

ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНО АКТИВНИХ ДОДАТКІВ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ РІДИН У ТРУБОПРОВОДАХ

© Орел В.І., 2008

Запропоновано формулу для визначення кількості витраченої електроенергії, яка характеризує технічну ефективність транспортування рідин. Показано, що економічний ефект від уведення гідродинамічно активних додатків у потік рідини за рахунок зменшення спожитої електроенергії буде за додатного значення цієї величини.

A formula for determination of amount of spent electric power which characterizes technical efficiency of transporting of liquids is offered. Economic effect from introduction of hydrodynamically active additions to the stream of liquid due to diminishing of used electric power will be at the positive value of this size is shown.

Постановка проблеми. Одним з найперспективніших підходів до вирішення проблеми зменшення енергозатрат і прискорення процесів швидкісного транспортування рідин у трубопроводах є ефект Томса [1], який полягає у зменшенні гідравлічного опору турбулентних потоків розчинами гідродинамічно активних додатків (ГДАД). До ГДАД зараховують полімери з ланцюжковою будовою молекул (поліакриламід (ПАА), поліетиленоксид тощо) і міцелотворні поверхнево-активні речовини (диталан, метаупон тощо). Зменшення опору, яке дають добавки полімерів і поверхнево-активних речовин (ПАР), що сягає 50–80%, можна одержати тільки імплантацією волокон [2].

Спонукальним фактором для використання в промисловості ефекту Томса є показники економічності [3]. Тому необхідно з'ясувати, коли під час транспортування рідин у трубопроводах ГДАД будуть ефективними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування ГДАД у круглоциліндричних трубопроводах є економічно доцільним тільки у разі їхньої великої довжини [4], наприклад, під час транспортування нафти Трансаяскінським нафтопроводом діаметром 1200 мм [5] чи дизельного палива трубопроводом 82 км завдовжки та діаметром 210 мм [6]. У коротких трубопроводах, в яких місцеві опори становлять істотну частку загального опору трубопровідної системи, застосування ГДАД є виправданим у разі досягнення корисного побічного ефекту, тобто як агентів комплексної дії, наприклад, під час регулювання витрати рідини в гідравлічній системі замкненого типу (за діаметрів трубопроводів до 50 мм [7]), де циркулює рідина, що приводиться в рух насосом [8]. У самопливних трубопроводах, наприклад водовідвідних мереж, ГДАД можна використовувати тоді, коли за заданого гідравлічного похилу неможливо пропустити необхідну витрату рідини [9].

Наявність у трубопроводах насосів і місцевих гідравлічних опорів зменшує ефективність ГДАД [10]. При тому полімерні добавки зазнають механічної деструкції, яка проявляється у послабленні їхньої гідродинамічної активності, а ПАР мають “оборотну” деструкцію [11], тобто відновлюють свої гідродинамічні властивості (рис.1). Тому добавки полімерів потрібно вводити на кожній проміжній насосній станції, де регулювання їх витрати здійснюють зміною кількості обертів шестеренних насосів [12], який дозволяє одержати тиск, більший за робочий в трубопроводі за мінімальних напружень зсуву, що оберігає ГДАД від деструкції. Додатки у вигляді розчину доцільно застосовувати лише там, де має значення швидкість їхнього розчинення, тобто на трубопроводах малої довжини [13]. До того ж питання їхнього приготування та збереження

вирішується використанням так званих швидко приготовлених полімерних розчинів (ШППР), час приготування яких, на відміну від заздалегідь приготовлених полімерних розчинів (ЗППР), становить від 0,15 до 2,0 с. Крім того, для ШППР відсутня ділянка максимальної гідродинамічної ефективності зменшення опору, що є як наявною за концентрації насичення для ЗППР [14]. Можна також у потік вводити добавки полімеру у твердому вигляді з різним розміром окремих частинок. При тому дрібніші частинки розчиняються швидше і забезпечують необхідне зменшення втрат напору вже на початку трубопроводу, а більші проходять крізь насос, ще не встигнувши розчинитися в транспортованій рідині, і тому залишаються непошкодженими [15].

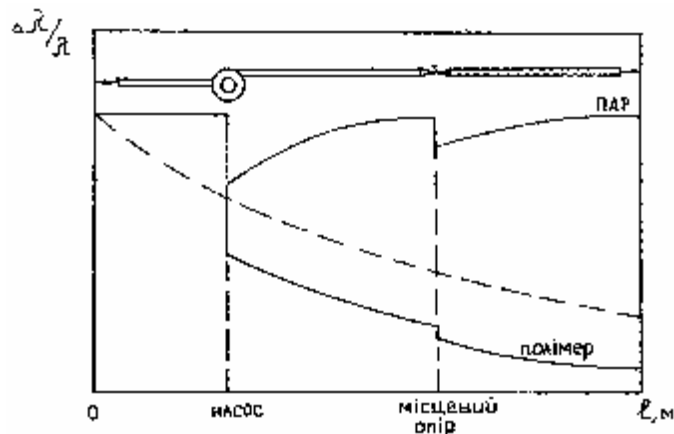


Рис.1. Зміна ефекту зменшення гідродинамічного опору $\Delta\lambda/\lambda$ додатками полімерів і ПАР [10]
 $(\Delta\lambda/\lambda = 1 - \lambda_s/\lambda_w; \lambda - \text{коефіцієнт гідравлічного тертя трубопроводу};$
індекси "s" та "w" відповідають течії рідин з ГДАД і без них)

Економічний ефект від уведення ГДАД у потік рідини за аналогією з [4]:

$$V_e > V_{\text{ГДАД}}, \quad (1)$$

або

$$\frac{V_e}{V_{\text{ГДАД}}} > 1, \quad (2)$$

де $V_e, V_{\text{ГДАД}}$ – вартість відповідно транспортування рідини та ГДАД, грн.,

$$V_e = e E, \quad (3)$$

e – вартість 1 Дж електроенергії, грн.;

E – кількість витраченої електроенергії, Дж, необхідної для транспортування рідини,

$$V_{\text{ГДАД}} = C \cdot S \cdot W, \quad (4)$$

C – ціна ГДАД, грн./кг;

S – масова концентрація ГДАД у потоці транспортованої рідини, кг/м³;

W – об'єм транспортованої рідини, м³.

Але необхідно враховувати також і вартість пристрою V_n для введення ГДАД у потік транспортованої рідини [16] (разом із видатками на його експлуатацію), чим нехтували в формулах (1) та (2). Так, цей пристрій може складатися з ємності, шестеренного насоса та електродвигуна [17]. Тоді економічний ефект від введення ГДАД у потік рідини досягатиметься при

$$V_e > V_{\text{ГДАД}} + V_n = k \cdot V_{\text{ГДАД}}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, який враховує вартість пристрою для введення ГДАД як частку від вартості ГДАД, $k = 1 + V_n/V_{\text{ГДАД}}$, або

$$\frac{V_e}{k \cdot V_{\text{ГДАД}}} > 1. \quad (6)$$

Задачі досліджень. Метою роботи є визначення кількості витраченої електроенергії, необхідної для транспортування рідини. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати наявні експериментальні дані та пояснити одержані результати.

Аналіз наявних експериментальних даних. Кількість витраченої електроенергії, Дж, яка характеризує технічну ефективність транспортування рідини, пропонується [18] визначати як

$$E = \frac{\bar{W}_w}{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\bar{W}_s}{\bar{W}_w} \right), \quad (7)$$

де \bar{W}_w – середня енергія, Дж, що підводиться на робочій ділянці трубопроводу за одиницю часу, за рахунок роботи сил тиску під час транспортування рідини без ГДАД; \bar{W}_w/η – споживана енергія, Дж, у разі перепомпування рідини без ГДАД; η – коефіцієнт корисної дії (ККД) нагнітача; \bar{W}_s/\bar{W}_w – симплекс, який характеризує гідродинамічну ефективність ГДАД певної концентрації; індекси “s” та “w” відповідають течії рідин з ГДАД і без них.

Середню енергію \bar{W} можна визначати як приведену до одиниці об’єму рідини (трубопроводу), Дж/(м³·с) [19]:

$$\bar{W}_1 = \frac{\Delta p \cdot Q}{I \cdot \omega} = \frac{\Delta p}{I} \cdot V, \quad (8)$$

або як приведену до одиниці довжини трубопроводу, Дж/(м·с) [20]:

$$\bar{W}_2 = \frac{\Delta p \cdot Q}{I} = \frac{\Delta p}{I} \cdot V \cdot \omega, \quad (9)$$

де Δp – перепад тиску, Па, на робочій ділянці трубопроводу довжиною I , м; Q – витрата транспортованої рідини, м³/с; V – середня швидкість руху транспортованої рідини, м/с, $V = Q/\omega$; ω – площа живого перерізу трубопроводу, м².

Перепад тиску на ділянці труби від x до $(x + I)$ можна обчислити за формулою [21]

$$\Delta p = \left[\lambda \cdot \frac{I}{d} + (\alpha_{x+1} - \alpha_x) \right] \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \quad (10)$$

де α – коефіцієнт кінетичної енергії; ρ – густина транспортованої рідини, кг/м³.

Вплив зміни кінетичної енергії потоку є дуже істотним при $\Delta\lambda/\lambda > 0,5$ (або $\lambda_w/\lambda < 0,5$) чи тоді, коли на малих віддальх I дуже змінюється профіль швидкості [21]. Формула (10) для розвиненої турбулентної течії рідини, коли профіль швидкості не змінюється по довжині труби, набуває вигляду формули Дарсі-Вайсбаха.

Залежність $\Delta p = f(Q)$, що зображено на рис. 2, полегшує обчислення середньої енергії \bar{W}_w .

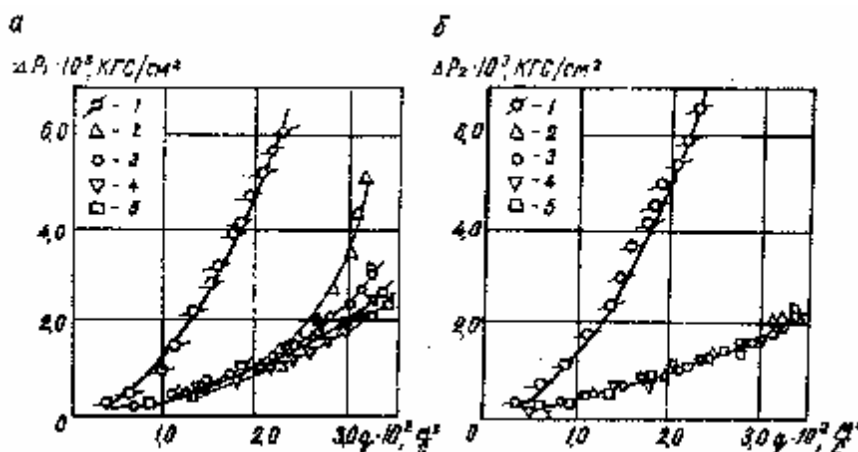


Рис. 2. Залежність втрат тиску в трубопроводі діаметром 95 мм від витрати води (1) та 1,85%-го водного розчину менапону з 7,8% хлористого натру за температури, °С: 2,3 (2), 3,5 (3), 11 (4), 13 (5); віддаль від насоса 23 м (а) та 95 м (б) [22]

З рис. 2 зрозуміло, що за того самого перепаду тиску застосування ГДАД дає змогу збільшити витрату транспортованої рідини за рахунок зменшення гідравлічних втрат у трубопроводі [22].

Перепад тиску на місцевих гідравлічних опорах для довгих трубопроводів необхідно додатково враховувати коефіцієнтом 1,05–1,10 до втрат тиску по довжині, а для коротких – приведеним коефіцієнтом гідравлічного опору:

$$\zeta_{np} = \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta, \quad (11)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору.

Оскільки у системах трубопроводного транспорту зменшення втрат енергії є головним завданням [23], то, згідно з формулою (7), економія електроенергії, а відповідно й економічний ефект від введення ГДАД у потік рідини, має бути при $E > 0$, тобто при $\bar{W}_s / \bar{W}_w < 1$.

У разі течії води та водних розчинів ПАА в трубопроводах діаметром d пропонується [18] залежність $\bar{W}_s / \bar{W}_w = f(d)$. Так, під час концентрації $C = 10^{-4}$ кг/дм³ для діаметрів $d = 5,81 \dots 25,01$ мм і числа Рейнольдса $Re_d = 2 \cdot 10^4$ з коефіцієнтом кореляції 0,977, стандартним квадратичним відхиленням 0,0539, надійністю 0,975 за критерієм Фішера

$$\frac{\bar{W}_s}{\bar{W}_w} = (0,160 \pm 0,024) \cdot d^{0,500 \pm 0,058}, \quad (12)$$

що можна переписати як

$$\frac{\bar{W}_s}{\bar{W}_w} = 0,16 \cdot \sqrt{d}. \quad (13)$$

Отже, кількість витраченої електроенергії E залежить від геометричних характеристик трубопроводу, витрати рідини в ньому та гідродинамічної ефективності ГДАД.

Для прямого круглоциліндричного трубопроводу при $Q = \text{const}$ та $l/d = \text{const}$ можна приймати $\bar{W}_s / \bar{W}_w \approx \lambda_s / \lambda_w$ [24], а за аналогією – $\bar{W}_s / \bar{W}_w \approx \zeta_s / \zeta_w$ [18]. Тоді формулу (7) перепишемо так:

$$E \approx \frac{\bar{W}_w}{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \right). \quad (14)$$

Обчислення полегшується, якщо є аналітична чи графічна (рис.3) залежності $\lambda_s / \lambda_w = f(C \leq C_{\text{opt}})$, де C_{opt} – оптимальна масова концентрація ГДАД у потоці рідини, кг/м³.

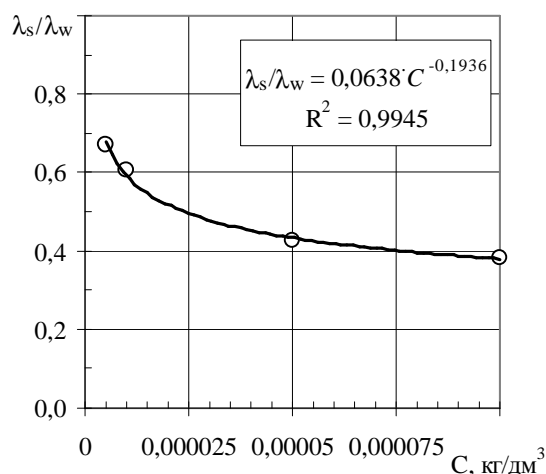


Рис.3. Залежність $\lambda_s / \lambda_w = f(C)$ для труби діаметром 5,81 мм ($l/d = 20$) за числа Рейнольдса $Re_d = 2 \cdot 10^4$

Було запропоновано приймати [4] ККД приблизно однаковим як у разі течії рідин з ГДАД, так і без них, тобто $\eta_s \approx \eta_w = \eta$. Проте, в [9] вказується, що ККД насоса під час використання додатків ПАА збільшився на 16% (з 65% до 81%), а в [11] – на 14% (з 69% до 83%), що є сумірним з

похибкою інженерних розрахунків. Тому у формулах (7) та (14) доцільно брати ККД з коефіцієнтом 1,05–1,10.

Для водогазопровідних сталевих труб (ГОСТ 3262-75*) діаметрами 15–25 мм визначено витрачену електроенергію E у разі введення водних розчинів ПАА концентрацією 10^{-4} кг/дм³ в потік води за числа Рейнольдса $Re_d = 2 \cdot 10^4$ за формулами (7)–(10) та (13) при $\eta = 0,60$ (як для більшості вітчизняних відцентрових насосів) з коефіцієнтом 1,05. Розрахунок записано в таблицю.

Такий самий розрахунок було виконано для трубопроводу завдовжки 1922,5 м та діаметром 300 мм під час введення водних розчинів ПАА концентрацією $5 \cdot 10^{-4}$ кг/дм³ в потік води за числа Рейнольдса $Re_d = 2,05 \cdot 10^5$ [9]. Але у формулі (14) брався ККД насоса під час використання ГДАД.

**Витрачена електроенергія E під час введення водних розчинів ПАА
в потік води**

D_y , мм	15	20	25	раптове розширення 15→20	300
E_1 , Дж/(м ³ ·с)	1269,1	316,8	86,5	4353,7	9,7
E_2 , Дж/(м·с)	0,2243	0,0995	0,0424	1,0472	0,6859
C , кг/дм ³	10^{-4}				$5 \cdot 10^{-4}$
Re_d	$2 \cdot 10^4$				$2,05 \cdot 10^5$

Примітка: для раптового розширення труби брали довжину ділянки повторного приєднання потоку, а площу обчислювали через середній арифметичний діаметр труб, які утворювали раптове розширення [18, 25]

Для трубопроводу діаметром 95 мм під час введення 1,85%-го водного розчину метаупону з 7,8% хлористого натру в потік води для втрат тиску $\Delta p = 0,002$ кгс/см² [22] (рис. 2) витрачена електроенергія, приведена до одиниці об'єму трубопроводу, становить $E_1 = 175,6$ Дж/(м³·с), а до одиниці довжини трубопроводу – $E_2 = 1,245$ Дж/(м·с).

Як показує розрахунок, кількість витраченої електроенергії на одиницю довжини трубопроводу $E > 0$, що свідчить про економію електроенергії під час транспортування рідини у трубопроводі. Це призводитиме до збільшення швидкості руху рідини в трубопроводах з тою самою потужністю насосів чи до зменшення потужності для тієї самої швидкості руху. Крім цього, ефект від використання ГДАД у трубопроводах зростає зі зменшенням діаметра та збільшенням їхньої довжини, витрати рідини та гідродинамічної ефективності ГДАД, що збігається з [4].

Висновки. Уточнено формулу для обчислення економічного ефекту від використання ГДАД. Запропоновано формулу для визначення кількості витраченої електроенергії, яка характеризує технічну ефективність транспортування рідини. Показано, що економічний ефект від використання ГДАД за рахунок зменшення спожитої електроенергії буде за додатного значення цієї величини.

1. Чичканов С.В., Крупин С.В., Мягченков В.А. Снижение гидравлического сопротивления турбулентных водных потоков при введении бинарных смесей сополимеров акриламида и ПАВ // Повышение нефтедобычи пластов. Освоение трудноизвлекаемых запасов нефти: Тр. 12 Европейского симпози. "Повышение нефтедобычи пластов". Казань, 8–10 сент., 2003. – Казань: СТАР, 2003. – С.244–249. 2. Usui Hiromoto, Suzuki Hiroshi. Прогресс уменьшения сопротивления в новом веке // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. В. – 2001. – 67, № 568. – Р.1305–1310 (в Реф. журн. "Механика". – 2002, № 3; 02.03–16Б.161). 3. 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. – Р.371–395. 4. Чернюк В., Жук В. Порівняльна ефективність полімерних додатків при зменшенні втрат енергії в трубопроводах // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація – 2001. – № 432. – С.6–10. 5. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С.23–33. 6. Motier J.F., Prilutski D.J., Shanti Z.-J., Kostelnik R.J.

Polymeric drag reduction in petroleum products // Drag Reduct.: 3rd Int. Conf., Bristol, July 2-5, 1984. – Bristol, 1984. – F.3/1-F3/23. 7. 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. 8. Щербинин Э.В. Струйные течения вязкой жидкости в магнитном поле. – Рига: Зинатне, 1973. – 304 с. 9. Эльперин И.Т., Левенталь Л.И., Мельцер В.Л., Сиротенко В.А., Малькензон Г.А. Повышение пропускной способности технических трубопроводов при гидротранспорте путём активации несущей жидкости // *Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук.* – 1976. – № 3. – С.90–94. 10. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н. Гидродинамика и теплообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с. 11. Пилипенко В.Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения // *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа.* – М.: ВИНТИ АН СССР, 1980. – Т. 15. – С.156–257. 12. Berretz M., Dopfer J.G., Horton G.L. Taps experience proves flow improvers can raise capacity // *Pipeline and Gas J.* – 1982. – 209, № 11. – P.43-44, 46. 13. Сулейманова Ю.В. Полимеризация 1-октена на катализаторах Циглера-Натта, разработка антитурбулентных присадок и ударопрочных композиций на основе поли-1-октена: Автореф. дис... канд. хим. наук: 02.00.06 / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2007. – 19 с. 14. Мамонов В.Н., Миронов Б.П., Мустафаев Р.Ф., Гинзбург Д.И. трения с помощью быстроприготовленных “растворов” полиэтиленоксида // *РАН. Доклады Академии наук.* – 1995. – Т.341, № 1. – С.53–56. 15. Пат. 4335964 США, МКИ В 01 F 11/00, НКИ 366/114. Injection system for solid friction reducing polymers / B.S. Drake, V.R. Kruka, Shell Oil Co. № 224851; Заявл. 05.01.81; Опубл. 22.06.82 (в Реф. журн. “Трубопроводный транспорт”. – 1983. – 3.45.101П). 16. Прохоров А.Д., Челинцев С.Н., Черников А.В., Фокин С.М., Харьюхахто Х. Гидравлическая эффективность применения противотурбулентной присадки при транспортировке дизельного топлива // *Трансп. и хранение нефтепродуктов.* – 2000. – № 3. – С.8–9. 17. Гареев Н.Н., Несын Г.В., Манжай В.Н. Результаты ввода в поток нефти присадки для снижения сопротивления // *Нефт. хоз-во.* – 1992. – № 10. – С.30–31. 18. Орел В.І. Вплив додатків поліакриламиду на втрати напору в раптових звуженнях і розширеннях труб: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / УДУВГП. – Рівне, 2003. – 160 с. 19. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с. 20. Пеев Г.А., Герасименко В.А. К вопросу об оптимизации транспортирования реологически сложных жидкостей по трубопроводам // *Теор. основы хим. технологии.* – 1979. – Т. 13, № 2. – С.290–293. 21. Кулик В.М. Влияние молекулярной массы полиэтиленоксида на динамику снижения сопротивления // *Инж.-физ. журн.* – 1998. – Т.71, № 3. – С.491–495. 22. Симоненко А.П. Эффективность снижения гидродинамического сопротивления добавками при строительстве и эксплуатации шахтных холодильных установок // *Строительство предприятий угольной промышленности: Науч.-техн. реферат. сб.* – 1979. – № 9. – С.9–11. 23. Повх И.Л., Финошин Н.В. Гидродинамика труб переменного сечения // *Инж.-физ. ж.* – 1992. – Т. 62, № 4. – С.525–533. 24. Фабула. Использование снижения сопротивления при течении растворов полимеров в противопожарной технике // *Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех.* – 1971. – Т. 93, № 3. – С.109–111. 25. Орел В. Застосування формули зміни діаметра струменя рідини стосовно раптового розширення трубопроводу // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехн.”. Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація.* – 2001. – № 432. – С.11–14.