30; 50 ppm [8]

Величина  $\bar{K}$  – відношення коефіцієнтів опору відповідно для полімерного розчину  $K_p$  та води  $K_w$ , визначені за швидкістю  $V_d$ , яка обчислена для труби діаметром d:

$$\bar{K} = K_p / K_w, \quad (2)$$

$K_i$  – коефіцієнт опору,

$$K_i = \frac{\Delta p}{\rho_w V_d^2 / 2} \pm 1, \quad (3)$$

де  $\Delta p$  – перепад тиску на місцевому опорі;  $\rho_w$  – питома маса води.

У формулі (3) знак "+" відповідає конфузору та раптовому звуженню труби, знак "-" – раптовому розширенню труби.

Протиріччя результатів [4] і [8] можна пояснити похибкою вимірювань у [8], яка становила 10...12 %.

Крім того, у вищезгаданих течіях існують такі особливості. У конфузорах при  $C \geq 100$  ppm [4] спостерігалось явище гістерезису, коли одному значенню числа Рейнольдса відповідають два різні значення коефіцієнта опору. У дифузори з кутом конусності  $\alpha = 20^\circ$  спостерігалася пульсуюча течія [9] при  $C = 50$  ppm.

Досліджували також раптові звуження та раптові розширення труб як частинні випадки відповідно конфузорів і дифузорів з кутами конусності  $180^\circ$ .

Досліджуючи течію водного розчину гуарової смоли концентраціями 100, 200, 300, 400 і 500 ppm та звичайну водопровідну воду через раптові звуження труб від 1,25" до 1,0" і від 1,25" до 0,5", показано [10], що коефіцієнт втрат напору зменшується з числом Рейнольдса і, переважно, не залежить від концентрації.

Експерименти з раптовою зміною перерізу (стиснення та розширення) здійснено з використанням ПЕО WSR-301 [8]. У таблиці (п.1) наведено відповідні ступені деформації потоку  $m$  і  $n$ , а на рис.3 (криві 1,3) показано результати досліджень. При раптовому звуженні труби було досягнуто зменшення опору  $\bar{K}_{\max} = 14\%$  при  $C=5$  ppm (рис.3, крива 1), яке мало відрізнялося від похибки вимірювань 10...12 %. Для раптового розширення труби величина  $\bar{K}_{\max} = 22\%$  при  $C=20$  ppm (рис.3, крива 3).

#### Значення ступенів стиснення та розширення потоків досліджених раптових звужень і раптових розширень труб

№ п/п	Діаметр труби, мм		Ступінь стиснення потоку $m=d^2/D^2$	Ступінь розширення потоку $n=d^2/D^2$	Література
	d	D			
1.	10,0	19,0	0,277	3,610	[14]
2.	5,36	13,97	—	6,793	[16]
3.	8,58	15,08	—	3,089	
4.	5,81	20,95	0,077	13,002	[11,12,17,18]
5.	10,68		0,260	3,848	
6.	15,64		0,557	1,794	
7.	5,72	15,82	0,131	—	[19]
8.		12,82	—	5,023	

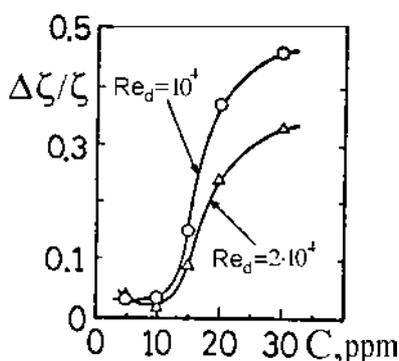


Рис.4. Залежність відносної зміни коефіцієнта опору раптового розширення труби від концентрації водного розчину ПАА при  $n=3,089$  [11]

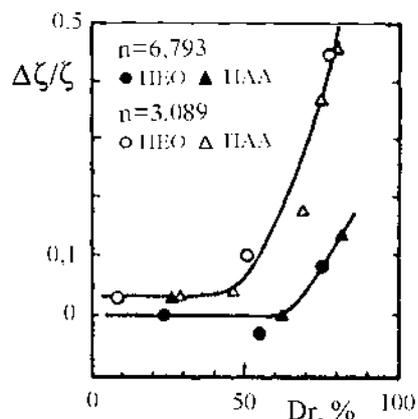


Рис.5. Зв'язок між величинами відносної зміни коефіцієнта опору  $\Delta\zeta/\zeta$  і зменшенням опору  $Dr$  [11]

В [11] при течії водних розчинів ПЕО Alkoh E-130 з молекулярною масою  $M_w=(3,5...4,0)\times 10^6$  та ПАА Separan AP-30 досліджено раптове розширення потоку, значення ступенів  $n$  для яких наведено в таблиці (п.2,3). Будувалася залежність  $\Delta\zeta/\zeta = f(C)$  – рис.4, а також залежність типу  $\Delta\zeta/\zeta = f(Dr)$  – рис.5.

На рис.5:  $Dr$  – можливе зменшення опору, що обчислене за числом Рейнольдса  $Re_d=10^4$ , визначеному в трубі діаметром  $d$ ,

$$Dr = \frac{\lambda_T - \lambda_P}{\lambda_T - \lambda_L}, \quad (4)$$

де  $\lambda_T, \lambda_L$  – відповідно коефіцієнти гідравлічного тертя для води при турбулентному та ламінарному режимах руху:

$$\lambda_T = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (5)$$

$$\lambda_L = \frac{64}{Re}. \quad (6)$$

На експериментальному трубопроводі (рис.1) при течії водних розчинів ПАА (ТУ 6-01-1049-81) було досліджено раптові звуження та раптові розширення труб при  $D=20,95\text{мм}=\text{const}$ ;  $d=\text{var}$  [4,5,12,13] (див. таблицю, пп.4–6), а в [14] – при  $D=\text{var}$ ;  $d=5,81\text{мм}=\text{const}$  (див. таблицю, пп.7,8). Залежності зміни опору при течії розчину полімера в місцевих опорах показано на рис.6.

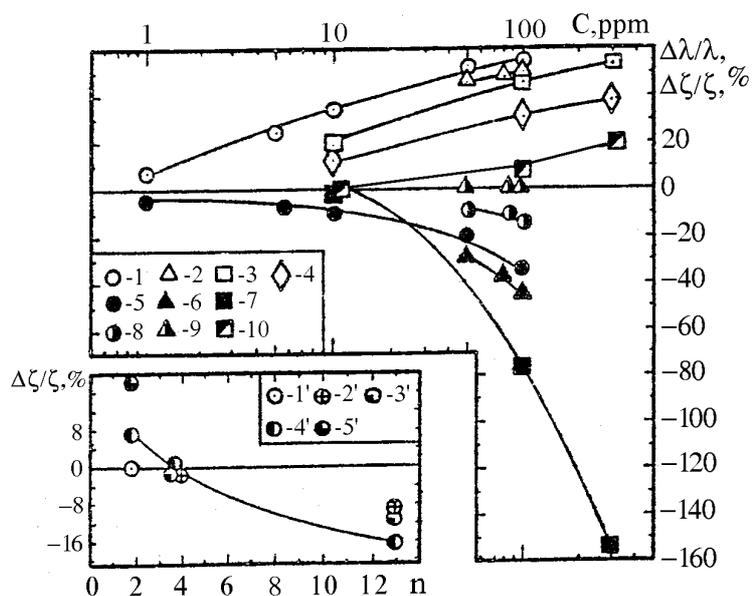


Рис.6. Зміна відносних значень коефіцієнтів: 1-4 – гідравлічного тертя відповідно для труб з  $d=5,81; 10,68; 15,64; 20,95$  мм; 5,6,7 – опорів раптових звужень труб при ступенях  $m=0,077; 0,260; 0,557$  відповідно; 8,9,10 – залежність від концентрації  $C$  додатків ПАА при  $Re_d=3 \times 10^4$  коефіцієнтів раптових розширень труб при ступенях  $n=13,002; 3,848; 1,794$  відповідно; 1',2',3',4',5' – залежність коефіцієнтів раптового розширення труб від ступенів  $n$  розширення потоку при  $D=20,95$  мм ( $Re_d=3 \times 10^4$ ) і таких  $C=10, 50, 80, 100, 300$  ppm [13].

Зменшення місцевих втрат тиску виявлено, як і в дифузорах, при малих ступенях розширення потоку [5,11,13,14]. Причому, як показано в [11], значення коефіцієнта втрат тиску при раптовому розширенні зменшується тоді, коли ефект зменшення турбулентного опору тертя, що мав місце до місцевого опору, відновлюється на нижче розташованій за течією частині труби. При цьому довжина ділянки відновлення тиску після раптового розширення збільшується.

Трубки періодичного змінного перерізу (ТПЗП) можна представити [15] як циліндричні трубки з дуже великою шорсткістю. Але їх також можна розглядати як послідовність рівновіддалених раптових звужень і раптових розширень. ТПЗП являла собою почергове з'єднання патрубків діаметрами  $d$  та  $2,5d$  з довжиною кожного  $2,5d$  і мала

40 періодів звуження-розширення: її довжина приблизно становила  $200d$ . Застосовували трубки з діаметрами  $d=0,8; 1,85; 4,15$  мм. Використовуючи водні розчини ПОЕ Polyox WSR-301 (Union Carbide Corp.) із середньою молекулярною масою  $7,73 \times 10^6$  в діапазоні зміни концентрацій  $5 \dots 200$  ppm, одержано тільки збільшення опору, що сягало навіть 20 разів порівняно з водою. Крім того, у ТПЗП спостерігалось явище гістерезису. Ефект, одержаний в ТПЗП, й ефект Томса відповідають режиму інерційно-пружної турбулентності, але проявляють себе з різними знаками щодо впливу на опір [15].

У гідродинаміці відомий факт, що запірні та регульовальні пристрої трубопроводів діють як діафрагми [16]. До того ж, втрати тиску в діафрагмах включають втрати на звуження з наступним розширенням потоку, де частка останніх переважає.

Для діафрагм з кромками, симетрично загостреними під кутом  $45^\circ$ , і діаметром  $d = 4,3; 6,2; 8; 12; 16$  мм, встановлених у трубі діаметром  $D = 21,5$  мм, при течії гуарової смоли з концентраціями 300 і 900 ppm показано [17], що при ступенях розширення потоку  $n \leq 3,21$  додатки викликають зменшення опору; причому чим більша концентрація та менший ступінь  $n$ , тим більший ефект. При більших значеннях  $n$  зменшення не спостерігалось, а при  $n = 25$  одержано збільшення опору діафрагм. Перевірка діафрагми з  $n = 25$  на розчині ПОЕ Polyox WSR-301 концентрацією 300 ppm дає ефект, близький до нуля. Під час протікання розчину ПАА з концентрацією  $C = 300$  ppm через діафрагми з  $d = 5,9; 7,0; 8,1$  мм, що встановлені у трубі з  $D = 10,5$  мм ( $n \leq 3,17$ ), спостерігалось зменшення опору [18]; причому чим менше значення  $n$ , тим більший ефект. При дослідженні діафрагми з діаметром 15,95 мм, встановленій в трубі діаметром 20,95 мм ( $n = 1,725$ ), на відміну від ПАА з  $C = 500$  ppm, додатки ПЕО завдяки більшій молекулярній масі зменшили опір при  $C = 30$  і 100 ppm [19]. Останні результати узгоджуються з [20], коли для одержання порівняного ефекту концентрація штучно синтезованого полімеру має бути на порядок меншою, ніж природного (гуарова смола [17]). У [21] порівняно з чистою дистильованою водою не виявлено впливу дистильованої води, загущеної співполімером акрилової кислоти й алілових ефірів пентеритриту, при проходженні через встановлені на каліброваній трубці ( $D = 1,9$  мм) діафрагми з  $n = 4,0; 6,25; 11,11; 25,0$ .

При рециркуляції розчину ПАА з концентрацією 500 ppm у трубопроводі діаметром  $D = 68$  мм з раптовими звуженнями труби до 50 і 21 мм та раптовими розширеннями труби від 21 і 50 мм, а також діафрагмами з діаметрами 13,6; 17,2; 20,0; 29,1; 37,7; 47,4; 58,5 мм, встановленими в трубопроводі з  $D = 68$  мм, одержано незначне (до 7%) збільшення опору [22], значення якого знаходилося в межах похибки експерименту.

Зменшення опору, послаблюючись або зникаючи чи набуваючи від'ємного значення при течії потоку з ГДАД через місцевий опір (зокрема, звуження труби [23]), відновлюється на нижче розташованій ділянці труби незалежно від типу додатків [24]. Відновлення відбувається на тим довшій ділянці труби, де більше значення гранично досяжного зменшення опору, можливого за даних значень молекулярної маси, концентрації розчину, ступенів його механічної деструкції та часової деградації, числа Рейнольдса. Наприклад, для розчину ПЕО, що є ефективніший, ніж розчин ПАА тієї ж концентрації, відновлення ефекту Томса відбувається на більшій віддалі від місцевого опору. Довжина ділянки відновлення зменшується зі зменшенням деформації потоку на місцевому опорі: після конфузора вона менша, ніж після раптового звуження труби за тих самих значень діаметрів та інших рівних умов [23,24].

У жодній праці, крім [17], не пояснено механізм дії полімерних додатків на втрати тиску в місцевих опорах трубопроводів. Тільки в [17] зазначено, що одержані результати можуть бути певною мірою зведено до одночасного прояву двох тенденцій: з одного боку, до зменшення рівня турбулентності в потоці до місцевого опору, з іншого боку – до збільшення цього рівня в обмеженому струмені, що утворюється в місцевому опорі при відриві основної течії від стінок, які його обмежують. При цьому робиться припущення, що переважання першої чи другої тенденції може визначити не тільки величину, але й знак впливу полімерних додатків на величину втрат тиску в місцевому опорі. Для перевірки цієї гіпотези необхідно провести систематичні дослідження. Рух рідин з додатками полімерів у конфузорах і дифузорах та крізь діафрагми було досліджено в більшому обсязі, ніж на раптових звуженнях і раптових розширеннях труб. Тому експерименти для цих місцевих опорів необхідно провести при  $D=\text{var}$ ;  $d=\text{const}$  (з діаметрами, меншими за 20...35 мм, коли ще проявляється істотний вплив на втрати напору в них [1]). Це дозволить одержати розрахункові залежності.

1. Гнатив Р.М., Чернюк В.В. Влияние полимерных добавок на местные потери напора в трубопроводах // *Вестн Львов. политехн. ин-та.* – 1989. – № 237. – С.17-20. 2. Жук В.М., Чернюк В.В. Течія рідин із гідродинамічно активними добавками крізь місцеві опори // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1994. – № 282. – С.27-30. 3. Повх И.Л., Чернюк В.В. Влияние добавок на потери давления при конфузурных и диффузурных течениях // *Научные основы турбулентных явлений / РАН. Отд. мех.-мат. методов в технол. и экон. разраб. при Президиуме РАН.* – М., 1992. – С.138-140. 4. Повх И.Л., Чернюк В.В. Сопротивление конфузоров при турбулентном течении воды с добавками полиакриламида // *ИФЖ.* – 1989. – Т.57. – № 5. – С.709-712. 5. Повх И.Л., Чернюк В.В. Экспериментальное исследование влияния добавок полиакриламида на сопротивление диффузоров // *ИФЖ.* – 1986. – Т.51. – № 3. – С.357-361. 6. Повх И.Л. Зменшення турбулентного тертя – основне джерело економії енергії // *Вісн. АН УРСР.* – 1982. – № 11. – С.66-74. 7. Липатов Б.В. Влияние снижающих сопротивление трения полимерных добавок на течение в плавно сужающихся и расширяющихся каналах // *Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа.* – 1974. – № 2. – С.153-156. 8. Амфилохий В.Б. Некоторые гидравлические сопротивления при течении растворов полиэтиленоксида // *Тр. Ленингр. кораблестроит. ин-та.* – 1974. – Вып.89. – С.7-11. 9. Чернюк В.В. Пульсуюча течія води з добавками поліакриламідом крізь дифузори // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1994. – № 282. – С.75-78. 10. Pisolkar V.G. Effect of Drag Reducing Additives on Pressure Loss across Transition // *Nature.* – 1970. – Vol.225. – № 5236. – P.936-937. 11. Tachibana Motoyoshi, Kita Masakazu. On the Flow in a Circular Section Tube and the Loss due to a Sudden Enlargement (Effects of Drag Reducing Additives) // *Bull. JSME.* – Sept. 1978. – Vol.21. – № 159. – P.1341-1348. 12. Чернюк В.В., Левицкий Б.Ф. О влиянии добавок полиакриламида на значение коэффициентов местных сопротивлений внезапных сужений и расширений труб // *Вестн. Львов. политехн. ин-та.* – 1983. – № 174. – С.153-157. 13. Чернюк В.В., Левицкий Б.Ф. О влиянии добавок полиакриламида на сопротивление внезапных сужений и расширений труб // *Вестн. Львов. политехн. ин-та.* – 1984. – № 184. – С.123-126. 14. Піцишин Б.С., Регузи А.Я. Вплив додатків поліакриламідом на втрати напору в раптових звуженнях і розширеннях труб // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1995. – № 291. – С.44-47. 15. Калашников В.Н. Течение растворов полимеров по трубкам с переменным сечением. – М., 1980. (Препринт / ИПМ АН СССР; № 164). 16. Елин Н.Н., Васильев С.В. Потери

давления в местных сопротивлениях при движении двухфазных смесей // ИФЖ. – 1985. – Т. XLIX. – № 4. – С.681-682. 17. 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. 18. Shima Nobuyuki. Loss and Discharge Characteristics of a Flow of Polymer Solution through Pipe Orifices // Bull. JSME. – March 1984. – Vol.27. – № 225. – P.443-449. 19. Чернюк В.В. О сопротивлении диафрагм при турбулентном течении полимерных растворов // Вестн Львов. политехн. ин-та. – 1986. – № 208. – С.79-82. 20. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С.23-33. 21. Девислов В.А., Белов С.В. Гидравлическое сопротивление диафрагм при течении неньютоновских жидкостей // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1979. – № 6. – С.19-20. 22. Левицкий Б.Ф., Чернюк В.В. Местные сопротивления при многократной перекачке слабokonцентрированных водных растворов полиакриламида // Вестн Львов. политехн. ин-та. – 1982. – № 160. – С.40-45. 23. Чернюк В.В., Пасичнюк А.С., Гнатив Р.М. Восстановление эффекта Томса на участке трубы после сужения // Гидравлика и гидротехника. – 1991. – Вып.52. – С.77-86. 24. Чернюк В.В. Восстановление эффекта Томса на участке трубы после местного сопротивления. – Львов, 1988. – Деп. в УкрНИИИНТИ 09.09.88, – № 2301.