

ВПЛИВ ДЕСТРУКЦІЇ РОЗЧИНУ ПОЛІАКРИЛАМІДУ НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ТРУБ

В. І. ОРЕЛ, В. В. ЧЕРНЮК

Національний університет “Львівська політехніка”, Україна

Наведено результати експериментального дослідження зміни значень коефіцієнта опору раптового розширення труби в процесі деструкції водних розчинів поліакриламідів з масовими концентраціями 10^{-4} та $3 \cdot 10^{-4}$ кг/кг внаслідок проходження їх крізь відцентровий насос. Підтверджено теоретичний механізм деструкції полімерних розчинів, запропонований О.Б.Ступиним [15], який відбувається аналогічно процесу розпаду радіоактивних ядер.

Приведены результаты экспериментального исследования изменения значений коэффициента сопротивления внезапного расширения трубы в процессе деструкции водных растворов полиакриламида с массовыми концентрациями 10^{-4} и $3 \cdot 10^{-4}$ кг/кг вследствие прохождения их через центробежный насос. Подтвержден предложенный А.Б. Ступиным [15] теоретический механизм деструкции полимерных растворов, протекающий аналогично процессу распада радиоактивных ядер.

The results of an experimental research of change of values on the resistance factor of sudden expansion in pipe in process of destruction of polyacrylamide water solutions by mass concentration 10^{-4} and $3 \cdot 10^{-4}$ kg/kg of a flow through the centrifugal pump are given. Offered by Stupin, A.B. [15] the theoretical mechanism of destruction of polymeric solutions proceeding similarly to process of disintegration of radioactive nucleuses is confirmed.

ВСТУП

Явище зменшення гідравлічного опору турбулентних потоків гідродинамічно активними додатками (ГДАД) називається ефектом Томса. До найефективніших ГДАД належать розчини високомолекулярних полімерів малих концентрацій (порядку $10^{-5} \dots 10^{-4}$ кг/кг), міцелотвірних поверхнево-активних речовин (МПАР), суспензій нерозчинних видовжених частинок, дрібні анізотричні частинки, різні короткі нитки [1].

Дослідження ефекту Томса у прямих циліндричних трубах потребувало вивчення поведінки потоків з ГДАД на місцевих опорах [2], оскільки останні входять в сумарний гідравлічний опір трубопроводу [3].

Вплив ГДАД на гідродинамічні процеси у місцевих опорах складніший, ніж на течії в циліндричних трубах. Дія ГДАД ще додатково залежить від виду місцевого опору та його геометричних характеристик, а також від абсолютних значень діаметра труби до і після опору. Цей вплив стає істотним при діаметрах < 21 мм, у межах до 35 мм є неістотним, а при діаметрах > 50 мм – практично відсутній [4]. З аналізу наявних результатів досліджень у [5] дійшли висновку, що вплив розчинів полімерів і МПАР на місцеві втрати

тиску в конфузорах і дифузорах якісно однаковий. До того ж, було з'ясовано [6], що наявність у трубопроводі місцевих гідравлічних опорів деструктивно впливає на ефект Томса. Проте, зменшення опору, послаблюючись або зникаючи чи приймаючи від'ємне значення при течії потоку з ГДАД через місцевий опір, відновлюється на нижче розташованій ділянці труби незалежно від типу додатків [7].

Деструкція високомолекулярних полімерів спостерігається в результаті механічного їх руйнування під час проходження розчину через інтенсивні зсувові течії, зумовлені великою динамічною швидкістю [1]. Це, як правило, відбувається при течії вздовж дуже шорстких поверхонь [8, 9], при проходженні через місцеві опори та насоси [8, 10] тощо. При багаторазовому проходженні через замкнений контур з насосом ефективність полімерного розчину зі збільшенням кількості циклів (прогонів) значно знижується. До того ж, вплив деструкції найістотніший на початковому етапі перепомпювань. При подальшому зростанні кількості циклів процес стабілізується. Ступінь деструкції полімерів та її вплив на гідродинамічний опір зменшується зі

збільшенням концентрації розчину і зростає зі збільшенням його температури [8].

На відміну від полімерів добавки МПАР після проходження через насоси та місцеві опори відновлюють свої гідродинамічні властивості [8, 10] – ефект так званої “оборотної” деструкції [9]. З іншого боку, ефективне зменшення гідродинамічного опору в турбулентних потоках розчинів МПАР відбувається при значно більшій (на 2-3 порядки [9]) їх концентрації порівняно з полімерними добавками.

У загальному, деструкція призводить до зниження, аж до повного припинення, впливу полімерних добавок на гідравлічний опір [8]. Тому їхнє застосування вимагає рішення такого питання: як ефективність добавок зменшується з деструкцією [11], оскільки знання основних закономірностей процесу деструкції дозволило би передбачити зміну опору в різних технологічних системах при введенні в них полімерних добавок і дати практичні рекомендації для проектування цих систем [12].

Аналіз останніх досліджень

При дослідженні процесу деструкції течія полімерних розчинів вивчалася переважно в циліндричних трубах і між коаксіальними циліндрами, наприклад [12]. Досліджень течій розчинів полімерів у місцевих опорах трубопроводів є значно менше. Так, при багаторазовій течії розчину поліакриламід (ПАА) крізь коліна з діаметром 6 мм і радіусом кривини 30 мм виявлено вплив кута повороту (45°, 90° або 180°) на ефект дії полімерних добавок: при більшій деформації потоку ефект від впливу добавок є меншим [13]. А при циркуляції розчину ПАА в трубопроводі діаметром 68 мм з раптовим звуженням труби до 50 мм і раптовим розширенням труби від 50 мм до 68 мм одержано маловідчутний вплив полімерних добавок на значення коефіцієнтів місцевих опорів [14], оскільки ефект від їхньої дії при діаметрах > 50 мм є практично відсутнім [4].

О.Б. Ступін теоретично показав [15], що процес деструкції полімерних молекул протікає

аналогічно процесу розпаду радіоактивних ядер. Виходячи з цієї аналогії, можна записати

$$N_{tm} = 2^{m-1} N_{o1} \Lambda_1 \Lambda_2 \dots \Lambda_{m-1} \times \left[\frac{\exp(-\Lambda_1 t)}{(\Lambda_2 - \Lambda_1) \cdot (\Lambda_3 - \Lambda_1) \cdot \dots \cdot (\Lambda_m - \Lambda_1)} + \frac{\exp(-\Lambda_2 t)}{(\Lambda_1 - \Lambda_2) \cdot (\Lambda_3 - \Lambda_2) \cdot \dots \cdot (\Lambda_m - \Lambda_2)} + \dots + \frac{\exp(-\Lambda_m t)}{(\Lambda_1 - \Lambda_m) \cdot (\Lambda_2 - \Lambda_m) \cdot \dots \cdot (\Lambda_{m-1} - \Lambda_m)} \right] \quad (1)$$

де Λ_i – коефіцієнт розриву полімерних ланцюжків; індекси “1”, “2”, ..., “m” відповідають макромолекулам першого (материнського), другого, ..., m-го (дочірнього) виду;

N – кількість макромолекул; індекси “o” та “t” відповідають початку та моменту часу t , за який відбувається розрив молекул.

Задачі досліджень

Метою роботи є визначення впливу полімерних добавок на значення коефіцієнта місцевого опору при циркуляції їх розчинів у трубопроводній системі з малими (до 21 мм) діаметрами труб, коли ще є істотний вплив полімерних добавок на втрати напору в місцевих опорах. Для досягнення поставленої мети необхідно експериментально дослідити та пояснити фізичну суть процесу деструкції розчинів полімерів.

Деструкція розчинів ПАА при їх течії у трубопроводі з місцевими опорами

Експериментальні дослідження проводилися на стенді витиснювально-циркуляційного типу. Схему установки, методики приготування водних розчинів ПАА та проведення експериментів детально описано в [16] і частково в [17].

Для дослідження було обрано раптове розширення труби від 15.64 мм до 20.95 мм. Відносна похибка визначення діаметрів об'ємним методом не перевищувала 0.1 %. Ймовірність відхилення від середнього результату за критерієм Фішера складала 0.05. Середнє значення відносної еквівалентної шорсткості досліджуваних труб становило ≈ 0.001 .

Досліджувалися водні розчини ПАА масовими концентраціями $1 \cdot 10^{-4}$ та $3 \cdot 10^{-4}$ кг/кг. Концентрація визначалась за вмістом у розчині

безводної речовини ПАА. Використовувався 8 %-ий технічний гель (ТУ 6-01-1049-81, виробництво ВАТ “Оріана”, м. Калущ, Івано-Франківська обл.) з молекулярною масою $3.6 \cdot 10^6$. Відносна похибка визначення концентрацій розчинів ПАА не перевищувала 1.6 %. Для водних розчинів ПАА вказаних концентрацій pH середовища становив 7.31...7.62. А, як показано [18], водні розчини ПАА при значеннях pH , близьких до нейтральних (коли макромолекули мають максимальні розміри), є найбільш стабільними щодо дії гідродинамічного поля.

Циркуляція води і циркуляція водного розчину ПАА відбувалася за допомогою побутового відцентрового насоса НБЦ 1.5/20 “Кама-5”. Це давало можливість вивчення впливу деструкції розчину полімера на зміну коефіцієнта опору раптового розширення труб. Оскільки, на нашу думку, при течії крізь відцентровий насос деструкція полімерного розчину є значно більшою, ніж при течії через місцевий опір, оскільки деформація потоку в раптовому розширенні труби мала (відношення діаметрів складає 1.34). Підтвердженням цього є зменшення коефіцієнта раптового розширення при введенні водного розчину ПАА в потік [19], тобто опір тертя переважає над опором форми (тиску) [10]. До того ж, при проходженні полімерних додатків через відцентровий насос покращувалися характеристики останнього: знижувалася споживана потужність, збільшувалися напір і ККД [1, 9].

Деструкція розчинів полімерів при їх багаторазовому протіканні в круглій трубі оцінювалася формулою [12]:

$$\frac{\tau_o}{\tau_n} = f\left(\frac{A_{\text{пит}}}{C}\right), \quad (2)$$

де τ – дотичне напруження на стінці; індекси “o” та “n” відповідають свіжоприготовленому та деструктованому полімерному розчину;

n – кількість прогонок через трубопровід;

C – концентрація полімеру в розчині;

$A_{\text{пит}}$ – питома робота, що затрачається на подолання сил опору при переміщенні об’єму рідини,

$$A_{\text{пит}} = \Delta p \cdot n; \quad (3)$$

Δp – перепад тиску.

За аналогією з формулою (2) деструкцію полімерних розчинів при їх багаторазовому протіканні в трубопроводі з раптовим розширенням можна описати залежністю:

$$\frac{\zeta_o}{\zeta_n} = f\left(\frac{A_{\text{пит}}}{C}\right), \quad (4)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору.

У нашому випадку відносна похибка визначення коефіцієнта раптового розширення ζ не перевищувала 10% при числі Рейнольдса $Re > 2.5 \cdot 10^4$.

Ефект $\Delta\zeta/\zeta$ від уведення додатків у потік залежить від молекулярної маси M полімера [9, 15], а час t , за який відбувається розрив молекул, прямо пропорційний до кількості циклів циркуляції n розчину ПАА в трубопроводі. Тоді, за аналогією з розривом молекул першого виду, згідно з формулою (1), (індекс “1” випускаємо):

$$N_t = N_o \cdot e^{-\Lambda \cdot t}, \quad (5)$$

маємо для довільної концентрації розчину полімеру в потоці:

$$\left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_n = \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_o \cdot e^{-a_1 \cdot n}, \quad (6)$$

де a_1 – емпіричний коефіцієнт, $a_1 \sim \Lambda$;

$\Delta\zeta/\zeta$ – відносна зміна коефіцієнта місцевого опору,

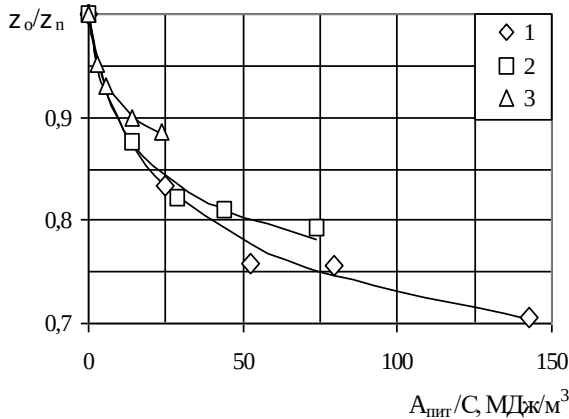
$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = 1 - \frac{\zeta_s}{\zeta_w}; \quad (7)$$

індекси “w”, “s” відповідають течії води та водних розчинів полімера за однакових чисел Re . Співвідношення ζ_s/ζ_w характеризує ефективність розчинів ПАА. При цьому для прямої труби $\zeta = \lambda \cdot l/d$, а $(l/d) = 96$; $(l_D/D) = 42$, де l_d , l_D – довжина мірних ділянок труб.

Будували графічні залежності за формулами (4) та (6).

З рис.1 можна бачити, що експериментальні

точки як для прямих труб, так і для їх раптового розширення обмежуються однією твірною, від якої потім відгалужуються криві для відповідних місцевих опорів. На відміну від прямих труб при раптовому розширенні труби деструкція розчинів ПАА спостерігається при відносно невеликій питомій роботі. Теж саме було і випадку прямих



труб з гострою входною кромкою [12].

Рис. 1. Залежність ζ_0/ζ_n від $A_{\text{питт}}/C$ при течії розчину ПАА концентрацією 10^{-4} кг/кг в трубах діаметрами $d=15.64$ мм (1) та $D=20.95$ мм (2) і раптовому розширенні труби від $d=15.64$ мм до $D=20.95$ мм (3)

Графіки $\frac{\zeta_0}{\zeta_n} = f\left(\frac{A_{\text{питт}}}{C}\right)$ можна апроксимувати функцією

$$\frac{\zeta_0}{\zeta_n} = \left(a_2 + b_2 \cdot \frac{A_{\text{питт}}}{C} \right)^{\frac{1}{c_2}}, \quad (8)$$

де a_2, b_2, c_2 – емпіричні коефіцієнти.

Точність апроксимації також оцінено за коефіцієнтом кореляції, середньоквадратичною похибкою та максимальною наведеною похибкою:

$$\delta = \frac{|y - y^e|_{\max}}{y_{\max}^e - y_{\min}^e}, \quad (9)$$

де y, y^e – відповідно розрахункове та експериментальне значення параметра;

$y_{\max}^e, y_{\min}^e$ – відповідно верхня та нижня межа зміни експериментального параметра.

Результати розрахунку зведено в табл.1.

Як видно з рис. 2, при кожному циклі циркуляції розчинів ПАА ефект на раптовому

розширенні труби не перевищує відповідного ефекту на прямих трубах.

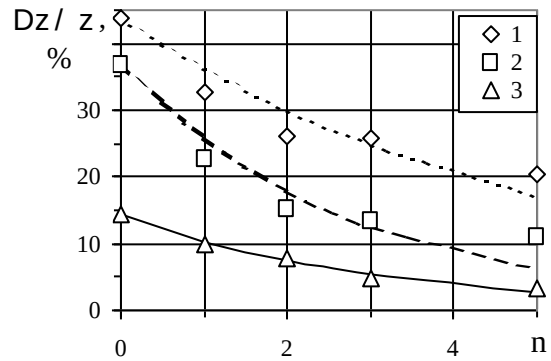
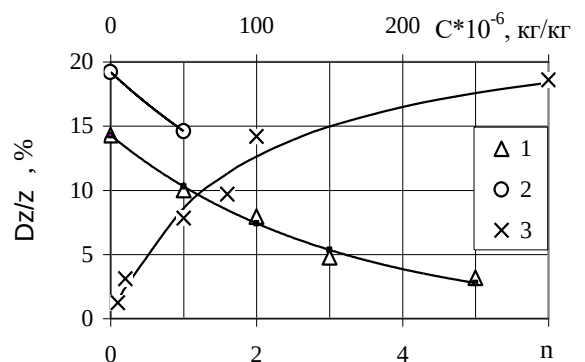


Рис. 2. Залежності $\Delta\zeta/\zeta = f(n)$ при течії водного розчину ПАА з $C=10^{-4}$ кг/кг: труба $d=15.64$ мм (1); труби $D=20.95$ мм (2); раптове розширення труби від $d=15.64$ мм до $D=20.95$ мм (3)

Оскільки молекулярна маса $M \sim N$ [15], то з формули (1) можна пояснити, чому деструкція найбільш істотна на початковому етапі перепомповувань, а при подальшому зростанні кількості циклів n процес стабілізується. У турбулентному потоці макромолекули полімера більш великої молекулярної маси більше схильні до деструкції, і найменший середній час життя $\tau = 1/\Lambda$ мають вихідні (материнські) молекули. При зменшенні молекулярної маси вдвічі час життя зростає в середньому на порядок [15].

Незважаючи на те, що в нестабільності розчинів ПАА в гідродинамічному полі процес деструкції (зменшення молекулярної маси) не є визначальним [18], апроксимація



експериментальних даних за формулою (6) дає задовільні результати (табл. 2).

Рис. 3. Залежності $\Delta\zeta/\zeta=f(n)$ – (1,2) та $\Delta\zeta/\zeta=f(C)$ – (3) для раптового розширення труби при

течії розчину ПАА з $C=10^{-4}$ кг/кг (1) і $3 \cdot 10^{-4}$ кг/кг (2);

криві 1 і 3 побудовані за даними різних серій дослідів

Табл. 1. Значення емпіричних коефіцієнтів для $C = 10^{-4}$ кг/кг у формулі (8) та її точність

Ч/ч	Гідравлічний опір	Емпіричні коефіцієнти			Коефіцієнт кореляції	Середньоквадратична похибка	Максимальна наведена похибка, %
		a_2	b_2	$c_2, \text{м}^3/\text{МДж}$			
1.	труба $d = 15.64$ мм	0.9925	0.1870	9.45	0.9969	0.0091	6.33
2.	труба $D = 20.95$ мм	0.9616	0.3532	13.38	0.9931	0.0104	5.95
3.	раптове розширення труби від d до D	0.9964	0.8049	24.32	0.9996	0.0018	1.54

Табл. 2. Значення емпіричного коефіцієнта a_1 у формулі (6) та її точність

Ч/ч	Гідравлічний опір	Концентрація $C, \text{кг/кг}$	Коефіцієнт a_1	Коефіцієнт кореляції	Середньоквадратична похибка	Максимальна наведена похибка, %
1.	труба $d = 15.64$ мм	10^{-4}	- 0.1900	0.9308	3.282	14.88
2.	труба $D = 20.95$ мм		- 0.3558	0.9521	3.205	15.49
3.	раптове розширення труби від d до D		- 0.3266	0.9944	0.4623	5.10

На рис.3 суміщено графіки $\Delta\zeta/\zeta = f(n)$ та $\Delta\zeta/\zeta = f(C)$ для раптового розширення труби.

Як показано в [20], залежність $\Delta\zeta/\zeta = f(C)$ при $C \leq C_{\text{opt}}$ можна апроксимувати формулою:

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \frac{C}{a_3 + b_3 \cdot C}, \quad (10)$$

де a_3, b_3 – емпіричні коефіцієнти; в нашому випадку $a_3 = 3.72 \cdot 10^{-6}$ кг/кг, $b_3 = 0.042$ при $\Delta\zeta/\zeta$ в % (коефіцієнт кореляції 0.9842, середньоквадратична похибка 0.9134, максимальна наведена похибка $\delta=8.7$ %).

З рис. 3 (криві 1 і 2) видно, що з кожною циркуляцією гідродинамічна ефективність розчинів ПАА зменшується. Так, при концентрації $C = 10^{-4}$ кг/кг ефективність свіжоприготовленого розчину є

$$\left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{n=0} = \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{C=10^{-4} \text{ кг/кг}}, \text{ а ефективність розчину}$$

після одного перепомпювання відцентровим насосом приблизно дорівнює ефективності розчину

$$\text{з } C=8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг: } \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{n=1} \approx \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{C=8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}}, \text{ а}$$

ефективність розчину після двох циклів приблизно дорівнює ефективності розчину з $C=5 \cdot 10^{-5}$ кг/кг:

$$\left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{n=2} \approx \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{C=5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}} \text{ і т.д., доки вона не}$$

досягне значення $\left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_{C=0} = 0$ як для води.

Одержані результати можна застосувати при регулюванні витрати рідини (в бік її зменшення) в гідравлічній системі [21], коли замість декількох полімерних розчинів різних концентрацій можна використати деструктований розчин якоїсь однієї вихідної концентрації (рис. 3).

Регульовальна характеристика [21]:

$$\frac{Q_s}{Q_w} \approx \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^* \cdot \left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_n}}, \quad (11)$$

де ζ^* – коефіцієнт регулювання; для гідравлічної системи розімкненого типу

$$\zeta^* = \frac{\zeta_{w\text{рег}}}{\zeta_{w\text{рег}} + \zeta_{w\text{нер}} + \alpha_w}, \quad (12)$$

для гідравлічної системи замкнутого типу

$$\zeta^* = \frac{\zeta_{w\text{рег}}}{\zeta_{w\text{рег}} + \zeta_{w\text{нер}}}, \quad (13)$$

$\zeta_{\text{рег}}, \zeta_{\text{нер}}$ – опір регульованої та нерегульованої ділянки, відповідно; $\zeta_{\text{рег}} \gg \zeta_{\text{нер}}$;

α_w – коректив кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса).

Регулювання здійснюється до такого скінченного значення n , коли $\left(\frac{\Delta\zeta}{\zeta}\right)_n = 0$, тобто $Q_s = Q_w$.

Висновки

Експериментально підтверджено теоретичний механізм процесу деструкції макромолекул полімерного розчину в трубопроводному потоці,

який полягає в зменшенні молекулярної маси. Показано, що при течії розчину в трубопроводі гідродинамічна ефективність деструктованого розчину описується формулою (6), що є спільною як для прямих труб, так і для їх раптового розширення.

1. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С.23-33.
2. 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.
3. Белов С.В., Девисиллов В.А. Особенности течения вязкоупругих тиксотропных жидкостей через местные гидравлические сопротивления // Хим. и нефт. машиностр. – 1982. – № 7. – С.33-36.
4. Гнатив Р.М., Чернюк В.В. Влияние полимерных добавок на местные потери напора в трубопроводах // Вестн Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. – 1989. – № 237. – С.17-20.
5. Повх И.Л., Чернюк В.В. Влияние добавок на потери давления при конфузорных и диффузорных течениях // Научные основы турбулентных явлений / РАН. Отд. мех.-мат. методов в технол. и экон. разраб. при Президиуме РАН. – М.: Наука, 1992. – С.138-140.
6. Жук В.М., Чернюк В.В. Течія рідин із гідродинамічно активними добавками крізь місцеві опори // Вісн. Держ. ун-ту "Львів. політехн.". Теплоенергетичні системи та пристрої. – 1994. – № 282. – С.27-30.
7. Чернюк В.В., Пасичнюк А.С., Гнатив Р.М. Восстановление эффекта Томса на участке трубы после сужения // Гидравл. и гидротехн.: Республ. межведом. науч.-техн. сб. – 1991. – Вып.52. – С.77-86.
8. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
9. 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.
10. Повх И.Л. Зменшення турбулентного тертя – основне джерело економії енергії // Вісн. АН УРСР. – 1982. – № 11. – С.66-74.
11. Pollert J. Today and future possibilities of industrial applications of drag reduction // Influence Polym. Addit. Velocity and Temp. Fields: Symp. Univ.-GH, Essen, June 26-28, 1984. – Berlin e.a., 1985. – P.371-395.
12. Анисимов И.А., Миронов Б.П. Зависимость деструкции водного раствора полиэтиленоксида от работы сил трения // Турбулентные сдвиговые течения неньютоновских жидкостей: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. – С.14-38.
13. Münsted H. Fließwiderstandsreduzierung in turbulenten Strömungen von Flüssigkeiten durch Zusatz löslicher Polymere: Laborversuche und technische Anwendungen // Rheol. Acta. – 1981. – Vol.20, № 6. – S.591-604.
14. Левицкий Б.Ф., Чернюк В.В. Местные сопротивления при многократной перекачке слабokonцентрированных водных растворов полиакриламида // Вестн Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. – 1982. – № 160. – С.40-45.
15. Ступин А.Б. Теория деструкции полимерных молекул в турбулентном потоке // Научные основы турбулентных явлений / РАН. Отд. мех.-мат. методов в технол. и экон. разраб. при Президиуме РАН. – М.: Наука, 1992. – С.97-108.
16. Чернюк В.В. Влияние добавок полиакриламида на турбулентное трение в конфузорах и диффузорах // Спец. вопросы гидравлики и очистки природных вод. – Львов, 1985. – С.56-87. Деп. в УкрНИИТИ 27.08.85, № 1964-Ук.
17. 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.
18. Макогон Б.П., Быкова Е.Н., Безрукова М.А., Кленин С.И., Иванюта Ю.Ф., Повх И.Л., Торяник А.И. О неустойчивости водных растворов полиакриламида в гидродинамическом поле // Инж.-физ. ж. – 1985. – Т.49, № 3. – С.378-384.
19. Повх И.Л., Чернюк В.В. Экспериментальное исследование влияния добавок полиакриламида на сопротивление диффузоров // Инж.-физ. ж. – 1986. – Т.51, № 3. – С.357-361.
20. Чернюк В.В., Орел В.И., Гнатив Р.М. Змінювання гідравлічного опору раптових розширень труб додатками поліакриламідy // Вісн. Укр. держ. ун-ту водн. госп-ва та природокорист. Збірник наук. праць. – 2002. – Вип.5 (18), ч.5. Гідротехнічні споруди, гідравліка, гідрологія та гідроенергетика. – С.202-209.
21. Орел Вадим. Регулювання витрати рідини у гідравлічній системі введенням у потік додатків // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехн.". Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2002. – № 460. – С.172-175.