

УДК 532.517.4:532.135:532.555.2

В.В. Чернюк, д-р техн. наук,

В.І. Орел, канд. техн. наук,

Б.С. Піцишин

Національний університет “Львівська політехніка”

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНО АКТИВНИХ ДОДАТКІВ НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР РАПТОВИХ ЗВУЖЕНЬ ТРУБ

Добавки высокомолекулярных соединений (полиакриламида и полиоксидэтилена) и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (метаупона и диталана OTS) оказывают существенное влияние на гидравлическое сопротивление внезапных сужений труб. Добавки полиакриламида увеличивают сопротивление внезапных сужений труб до трёх раз при значениях $m = (d/D)^2 < 0,7$ и уменьшают его при значениях m , близких к единице, где D и d — диаметры трубы соответственно до и после сужения. Снижение сопротивления внезапного сужения трубы не превышает снижения сопротивления цилиндрических труб, образующих это сужение. Значение коэффициента местного сопротивления зависит от типа гидродинамически активных добавок и от значений их концентрации в потоке, диаметров труб, критерия Рейнольдса. Действия полимеров и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ качественно одинаковы.

Additives of high-molecular compounds (polyacrilamide, polyoxidethylene) and those of micelle-forming surface-active substances (metaupone and OTS ditalane) offer essential influence upon hydraulic resistance of abrupt contraction of pipes. The additives of polyacrilamide heighten the resistance up to three times at the values $m = (d/D)^2$ of < 0.7 , and they reduce the resistance at the values of m closed to unity, where D and d are the diameters of the pipe before and after the contraction respectively. The reduction of the resistance of abrupt contractions of a pipe does not exceed the reduction of the resistance of cylindrical pipes which make up this contraction. The value of the coefficient of local resistance depends on the type of hydrodynamic active additives and also on the values of their concentration in the stream, diameters of the pipes, Reynolds' criterion. The actions of polymers and micelle-forming surface-active substances are qualitatively identical.

Постановка задачі

Енергетична криза спонукала людство до пошуку технологій з малими витратами енергії. Суттєва її економія досягається зменшенням гідродинамічного опору та застосуванням енергоощадних засобів для керування напірними потоками рідин. Обидві задачі успішно вирішуються введенням у потік рідини мізерних кількостей *гідродинамічно активних додатків* (ГДАД). Послаблюючи турбулентне тертя у циліндричних трубах, ГДАД здатні багаторазово збільшувати опір форми в трубах змінного перерізу. Цю особливість ГДАД застосовано до розробки енергоощадних засобів керування напірними потоками рідин [1–3]. Виконавчими елементами цих пристроїв є місцеві гідравлічні опори. Найефективнішими з них є трубки періодичного змінного перерізу, утворені послідовно з'єднаними раптовими звуженнями та раптовими розширеннями труб з діаметрами патрубків в межах 0,8–10 [4].

Дослідження впливу ГДАД на місцеві гідравлічні втрати напору має також практичне значення при розрахунках трубопровідних систем, які транспортують рідини з ГДАД. Теоретичне пояснення дії ГДАД потребує поглибленого вивчення їх впливу на місцеві втрати напору, зокрема у раптових звуженнях труб.

Мета роботи — дослідити вплив ГДАД на гідравлічний опір раптових звужень труб.

Аналіз проблеми

На основі аналізу літературних даних та результатів власних досліджень [5–7], ми дійшли таких висновків. Найефективнішими ГДАД у магістральних трубопроводах є високомолекулярні сполуки з ланцюжковою будовою молекул, такі як *поліоксидетилен* (ПОЕ) та *поліакриламід* (ПАА). У системах з циркуляцією рідини доцільно застосовувати міцелотворні *поверхнево-активні речовини* (МПАР), оскільки вони не піддаються незворотній механічній деструкції. Найпоширенішими МПАР є метаупон і диталан. Вплив ГДАД на місцеві втрати напору в трубах посилюється зі зростанням молекулярної маси полімерів і МПАР, їхньої концентрації в потоці, а також зі зменшенням діаметрів трубопроводів. Істотна зміна опору проявляється при діаметрах труб, менших, ніж 21 мм. Коли вони близькі до 35 мм, то вплив додатків незначний, а при діаметрах, що дорівнюють 50 мм і більших — відсутній [7]. У цій статті узагальнено попередні роботи [8–15].

Методика досліджень

У досліді використовувались водні розчини таких ГДАД:

а) *високомолекулярні сполуки з ланцюжковою будовою молекул:*

— *поліакриламід* (ПАА) — технічний гель з концентрацією, близькою до 8 %, ТУ 6-01-1049-81, виробляється Калуським ВО “Хлорвініл” (тепер ВАТ “Оріана”);

— *Polyox Coagulant* (ПОЕ) — порошок з молекулярною масою біля $6,5 \cdot 10^6$, американської компанії “Union Carbide”;

б) МПАР:

— *метапон* — промислова паста Metaupon OMT-Paste, konz 2, виробляється у Німеччині підприємством “Walter Ulbricht”;

— *диталан* — промислова паста Ditalan OTS-45 того самого виробника.

Розрахунком визначалась маса чистої речовини ПАА у технічному гелі, що потрібна для отримання заданого об’єму водного розчину полімеру необхідної масової концентрації. Розрахунок концентрації водного розчину ПЕО, що готувався, проводили за масою його порошку. Масові концентрації водних розчинів МПАР, які готувались для дослідів, обчислювали за фактичною наявністю МПАР у їхніх пастах за вирахуванням вмісту води. МПАР проявляють свою гідродинамічну активність лише за наявності у розчині електроліту, для чого застосовували кухонну сіль.

Порядок приготування розчинів ГДАД докладно описаний у роботі [9].

З метою усунення впливу механічної деструкції макромолекул полімерів на результати досліджень подачу полімерних розчинів на експериментальний трубопровід здійснювали самопливом під дією сил гравітації. Застосовано дослідний стенд витиснювально-циркуляційного типу, схему якого подано в роботах [9, 12]. Експериментальний трубопровід зображено на рисунку 1.

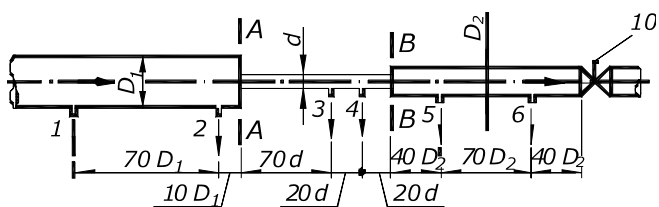


Рисунок 1 — Схема експериментального трубопровода для досліджень раптових звужень і раптових розширень труб: 1-6 — штуцери для приєднання п’єзометрів; 10 — вентиль; А-А і В-В — площини стику торців труб різних діаметрів.

Досліджено дві серії раптових звужень труб, змонтованих за схемою, що показано на рисунку 2, зі змінних секцій сталевих нержавійних труб. У першій серії внутрішній діаметр $D_1 = 20,95 \text{ мм} = \text{const}$, а діаметр d змінювався в межах 3,91–15,72 мм. У другій — $d = 5,81 \text{ мм} = \text{const}$, а $D_1 = 8,21\text{--}50,20 \text{ мм}$ (табл. 1).

Гідрравлічний коефіцієнт тертя λ визначали з формули Дарсі-Вайсбаха для ділянки 3–4 (рисунку 1).

$$\lambda_d = \frac{\Delta h_{3-4}}{(l_{3-4}/d) \cdot (v_d^2/2g)} \quad (1)$$

Коефіцієнт опору раптового звуження труби $\zeta_{p,3}$ вираховували за формулою Вайсбаха

$$\zeta_{p,3} = \frac{h_{p,3}}{v_d^2/2g} \quad (2)$$

де $h_{p,3}$ — втрати напору на мірній ділянці 2–3 експериментального трубопроводу, викликані наявністю раптового звуження труби. Значення величин $h_{p,3}$ одержували відніманням втрат напору на гідрравлічне тертя від загальних втрат Δh_{2-3} на мірній ділянці 2–3 трубопроводу (рисунку 1), що містить місцевий опір:

$$h_{p,3} = \Delta h_{2-3} - \Delta h_{1-2} \frac{l_{2-4}}{l_{1-2}} - \Delta h_{3-4} \frac{l_{4-3}}{l_{3-4}} + \frac{\alpha_{D_1} v_{D_1}^2}{2g} - \frac{\alpha_d v_d^2}{2g} \quad (3)$$

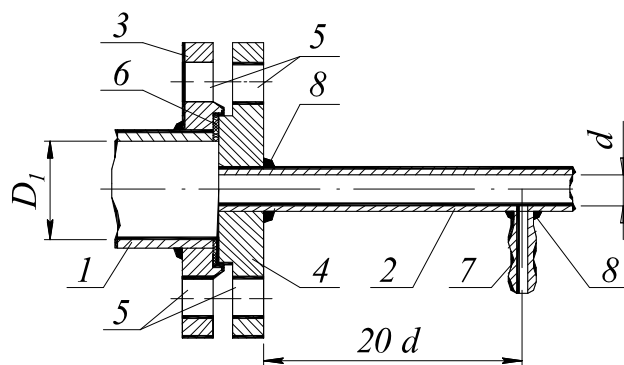


Рисунок 2 — Конструкція досліджених раптових звужень труб: 1 — труба з внутрішнім діаметром D_1 ; 2 — те саме, d ; 3 — фланець із впадиною; 4 — фланець з виступом; 5 — отвори для з’єднувальних болтів; 6 — гумова прокладка; 7 — штуцер для під’єднання імпульсної трубки від п’єзометра; 8 — зварне з’єднання.

Таблиця 1
Досліджені раптові звуження труб

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь звуження потоку, $m = (d/D_1)^2$	Використане джерело
	d	D_1		
Серія перша, $D_1 = \text{const}$				
1	3,91	20,95	0,035	[14]
2	5,81		0,077	[8]
3	8,21		0,154	[14]
4	10,68		0,260	[8]
5	15,64		0,557	[8]
6	15,72		0,563	[14]
Серія друга, $d = \text{const}$				
1	5,72	12,82	0,199	[11]
2		15,82	0,131	[11]
1	5,81	8,21	0,501	[14]
2		10,68	0,296	[14]
3		15,72	0,137	[14]
4		25,01	0,054	[14]
5		33,42	0,030	[14]

Гідродинамічну ефективність розчинів ГДАД контролювали за їх впливом на гідравлічний опір ділянки 3–4 труби діаметром d (рисунок 1) і визначали її як відносну зміну коефіцієнта Дарсі за формулою

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_w - \lambda_s}{\lambda_w} = 1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_w}, \quad (4)$$

де λ_w, λ_s — гідравлічний коефіцієнт тертя для труби при течії через неї води та водного розчину ГДАД, відповідно, за однакових інших умов. Так само знаходилась відносна зміна коефіцієнта опору раптового звуження труби $\zeta_{p.3}$

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \frac{\zeta_w - \zeta_s}{\zeta_w} = 1 - \frac{\zeta_s}{\zeta_w}, \quad (5)$$

де ζ_w і ζ_s — коефіцієнти опору, відповідно, при течії води та водних розчинів ГДАД. Симплекси λ_s/λ_w та ζ_s/ζ_w характеризують ефективність ГДАД.

Ступінь звуження потоку в раптовому звуженні труби

$$m = \left(\frac{d}{D_1} \right)^2. \quad (6)$$

Критерій Рейнольдса для труби з діаметром d

$$Re_d = \frac{v_d d}{\nu}. \quad (7)$$

Побудовано графічні залежності: $\lambda = f(Re_d)$; $\zeta_{p.3} = f(Re_d)$; $\Delta\lambda/\lambda = f(C)$; $\Delta\zeta/\zeta = f(C)$; $\Delta\zeta/\zeta = f(m)$.

Коефіцієнт опору $\zeta_{p.3}$ визначали в непрямий спосіб за виразами (2) і (3) через дванадцять інших аргументів, значення яких встановлювали прямими вимірюваннями:

$$\zeta_{p.3} = f(D_1, d, h_1, h_2, h_3, h_4, l_{1-2}, l_{2-A}, l_{A-3}, l_{3-4}, t, W), \quad (8)$$

де h_1, \dots, h_4 — покази п'єзометрів відповідно у точках 1, ..., 4; $l_{1-2}, l_{2-A}, l_{3-4}$ — відповідно довжини ділянок трубопроводу 1-2, 2-A, 3-4 (рисунок 1); W — об'єм рідини, що надійшов у мірну посудину за час t (витрату рідини обчислювали об'ємним способом).

Загальна похибка встановлення значення коефіцієнта $\zeta_{p.3}$ визначається похибкою вимірювань кожного з дванадцяти аргументів, наведених у виразі (8). Сумарна відносна похибка визначення коефіцієнта $\zeta_{p.3}$ при $Re_d = 3 \cdot 10^4$ дорівнює 9,3 % і не виходить за межі, допустимі для інженерних розрахунків, тобто менша, ніж 10 %.

Результати досліджень

Раптове звуження труби є частинним випадком конфузора з кутом конусності $\alpha = 180^\circ$.

Зменшення ступеня звуження потоку m (6) у раптовому звуженні труби відповідає збільшенню різниці між значеннями діаметрів труб D_1 і d (рисунок 2), отже супроводжується зростанням деформації потоку.

Додатки поліакриламід до води викликали істотну зміну значення коефіцієнта опору раптового звуження

труби $\zeta_{p.3}$. Результати дослідів, отримані для другої серії раптових звужень труб з $d = const$, представлено на рисунку 3 залежностями $\zeta_{p.3} = f(Re_d, C)$ для трьох значень діаметра D : 33,42 (рисунок 3а), 25,01 (рисунок 3б) і 15,72 мм (рисунок 3в) і шести різних значень концентрацій водних розчинів ПАА ($C = 5 \cdot 10^{-6} - 10^{-3}$ кг/кг) в діапазоні значень критерію Рейнольдса від 10^3 до $3 \cdot 10^4$.

На графічних залежностях $\Delta\zeta/\zeta = f(m)$ (рисунок 4) і $\Delta\zeta/\zeta = f(C)$ (рисунок 5), показано узагальнені результати досліджень.

Значення коефіцієнта опору раптового звуження труби залежить від низки взаємопов'язаних факторів: типу ГДАД, їх концентрації в потоці, ступеня звуження потоку і діаметрів труб, критерію Рейнольдса. Вплив цих факторів розглянемо на прикладі потоків водних розчинів ПАА.

При зростанні значення $m = (d/D_1)^2$ від 0,030 (рисунок 3а) до 0,054 (рисунок 3б) і далі до 0,137 (рисунок 3в) абсциса стрибка переходу від ламінарного до турбулентного режимів течії для води і розчинів ПАА з концентраціями $C = 5 \cdot 10^{-6}$ і 10^{-5} кг/кг, переміщується у бік більших значень критерію Рейнольдса: відповідно $Re_d = 2,5 \cdot 10^3$ (рисунок 3а); $3,2 \cdot 10^3$ (рисунок 3б) і $4,2 \cdot 10^3$ (рисунок 3в). У роботі [16], наприклад, турбулентний перехід ізотермічної течії води в прямій горизонтальній трубі з раптовим звуженням потоку на вході відбувався при $Re_d = (2,07 - 2,84) \cdot 10^3$.

Оскільки зростання значення ступеня звуження потоку m відповідає послабленню деформації потоку то, як наслідок, ламінарний режим затягується до більших швидкостей течії. Для розчинів з концентрацією 10^{-5} кг/кг стрибки турбулентного переходу змістилися по осі абсцис вправо відносно кривих для води. При концентраціях $C = 10^{-4}$ та $5 \cdot 10^{-4}$ кг/кг турбулентний перехід є плавним (безстрибковим). Наприклад, порогова швидкість, при якій порушується стійкість течії полімерного розчину в плоских каналах, що різко звужуються, також зростає зі збільшенням значення ступеня звуження потоку [17].

Зі збільшенням m зростає також різниця найбільшого та найменшого значень коефіцієнта $\zeta_{p.3}$ на ординаті стрибка турбулентного переходу (рисунок 3).

Зі зменшенням деформації потоку, коли значення $m = (D_1/d)^2$ зростають, графічні залежності $\zeta_{p.3} = f(Re_d, C)$ ускладнюються, а початок ділянки незалежності коефіцієнта опору раптового звуження труби від критерію Рейнольдса зміщується у бік вищих значень останнього (рисунок 3). Для води і полімерних розчинів незалежність коефіцієнта $\zeta_{p.3}$ від критерію Re настає при практично однакових значеннях останнього.

На відомому графіку Нікурадзе $\lambda = f(\Delta, Re)$ для труб зі штучною шорсткістю [18, с. 161] зі зменшенням відносної шорсткості $\Delta = \Delta/d$ збільшується різниця значень гідравлічного коефіцієнта тертя λ при переході від ламінарного до турбулентного режиму течії. В ділянці квадратичного опору коефіцієнт не залежить від критерію Рейнольдса. Однак, при цьому на графіку Нікурадзе значення коефіцієнта Дарсі λ збільшуються, а на отриманих нами залежностях $\zeta_{p.3} = f(Re_d, C)$ при турбулентному переході значення коефіцієнта $\zeta_{p.3}$ зменшуються.

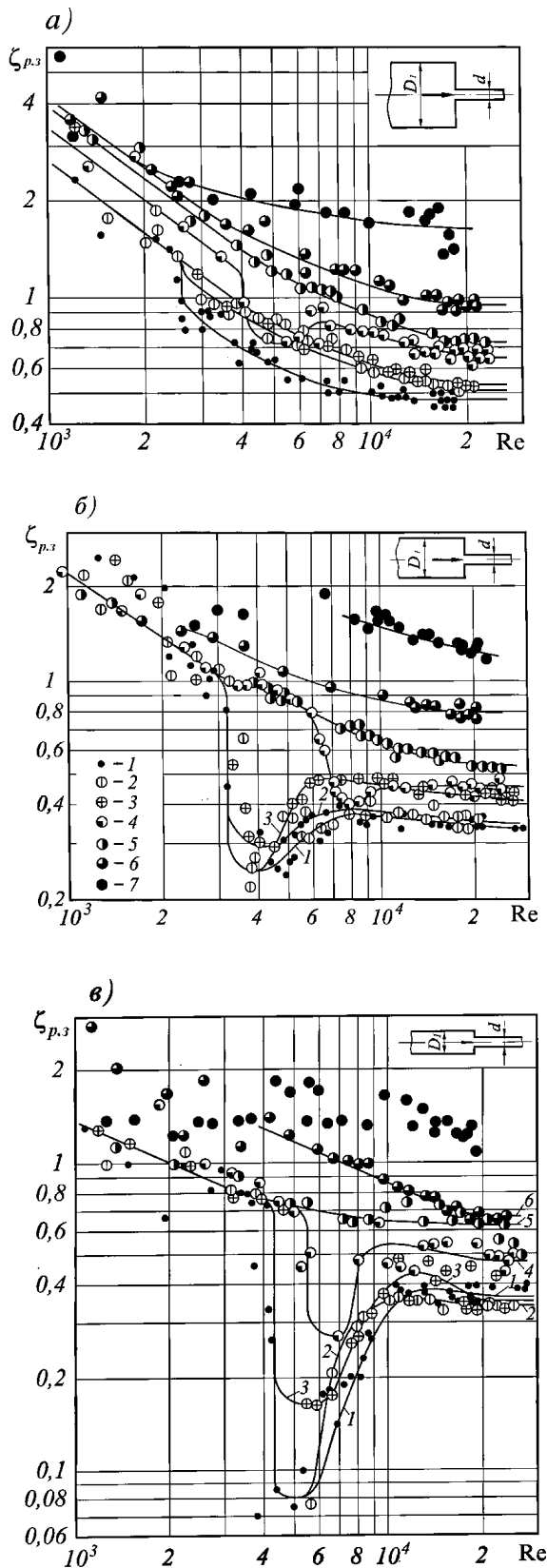


Рисунок 3 — Залежність $\zeta_{p,3} = f(Re_d, C)$ при різних значеннях ступеня звуження потоку m : 0,030 — (а); 0,054 — (б); 0,137 — (в), для течій води — (1) і водних розчинів ПАА з різними масовими концентраціями C в кг/кг: $5 \cdot 10^{-6}$ — (2); 10^{-5} — (3); $5 \cdot 10^{-5}$ — (4); 10^{-4} — (5); $5 \cdot 10^{-4}$ — (6); 10^{-3} — (7); діаметр $d = 5,81 \text{ мм} = \text{const}$

Додатки поліакриламідую збільшують опір раптових звужень труб до трьох разів при значеннях $m = (d/D_1)^2 < 0,7$ і зменшують його при значеннях m , близьких до одиниці. Послаблення опору раптового звуження труби не перевищує за значенням зменшення опору циліндричних труб, що утворюють це звуження.

Для турбулентних течій водних розчинів ПАА з масовими концентраціями $C \leq 10^{-4} \text{ кг/кг}$ при ступеню звуження потоку $m \leq 0,3$ значення $\Delta\zeta/\zeta$ не залежать від m (рисунок 4) так само, якби розчин ПАА входив із посудини великого живого перерізу ($D \gg d$) до труби з діаметром d .

Масову концентрацію водного розчину ПАА, що дорівнює 10^{-4} кг/кг , можна вважати оптимальною: C_{opt} . Збільшення її вдвічі до $C_{eff} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/кг}$, коли досягається найвищий ефект гідродинамічної дії ПАА, забезпечує зростання $\Delta\lambda/\lambda$ лише на (2–3)%. Подальше збільшення концентрації розчину супроводжується зменшенням значення до зростання опору труби порівняно з течією води без ГДАД.

При $m < 0,7$, коли значення $\Delta\zeta/\zeta$ є від'ємними, зі збільшенням концентрації розчинів ПАА $\Delta\zeta/\zeta$ зростають за модулем тим істотніше, чим вища концентрація додатків, тобто опір раптового звуження труби збільшується (рисунок 5).

При значеннях m , близьких до одиниці, і концентраціях ПАА в межах від 0 до $C_{opt} = 10^{-4} \text{ кг/кг}$ значення $\Delta\zeta/\zeta$ є додатними і зростають тим значніше, чим вища концентрація додатків. При $C > C_{eff}$ для $m = 0,8-1,0$ додатні значення $\Delta\zeta/\zeta$ зменшуються, тобто ефект гідродинамічної дії додатків послаблюється (рисунок 4).

Два фактори є визначальними при втраті стійкості потоку в раптових звуженнях труб. Це циркуляційні утворення в кутах перед перерізом 3–3 (рисунок 6) [19, 20] і пружно-в'язкі властивості полімерних розчинів [20]. Наявність у воді ГДАД сприяє збільшенню у напрямку проти течії розмірів вирів [21] і їхньої інтенсивності [17], які зростають зі збільшенням швидкості потоку [17, 21] та поздовжньої в'язкості [22]. Остання різко збільшується при течії полімерних розчинів з розтягненням [23], яке реалізується у звуженнях труб. Наприклад, безпосередньо за різким звуженням плоского каналу в потоках розчинів ПАА утворюються профілі швидкостей з максимумом на осі труби на відміну від течії води, для яких епора швидкості на цій ділянці прямолінійна [19].

При досягненні критичної швидкості стійкість потоку втрачається [21] і вири перед звуженням прямокутного каналу перетворюються на тривимірні [20]. Ділянка циркуляційної течії стає несиметричною та періодично змінною. Поблизу однієї стінки вона зростає, а протилежної — зменшується, потім навпаки. Це призводить до того, що основний потік при підході до місця звуження відхиляється то до однієї, то до іншої стінки. Швидкість зсуву, при якій виникає нестійкість, і період коливань залежать від в'язкопружних властивостей полімерних розчинів [21], що узгоджується з результатами наших експериментів. Саме реологічними параметрами рідин можна пояснити різні значення абсцис стрибків турбулентного переходу, чи відсутність останніх, при різних концентраціях розчинів ПАА.

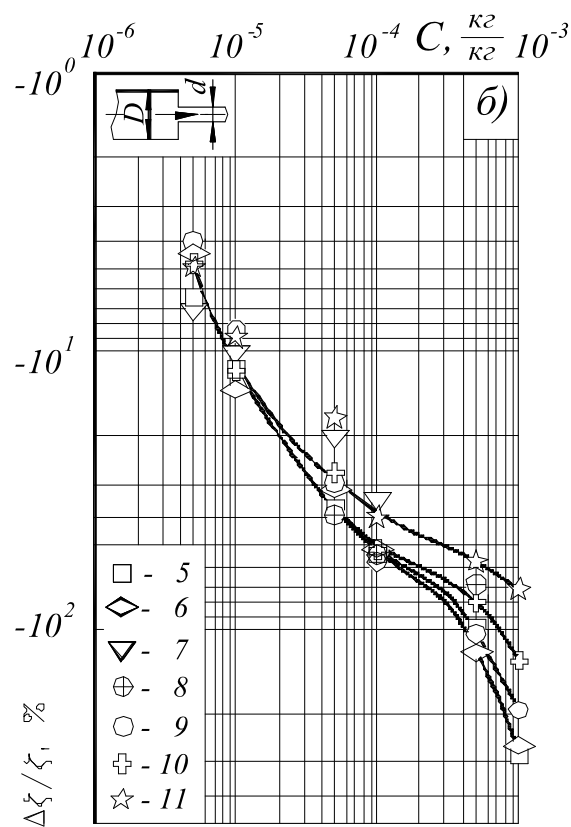
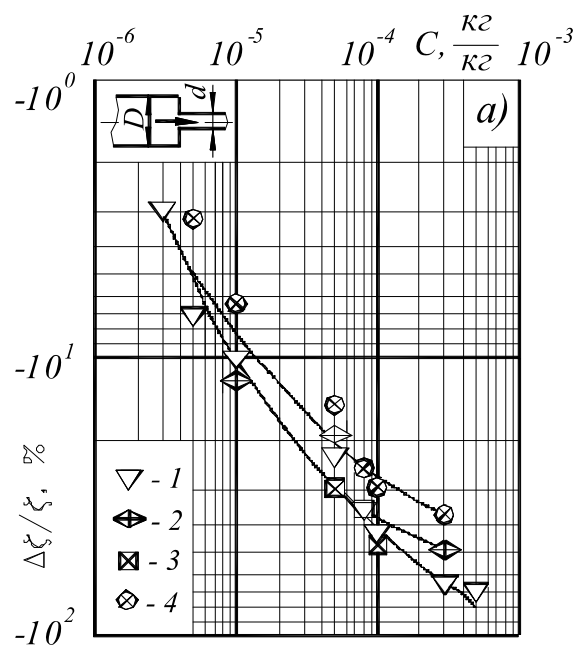
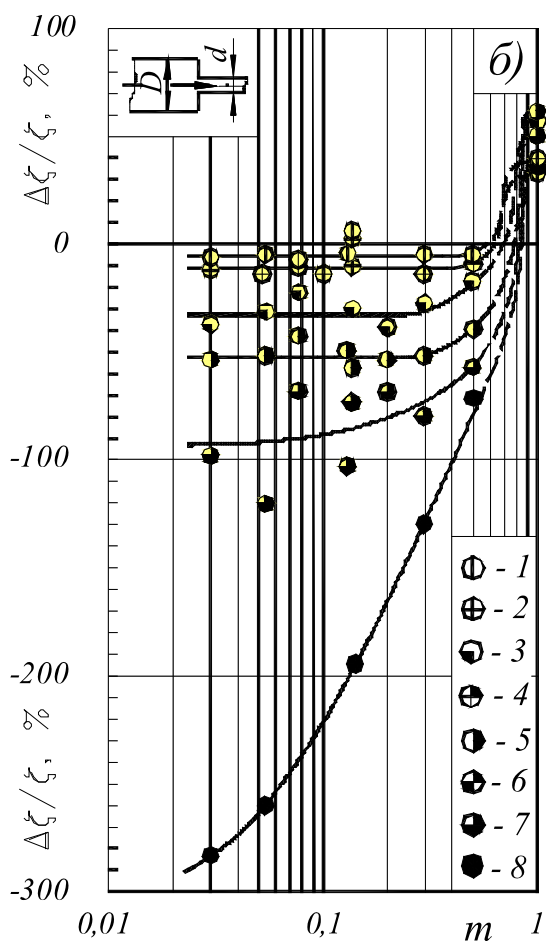
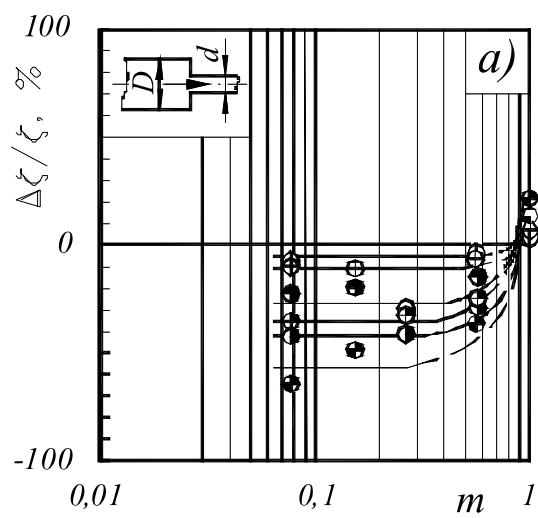


Рисунок 4 — Залежність $\Delta\zeta/\zeta = f(m)$ для:
 $D = 20,95 \text{ мм} = \text{const}$ при змінному d (а);
 $i d = 5,81 \text{ мм} = \text{const}$ при змінному D (б)
 при різних концентраціях C водного розчину ПАА
 в кг/кг: $5 \cdot 10^{-6}$ — (1); 10^{-5} — (2); $5 \cdot 10^{-5}$ — (3);
 $8 \cdot 10^{-5}$ — (4); 10^{-4} — (5); $3 \cdot 10^{-4}$ (6); $5 \cdot 10^{-4}$ —
 (7); 10^{-3} — (8); $Re_d = 20000$.

Рисунок 5 — Відносна зміна коефіцієнта опору
 раптового звуження труби $\Delta\zeta/\zeta$ залежно
 від концентрації C водного розчину ПАА при
 різних значеннях ступеня звуження потоку m
 для $D = 20,95 \text{ мм} = \text{const}$, d — змінне (а):
 $m = 0,077$ (1); $0,154$ (2); $0,260$ (3); $0,557$ (4) та
 для D — змінне,
 $d = 5,81 \text{ мм} = \text{const}$ (б): $m = 0,030$ (5); $0,054$
 (6); $0,077$ (7); $0,131$ (8); $0,137$ (9); $0,296$ (10);
 $0,501$ (11); $Re_d = 20000$.

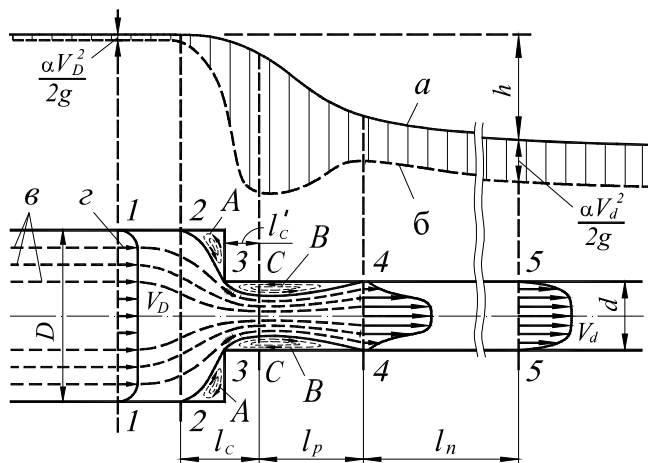


Рисунок 6 — Схема течії рідини крізь раптове звуження труби: А, В — кільцеві вихорі пояси; С-С — стиснений переріз; а — лінія повного напору; б — п'єзометрична лінія; в — лінії течії; г — еп'юри швидкостей; h — втрати напору; l_c , l_p , l_n — відповідно ділянки стиснення, розширення, перехідна; 1-1, ... ,5-5 — перерізи потоку [18] .

Збільшення концентрації C сприяє ламінаризації течії. В той же час з підвищенням в'язкості розчину зростають місцеві втрати енергії.

При течіях води через раптове звуження труби стиснений переріз потоку С-С утворюється приблизно на відстані $l_c = 0,5d$ після звуження труби (рисунок 6). Далі струмінь розширюється, будучи відділеним від стінок труби вихорим поясом. При течіях ньютонівських рідин місцева втрата напору в основному зосереджується у межах частини струменя, що розширюється [18].

За наявності у потоці ГДАД загальна втрата енергії у раптовому звуженні труби включає додаткові складові, що викликані низкою процесів:

- а) збільшення та інтенсифікація вихорів перед звуженим перерізом труби;
- б) розтягування полімерних молекул при вході до труби меншого діаметра, що супроводжується збільшенням поздовжньої в'язкості;
- в) комплекс явищ, які виникають на ділянці розширення затопленого струменя, ослаблених попереднім його звуженням;
- г) відновлення орієнтаційного ефекту полімерних макромолекул, порушеного на ділянці розширення струменя l_p , й посилення його, оскільки зі зменшення діаметра труби він стає повнішим при незмінній витраті рідини. Після раптового звуження труби від $D_1 = 20,95$ мм до $d = 5,81$ мм ефект Томса відновлюється на відстані від звуженого перерізу, що дорівнює (70–140), і більшій, залежно від критерію Рейнольдса, типу ГДАД і їх концентрації [24].

Якщо в місцевій втраті напору визначальним є опір форми (у наших дослідах при $m < 0,7$), то переважають сили, що супроводжують процеси групи а, б, з, і, як наслідок, загальні витрати енергії в потоці з ГДАД збільшуються. Коли ж переважає опір тертя (при $m > 0,7$), значення сил процесів групи а, б, з, послаблюється, і додатки викликають послаблення опору раптового звуження труби [5, 25, 26].

При однакових концентраціях водних розчинів ПАА і ПОЕ, останні спричиняють більше зростання коефіцієнта опору раптового звуження труби (рисунок 7). Розчини метаупону та диталану дещо зменшують підвищення втрат енергії у місцевому опорі, що розглядається, порівняно з додатками полімерів за таких самих значень критерія Рейнольдса ($Re_d = 20000$) (рисунок 8).

Розчини метаупону та диталану виявляють гідродинамічну активність лише за наявності електроліту, наприклад, кухонної солі. Оптимальна концентрація $NaCl$ у розчинах метаупону становить 3 %, а в розчинах диталану ОТС — 8 % [27]. Для запобігання втрати гідродинамічної активності, що спричиняється часовою деградацією, як це видно на рисунку 8, до розчину диталану додають стабілізатори.

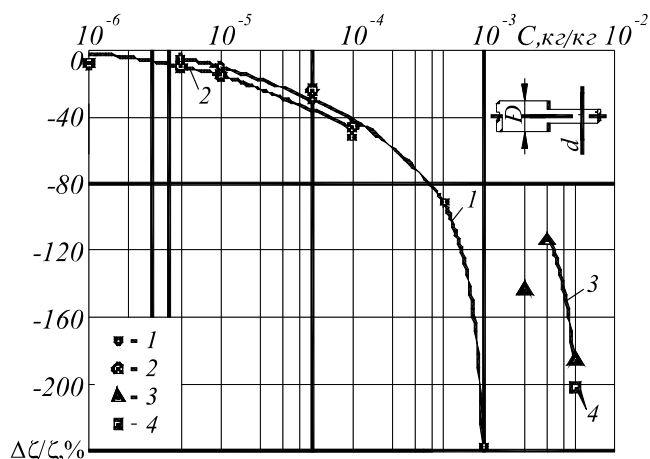


Рисунок 7 — Відносна зміна коефіцієнта опору раптового звуження труби при $m = 0,077$ залежно від концентрації C водних розчинів різних ГДАД: ПАА — (1); ПОЕ — (2); метаупону з додаванням 7 % $NaCl$ — (3); диталану з додаванням 3,5 % $NaCl$, свіжий розчин — (4); ($D = 20,95$ мм, $Re_d = 20000$).

Відносна зміна коефіцієнта опору раптового звуження труби при розвиненій турбулентній течії водних розчинів ПАА із $C \leq C_{opt} = 10^{-4}$ кг / кг описується (з надійністю 0,95 за критерієм Фішера) функцією

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \frac{C}{a_{d,\zeta} + b_{d,\zeta}C}, \quad (9)$$

де $a_{p,\zeta}$ і $b_{p,\zeta}$ — емпіричні коефіцієнти. Їх значення, що залежать від m , подано у таблиці 2.

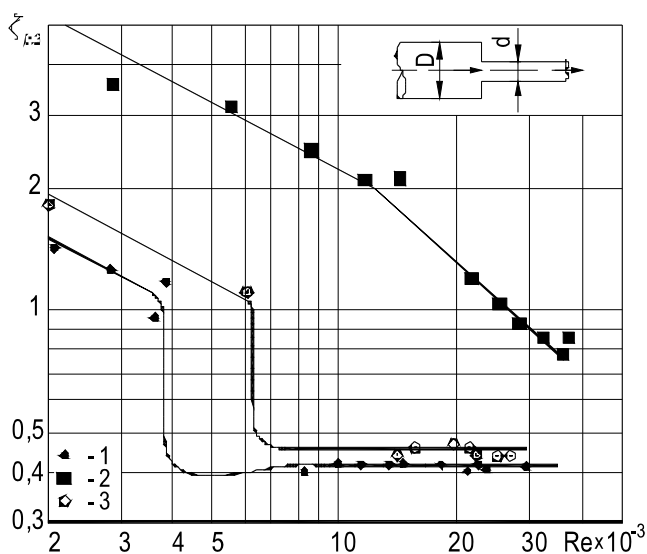


Рисунок 8. Залежність $\zeta_{p.з} = f(Re_d)$ при $m = 0,077$ для течій води — (1) і водних розчинів диталану $C = 5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг з додаванням 3,5% NaCl: 2 — свіжий розчин; 3 — розчин після добового зберігання ($D = 20,95$ мм, $d = 5.81$ мм).

Таблиця 2 — Значення коефіцієнтів $a_{p.з}$ і $b_{p.з}$ у формулі (9) для раптового звуження труби

Геометричні параметри раптового звуження труби	Значення коефіцієнтів	
	$a_{\delta,\zeta}, \text{ кг/кг}$	$b_{p.з}$
$D = 20.95 \text{ мм} = \text{const}$, d — змінне, $m \leq 0,3$	$-11,93 \cdot 10^{-5}$	$-1,36 \cdot 10^{-2}$
D — змінне, $d = 5,81$ $\text{мм} = \text{const}$, $m \leq 0,3$	$-9,91 \cdot 10^{-5}$	$-0,94$

Висновки

Гідродинамічна дія полімерів і МПАР на гідравлічний опір раптових звужень труб якісно однакова і посилюється зі зменшенням діаметрів труб. ГДАД пригнічують дрібні вихори, сумірні з власними розмірами, і посилюють вихори, більші від них. У звуженнях труб енергія потоку витрачається на розтягування молекул полімерів на ділянці звуження потоку та на подолання великих вихорів, інтенсивно генерованих на ділянці розширення струменя, відокремленого вихором поясом від стінок труби (рисунок 6). Якщо у місцевому опорі домінують втрати на тертя, то ГДАД їх зменшують, але не більше, ніж послаблюють тертя в циліндричних трубах тих же діаметрів. У випадку переважання опору форми спостерігається зростання місцевих втрат напору.

Зменшення деформації потоку у місцевих опорах і збільшення концентрації розчину ГДАД, яке спричиняє зростання в'язкості розчину, супроводжуються затягуван-

ням ламінарного режиму течії до більших чисел Рейнольдса. Для підтримки ламінарної течії необхідно більше енергії, ніж при турбулентному русі. При масових концентраціях водних розчинів ПАР $C < C_{opt} = 10^{-4}$ кг/кг залежності $\lambda = f(Re, C)$ й $\zeta = f(Re, C)$ мають стрибкові турбулентні переходи, при яких значення коефіцієнта Дарсі λ зростає, а коефіцієнтів опору ζ зменшується. Для раптових звужень труб у зоні нестійкого режиму ($2500 \dots 5600 \leq Re \leq 15000 - 25000$), границі якої залежать від ступеня звуження потоку m , коефіцієнт $\zeta_{p.з}$ залежить від критерію Рейнольдса та від концентрації ГДАД одночасно. Із послабленням деформації потоку m початок ділянки квадратичного опору, для якої коефіцієнт $\zeta_{p.з}$ не залежить від критерію Рейнольдса, зміщується у бік більших значень Re .

Література

1. А. с. 1120293 СССР, МПК G 05 D 11/02. Устройство для регулирования концентрации добавок, снижающих турбулентное трение в трубопроводе / В.В. Чернюк (СССР). № 3591086/18-24; заявл. 11.05.83; опубл. 23.10.84. Бюл. № 39. — С. 135.
2. А. с. 1681200 СССР, МПК G 01 N 15/00. Устройство для определения концентрации гидродинамически активных добавок в растворе / В. В. Чернюк, Р. М. Гнатив (СССР). № 4694737/25; заявл. 19.05.89; опубл. 30.09.91, Бюл. № 36. — С. 182.
3. Пат. 47167 Україна, МПК G 05D 7/00, F 17D 1/00. Спосіб перерозподілу витрат плинного середовища / Чернюк В. В., Жук В. М., Орел В. І. (Україна); Нац. ун-т "Львівська політехніка". — № 2001085746; заявл. 14.08.2001; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5. — 2 с.
4. Калашников, В.Н. Течение растворов полимеров по трубкам с переменным сечением / В.Н. Калашников. — М.: ИПМ АН СССР, 1980. — 49 с.
5. Повх, І.Л. Зменшення турбулентного тертя — основне джерело економії енергії / І.Л. Повх // Вісн. АН УРСР. — 1982. — № 11. — С. 66—74.
6. Козлов, Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л.П. Козлов // Вісн. АН УРСР. — 1987. — № 1. — С. 23—33.
7. Гнатив, Р. М. Влияние полимерных добавок на местные потери напора в трубопроводах / Р.М. Гнатив., В.В. - Чернюк // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. — Львов: Вища школа. Львов. ун-т. — 1989. — № 237. — С. 17—20.
8. Чернюк, В.В. О влиянии добавок полиакрамида на сопротивление внезапных сужений и расширений труб / В. В. Чернюк., Б. Ф. Левицкий // Вестн. Львов политехн. ин-та, Теплоэлектроэнергетические и электромеханические системы. — Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те. — 1984. — № 184. — С. 123—126.
9. Чернюк, В.В. Влияние добавок полиакриламида на турбулентное трение в конфузорах и диффузорах / В.В. Чернюк // В кн.: Спец. вопр. гидравл. и очистки природн. и сточн. вод. Львов. политехн. ин-т. Львов, 1985. — С. 56—87.

Надійшла 04.11.2011 р.