

СССР, Гидротормоз с регулируемым тормозным моментом / Н.С. Селецкий, В.И. Сутулов // *Открытия. Изобрет.* – 1981. – № 34. С.180. 6. А.с. 1618912 СССР, Способ регулирования тормозного момента гидротормоза и гидротормоз с регулируемым тормозным моментом / В.В. Чернюк, А.С. Пасичнюк, Р.М. Гнатив // *Открытия. Изобрет.* – 1991. – № 1. – С.98. 7. А.с. 1695012 СССР, Гидротормоз с регулируемым тормозным моментом / В.В. Чернюк, А.В. Бонч-Бруевич, И.В. Корабель // *Открытия. Изобрет.* – 1991. – № 44. – С.141. 8. Чернюк В.В. Гидрогальмо з регулювальним затримним моментом // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1995. – № 291. – С.54–63. 9. Гавриленко Б.А. *Гидравлические тормоза.* – М., 1961. 10. А.с. 827875 СССР, Способ регулирования нагрузки гидравлического тормоза / В.К. Титкин, В.Е. Гимпелевич // *Открытия. Изобрет.* – 1991. – № 1. – С.156. 11. А.с. 941750 СССР, Гидротормоз / Н.С. Селецкий, Б.И. Лерман, В.И. Сутулов // *Открытия. Изобрет.* – 1982. – № 25. – С.171.

УДК 62.531.3:532.542:532.135

Жук В.

ДУ «Львівська політехніка», кафедра гідравліки та сантехніки

ПІДВИЩЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ ВІДТОКУ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДАХ З РОЗДАЧЕЮ ПО ШЛЯХУ

© Жук В., 2000

In clause the numerical research of influence of design data of pipelines with distribution of liquid on a way on a degree of liquid distribution non-uniformity is carried out. It is offered to enter into a flow the polymeric additives to increase uniformity of distribution.

Забезпечення рівномірної роздачі рідини в розгалужених трубопровідних системах є важливою і досить поширеною технічною задачею. Здебільше для подібних цілей використовують регулятори тиску, котрі створюють заданий постійний тиск в різних відгалуженнях трубопроводу за допомогою додаткового гідравлічного опору. Тоді в головній магістралі створюється тиск, більший за необхідний, а на кожному конкретному регуляторі різниця тисків гаситься. При цьому втрачається частина енергії потоку.

У деяких трубопровідних системах, як, наприклад, поливних трубопроводах, немає дуже жорстких вимог до рівності тисків, проте бажаним є якомога рівномірніший відтік рідини по довжині. Підвищення рівномірності досягається збільшенням по шляху розмірів чи зменшенням кроку отворів, або ж за рахунок зміни їх гідравлічного опору за допомогою насадок різної довжини. Нами пропонується для вирівнювання розподілу тисків вводити в потік рідини гідродинамічно активні добавки (ГДАД). Вагомою перевагою такого способу регулювання величини роздачі є істотне зменшення втрат енергії на гідравлічне тертя у всьому діапазоні зони турбулентного режиму.

Метою цієї статті є дослідження впливу конструктивних параметрів розподільного трубопроводу на нерівномірність роздачі рідини по шляху та вивчення впливу полімерних добавок на значення ступеня нерівномірності.

У працях [1,2] при розв'язуванні задачі про рух рідини в трубопроводі з роздачею по шляху припускається, що роздача рідини є рівномірною, вводиться поняття постійної по

довжині питомої витрати. У такому припущенні отримують залежності зміни напору та витрати рідини по довжині труби. В реальних розподільних трубопроводах завжди існує певна нерівномірність роздачі рідини.

У роботі проаналізовано вплив конструктивних параметрів трубопроводу на ступінь нерівномірності роздачі рідини. В основу покладено результати числового експерименту, виконаного за власною програмою.

Розглянуто задачу про рух рідини в тупиковому трубопроводі з роздачею по шляху крізь однакові за розміром отвори, розташовані з постійним по довжині кроком. За умовою відомі конструктивні параметри: матеріал і діаметр розподільного трубопроводу D , діаметр отворів d , довжина трубопроводу L , крок отворів l . Необхідно знайти розподіл п'єзометричного напору, витрати рідини в трубі і в отворах по довжині трубопроводу.

Диференціальне рівняння руху рідини у трубопроводі зі змінною масою при відокремленні рідини під кутом $\theta = 90^\circ$:

$$DH + dh + 2V dV/g = 0, \quad (1)$$

де H – п'єзометричний напір; V – середня швидкість рідини у трубопроводі; h – втрати питомої енергії потоку (напору).

Для числового розв'язування рівняння (1) подамо у вигляді:

$$\Delta H = h - 2V \Delta V/g. \quad (2)$$

Значення п'єзометричного напору в кожній наступній точці отримували з виразу:

$$H_{i+1} = H_i + h_i - 2V_i(V_{i+1} - V_i)/g, \quad (3)$$

де H_{i+1} , H_i – п'єзометричні напори відповідно в точці $i+1$ та i (рис.1); $h_i = \lambda l V_i^2 / (2gD)$ – втрати напору по довжині i -ї ділянки, де λ змінний по довжині; V_i , V_{i+1} – середні швидкості руху рідини в i -й та $(i+1)$ -й точці відповідно.

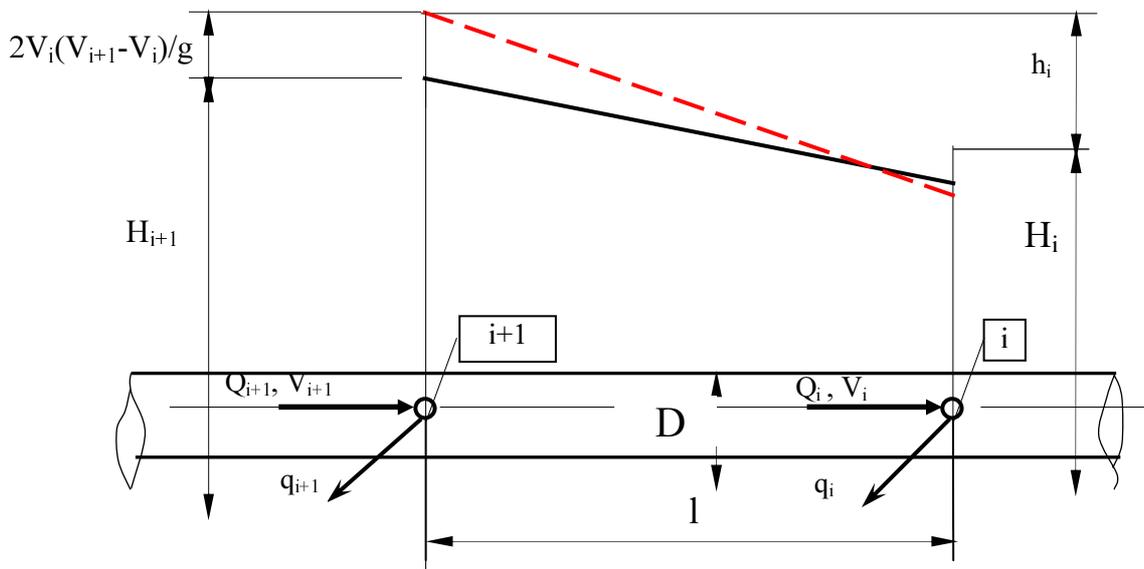


Рис.1. Схема елемента труби з роздачею рідини по шляху

Розрахунок розподільного трубопроводу починається з першого від кінця отвору, напором H_1 на якому задається, виходячи з технічних умов експлуатації. Нумерація отворів і ділянок також ведеться від кінця до початку трубопроводу.

Витрата рідини крізь і-й отвір:

$$q_i = \mu \omega_o \sqrt{2gH_i} \quad (4)$$

Витрата рідини на цій ділянці трубопроводу:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i q_j \quad (5)$$

Отже, в рівнянні (3) маємо неявну залежність відносно H_{i+1} . Рівняння (3) розв'язували методом поступового наближення, аж доки відносна різниця між наступним і попереднім наближенням не була меншою за допустиму похибку ε , яку у всіх розрахунках приймали $\varepsilon = 10^{-6}$.

$$(H^{(j+1)} - H^j) / H^{(j+1)} < \varepsilon \quad (6)$$

Тільки після виконання умови (6) починали розрахунок наступної ділянки. У результаті отримували значення напорів і витрат по всій довжині трубопроводу.

Встановлено, що особливості роздачі води характеризуються трьома безрозмірними величинами:

- коефіцієнтом витрати μ ;
- шпаруватістю трубопроводу $f = Nd^2/D^2$, де N – кількість отворів;
- коефіцієнтом опору трубопроводу $\zeta_L = \lambda_o L/D$, де λ_o – коефіцієнт гідравлічного тертя

для квадратичної області опорів приймали за формулою Шифрінсона $\lambda_o = 0,11 \cdot (\Delta_e/D)^{0,25}$, Δ_e – еквівалентна висота виступів шорсткості.

Числовим розрахунком було охоплено область з такими значеннями вищевказаних параметрів: $\mu = 0,3 - 0,8$; $f = 0,24 - 4$; $\zeta_L = 3,8 - 253$. Більшість дослідів проведено в площині $\mu = 0,62$. Згідно з [3] це значення коефіцієнт витрати для малого отвору в тонкій стінці спостерігається в широкому діапазоні діаметрів та напорів.

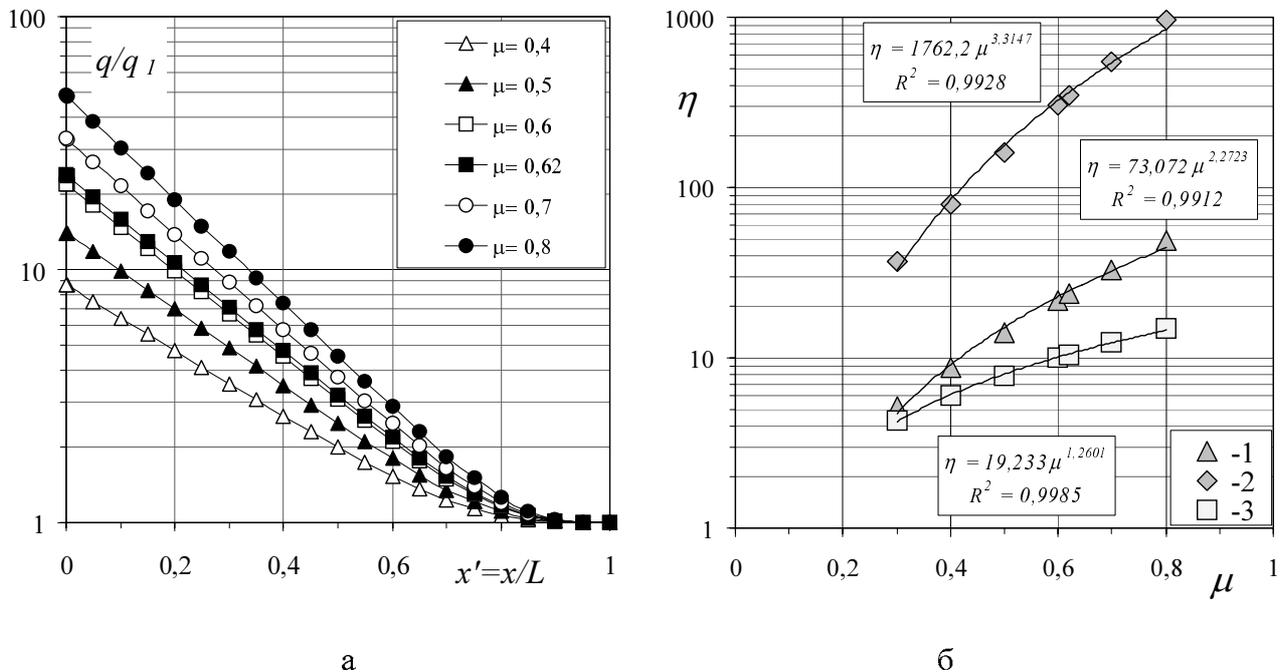


Рис.2. Залежність ступеня нерівномірності роздачі η від коефіцієнта витрати μ :

а – зміна витрати отворів по шляху для трубопроводу з $f=1,2$ та $\zeta_L=253$; б – залежність η від μ для трьох різних трубопроводів: 1– $f=1,2$; $\zeta_L=253$; 2– $f=4$; $\zeta_L=126,5$; 3– $f=4$; $\zeta_L=25,3$

Результати числового експерименту було подано графічно в безрозмірних координатах. Будували графіки залежності відносного напору $H' = H/H_0$, відносних витрат $q' = q/q_0$, $Q' = Q/Q_0$, а також відносної зміни напору $\sigma = 2g(H_0 - H)/V_0^2$ по довжині труби $x' = x/L$ (тут H_0 , V_0 – відповідно напір і середня швидкість на початку труби). Нерівномірність роздачі рідини визначали як відношення витрат першого та останнього за ходом руху рідини отвору: $\eta = q_0/q_1$.

Отримано такі результати: зі збільшенням коефіцієнта витрати μ спостерігалось швидке зростання величини η . Сімейство кривих $\eta = \eta(x')$ на рис.2,а показує зміну витрати отворів q по довжині трубопроводу з приведеним коефіцієнтом гідравлічного опору $\zeta_L = 253$ і шпаруватістю $f = 1,2$ для шести різних значень коефіцієнта витрати μ .

Аналогічні криві одержані для інших співвідношень ζ_L і f . На рис.2,б побудовано графіки залежності ступеня нерівномірності η від коефіцієнта витрати μ для трьох різних трубопроводів. Як показує апроксимація, величина η в усіх випадках добре апроксимується степеневою функцією, причому значення ступеня дещо збільшується зі збільшенням добутку $\zeta_L \cdot f$.

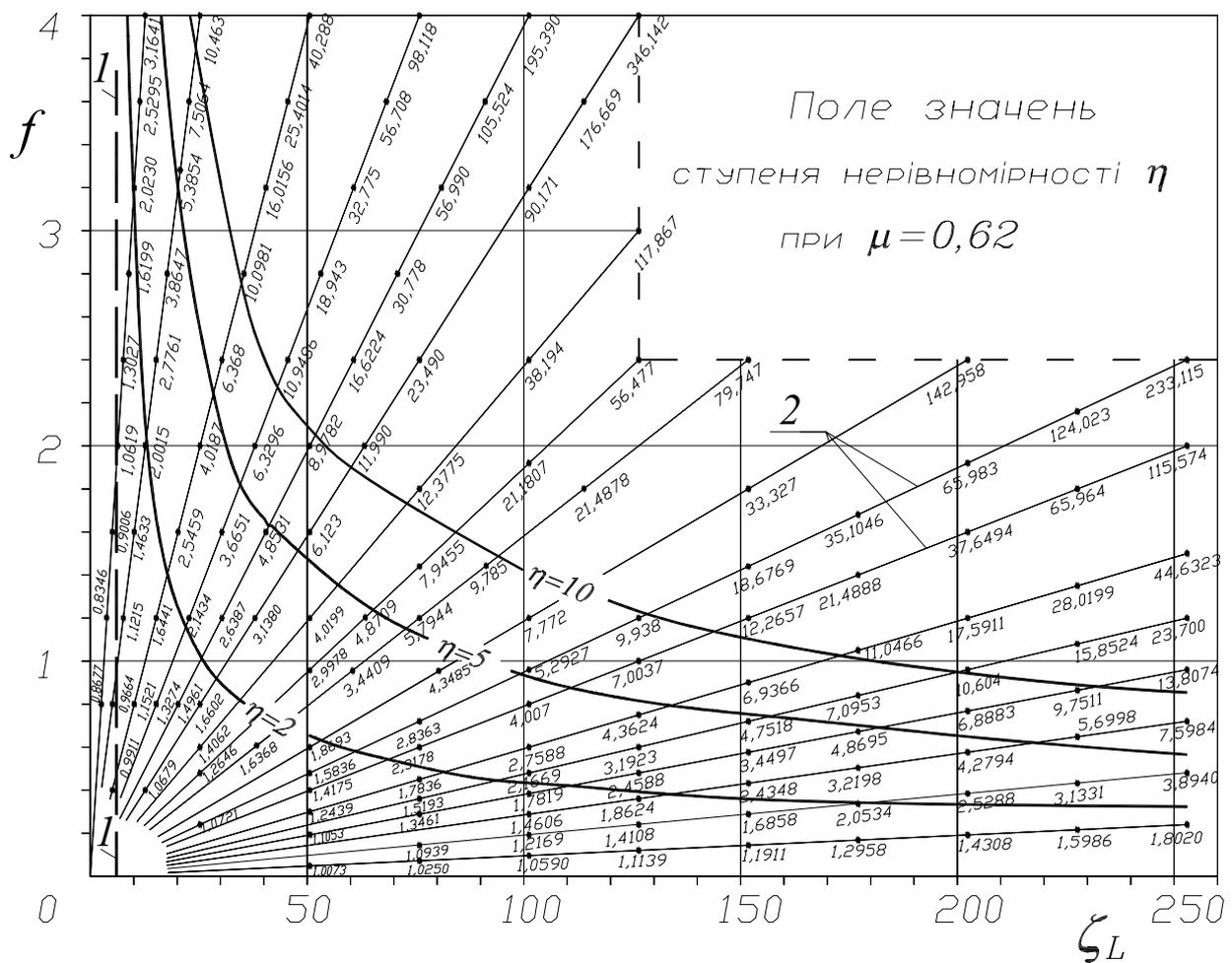


Рис.3. Графік скалярного поля $\eta = \eta(\zeta_L; f)$ для розподільного трубопроводу з однаковими за розмірами, розташованими з однаковим кроком по довжині отворами. Коефіцієнт витрати постійний по довжині і дорівнює $\mu = 0,62$

Детальніше вивчали вплив ζ_L і f на ступінь нерівномірності η при коефіцієнті витрати $\mu = 0,62$. Зручним для сприйняття й аналізу є наочне зображення скалярного поля $\eta = \eta(\zeta_L, f)$ в площині $\mu = 0,62$, наведене на рис.3. На графіку нанесені ізолінії $\eta = 2; 5; 10$, які добре описуються гіперболами виду $f^x \cdot \zeta_L = \text{const}$. Ізолінія $\eta=10$ може розглядатися як верхня погранична лінія, яка приблизно окреслює область реальних розподільних трубопроводів. За межами цієї зони знаходяться трубопроводи з практично недоцільним або нереальним співвідношенням напорів на початку і в кінці труби, а саме: $H_0/H_1 > 100$. Інша важлива лінія 1 – пряма однакового напору, для всіх точок якої справедлива рівність $\eta = 1$. Пряма описується рівнянням $\zeta_L = 6$. Це підтверджує висновки [1,2], що при $\zeta_L > 6$ напір в кінці розподільного трубопроводу менший, ніж на його початку, при $\zeta_L < 6$ – навпаки, а при $\zeta_L = 6$ напори на початку і в кінці однакові. Такий підсумок досить нескладно виводиться після припущення, що в трубопроводі існує рівномірна роздача рідини. Той самий результат отримують і з урахуванням реального нерівномірного відтоку по шляху.

За графіком на рис.3 є можливість відстежувати зміну витрати отворів q по довжині трубопроводу, оскільки кожен промінь 2, проведений з початку системи координат під кутом α до горизонту – це суть трубопровід з певним відношенням $\lambda_0 l D / d^2$ ($\alpha = \arctg(\lambda_0 l D / d^2)$). Збільшення відрізка, відкладеного на промені, означає пропорційне збільшення довжини L .

Аналіз рис.3 показує, що в довільному розподільному трубопроводі на самому початку труби напір H і витрата q дещо зростають; при $l/D = 6/\lambda_0$ напір завжди такий самий, як на початку $H = H_0$, а потім стає дедалі меншим. Зрозуміло, що навіть для трубопроводів з коефіцієнтом опору $\zeta_L = 6$ відтік води не є рівномірним всюди по шляху, оскільки напір в проміжних перерізах не дорівнює напові H_0 .

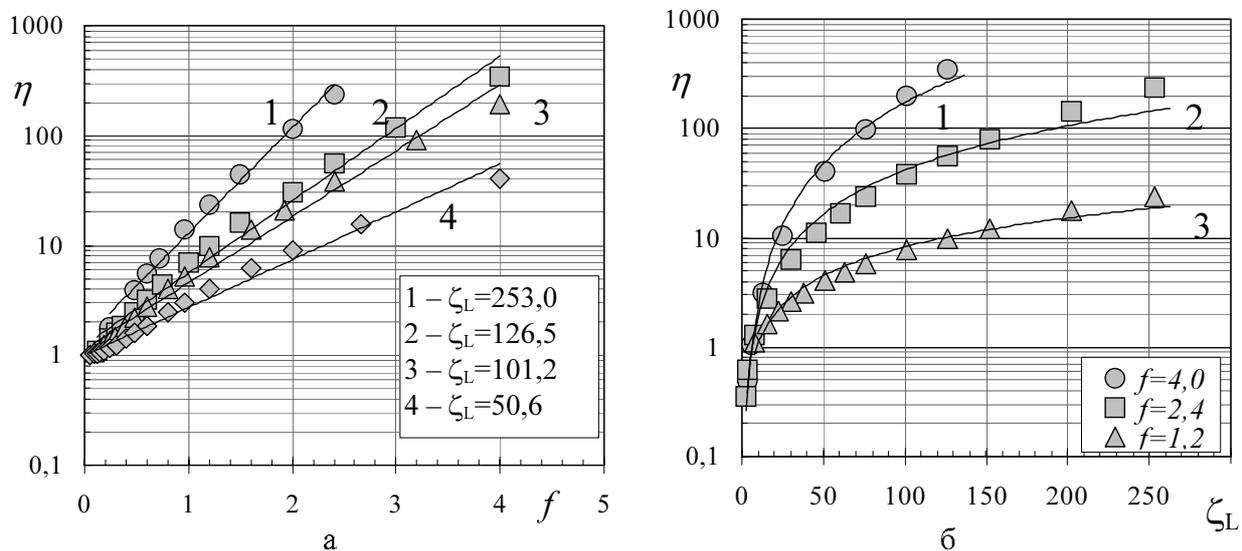


Рис.4. а – залежність ступеня нерівномірності η від шпаруватості розподільного трубопроводу f при різних значеннях коефіцієнта опору ζ_L (коефіцієнт витрати отворів $\mu = 0,62$).

Апроксимації, отримані за методом найменших квадратів:

$$1 - \eta = 1,419 \cdot \exp(2,21f); \quad 2 - \eta = 1,237 \cdot \exp(1,515f); \quad 3 - \eta = 1,147 \cdot \exp(1,385f); \quad 4 - \eta = 0,998 \cdot \exp(1,003f).$$

б – залежність ступеня нерівномірності η від коефіцієнта опору розподільного трубопроводу ζ_L при різних значеннях шпаруватості f (коефіцієнт витрати отворів $\mu = 0,62$).

Апроксимації, отримані за методом найменших квадратів:

$$1 - \eta = 0,0326 \cdot \zeta_L^{1,861}; \quad 2 - \eta = 0,0864 \cdot \zeta_L^{1,342}; \quad 3 - \eta = 0,3444 \cdot \zeta_L^{0,677}$$

Було досліджено, як впливають на нерівномірність роздачі коефіцієнт опору та шпаруватість кожен зокрема. Для цього будували графіки залежності ступеня нерівномірності від одного з параметрів при кількох сталих значеннях іншого.

Залежність $\eta = \eta(f)$ добре описується експонентами $\eta = C_1 \cdot \exp(C_2 f)$, де C_1 і C_2 спадають зі зменшенням ζ_L . Всі криві плавно виходять на значення $\eta = 1$ при $f \rightarrow 0$ (рис.4, а).

Залежності $\eta = \eta(\zeta_L)$ для $f=1,2; 2,4; 4,0$ подано на рис.4,б. Характерно, що всі вони проходять через точку з координатами $\zeta_L = 6; \eta = 1$, а при $\zeta_L \rightarrow 0$ (випадок ідеальної рідини) η прямує до цілком певного значення, меншого за одиницю, причому тим меншого, чим більша шпаруватість f . Так, скажімо, в розподільному трубопроводі, для якого $\zeta_L = 1, f = 4$, витрата в першому отворі q_0 в 30 разів менша, ніж в останньому.

Числовий аналіз багатьох апроксимацій для $\eta(\zeta_L)$ та $\eta(f)$, частина з яких наведена в підписках до рис.4, дає змогу вивести узагальнене рівняння:

$$\eta = (1 + 0,0016\zeta_L) \times \exp(0,116 f \zeta_L^{0,5347}). \quad (7)$$

Рівняння (7) справедливе при постійному $\mu = 0,62$. Похибки у визначенні η за формулою (7) дають розходження з даними числового експерименту до 2 %.

Аналіз впливу різних факторів на ступінь нерівномірності показує, що найбільше η змінюється зі зміною шпаруватості труби, меншою мірою – зі зміною коефіцієнта витрати μ та коефіцієнта опору ζ_L . Проте у двох останніх випадках ця залежність доволі значна (наближено описується степеневою формулою), тому при збільшенні цих величин значення η різко зростає, що негативно відбивається на якості роботи розподільного трубопроводу.

У ході експлуатації поливних трубопроводів внаслідок їх періодичного заповнення водою труби швидко заростають іржею, тобто з часом зростає еквівалентна шорсткість стінок труби Δ_e , а відтак і коефіцієнт гідравлічного тертя λ . Отже, для трубопроводу поступово збільшується ступінь нерівномірності роздачі рідини по шляху. Так, при збільшенні Δ_e від 0,1 мм для нових сталевих труб до 1 мм для сильно заіржавлених, коефіцієнт гідравлічного тертя і приведений коефіцієнт трубопроводу ζ_L збільшується приблизно в 1,8 раза, що приводить до зростання ступеня нерівномірності в 1,5 рази при $f = 1,2$ та в 3 рази при $f = 4,0$. Шкода, заподіяна заіржавленням труб, очевидна: це перевитрата енергії (в наведеному прикладі на 80 %) і занижені витрати на останніх за ходом руху води отворах.

Проте можливий і зворотний вплив на значення коефіцієнта опору ζ_L . Введення в турбулентний потік невеликої кількості ГДАД здатне істотно зменшити коефіцієнт гідравлічного тертя (ефект Томса).

Відомо, що ланцюжкові полімери, такі як поліакриламід (ПАА), поліоксиетилен (ПОЕ), при мізерній масовій концентрації в кілька десятків мільйонних часток здатні зменшувати величину турбулентного тертя у 2-3 рази. Якщо зупинитися на ПАА, як дешевшому та доступнішому полімері, то згідно з даними [4,5] водні розчини ПАА концентраціями порядку 10-50 ppm (1 ppm = 10^{-6} кг/кг) показали зменшення коефіцієнта гідравлічного тертя відповідно на 10-50 % порівняно з випадками для води. Полімерні добавки неефективні при ламінарному русі рідини, проте числовий експеримент показав неістотність ламінарної частини потоку у трубі. Було встановлено, що з високим ступенем точності можна нехтувати зміною коефіцієнта гідравлічного тертя по довжині розподільного трубопроводу і приймати його як для квадратичної області опорів. Тому при змен-

шенні λ на 50 % слід очікувати двократного зниження коефіцієнта опору ζ_L , що у свою чергу різко зменшує ступінь нерівномірності η . З рис.3 видно, що введення полімерних додатків з метою підвищення рівномірності роздачі води дає більший ефект у трубопроводах з великими значеннями шпаруватості f і малими значеннями гідравлічного опору ζ_L . Так, для $f = 4,0$ зниження λ_0 вдвоє спричиняє 3-5-кратне зменшення ступеня нерівномірності η .

Підставляючи лінійну залежність коефіцієнта гідравлічного тертя від концентрації ПАА, яка існує при $C \leq 50$ ppm [5], в узагальнене рівняння для ступеня нерівномірності $\eta(f; \zeta_L)$, можна отримати залежність η від концентрації C ПАА, справедливу при постійному коефіцієнті витрати отворів $\mu = 0,62$:

$$\eta = [1 + 0,0016(\lambda_w - kC)L/D] \times \exp \{0,116 f \cdot [(\lambda_w - kC) \times L/D]^{0,5347}\}, \quad (8)$$

де λ_w – коефіцієнт гідравлічного тертя для течії води без додатків.

Отже, дослідження впливу конструктивних параметрів розподільних трубопроводів на величину нерівномірності роздачі рідини показало, що особливості роздачі рідини визначаються трьома безрозмірними параметрами – коефіцієнтом витрати отворів μ , шпаруватістю труб f та приведеним коефіцієнтом опору трубопроводу ζ_L . Досліджено, як впливає на ступінь нерівномірності роздачі води кожен з цих трьох параметрів та показано можливість збільшення рівномірності віддачі води введенням у потік полімерних додатків типу ПАА.

1. Константинов Ю.М. *Специальные вопросы гидравлики систем водоснабжения и водоотведения*. – Уч. пособ. – К., 1981. 2. Смыслов В.В., Езерский Н.О. *Гидравлический расчет перфорированных цилиндрических трубопроводов с задачей расхода* // *Гидравлика и гидротехника*. – 1980. – Вып.30. – С.52-59. 3. Большаков В.А. и др. *Справочник по гидравлике*. – К., 1984. 4. Berman N.S. *Drag reducing by polymers* // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 1978. – № 10. – С.47-64. 5. Чернюк В.В., Жук В.М. *Стабілізація витрати рідини, що витікає з резервуару при змінному напорі* // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1996. – № 304. – С.76–80.

УДК 62–54(621.532.1+621.646.4)

Чернюк В.

ДУ "Львівська політехніка", кафедра гідравліки та сантехніки

РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ГІДРАВЛІЧНИХ І ПНЕВМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ

© Чернюк В., 2000

The review is given and the classification of ways of regulation of pressure in devices of hydraulic and pneumatic systems of automation is offered.

Вступ. Поширене застосування гідравлічних і пневматичних систем спонукало до розробки різноманітних засобів керування потоками середовищ. Управління течіями рідин і газів передбачає такі дії: від'єднання; зміну напрямку руху; розподіл; змішування; скидання; регулювання параметрів потоку. Останнє полягає у змінюванні чи підтримуванні заданого постійного значення: витрати; тиску; температури; концентрації компонентів середовища; розподілу швидкостей у потоці [1,2].