

# Порівняльний аналіз застосування в трубопроводному транспорті нафтопродуктів протитурбулентних присадок різних типів

© **В.Я. Грудз**  
д-р техн. наук  
snr@nung.edu.ua  
**Р.С. Аль-Дандал**  
raedrich@mail.ru  
ІФНТУНГ

УДК 622.691.4

*Наведено результати досліджень та огляд літературних даних щодо оцінки ефективності застосування протитурбулентних присадок у трубопроводному транспорті світлих нафтопродуктів. Дано порівняльну характеристику вітчизняних полімерних речовин та імпортованих аналогів. Показано вплив ефективності протитурбулентних присадок на параметри роботи нафтопродуктопроводу.*

**Ключові слова:** протитурбулентна присадка, процес заміщення, режим роботи НПС.

*Приведены результаты исследований и обзор литературных данных по вопросу оценки эффективности применения противотурбулентных присадок в трубопроводном транспорте светлых нефтепродуктов. Дана сравнительная характеристика отечественных полимерных веществ и импортных аналогов. Показано влияние эффективности противотурбулентных присадок на параметры работы нефтепродуктопровода.*

**Ключевые слова:** противотурбулентная присадка, процесс замещения, режим работы НПС.

*The results of researches and a review of literature in relation to estimation of efficiency of applying the antiturbulent additive in transmission of light oil products are given. Performance comparison is done for domestic polymer substances and their import analogues. The impact of turbulent viscosity reducing additive on the oil product pipeline performance parameters is shown.*

**Key words:** antiturbulent additive, process of replacement, mode of operation of oil pump station.

**П**ротитурбулентні присадки (ПТП) – це високомолекулярні полімерні речовини, що допомагають зменшити коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводів під час перекачування нафти і нафтопродуктів у турбулентному режимі. Полімери – хімічні сполуки, у яких багаторазово повторюються атомні угруповання, так звані мономерні ланки. Молекула полімеру, складена з  $n$  ланок, називається макромолекулою або полімерним ланцюгом. Полімери, які складаються з однакових ланок, називають гомополімерами, а ті, що з різних, – сополімерами. Полімер, що не має бокових відгалужень від основного ланцюга, називаються лінійним.

Здатність знижувати опір течією рідин мають багато високомолекулярних речовин, які умовно можна поділити на три класи:

- синтетичні або природні карболанцюгові полімери;
- координаційні полімери;
- високомолекулярні нафтові залишки.

Набутий досвід застосування високомолекулярних сполук для зниження гідравлічного опору показує, що в нафтогазовій промисловості використовують при-

садки, виготовлені на базі поліолефінів, які відносяться до карболанцюгових полімерів і утворюються під час гомо- або сополімеризації олефінів.

Сьогодні на ринку представлені такі пропозиції протитурбулентних присадок нафти і нафтопродуктів для їх використання у трубопроводному транспорті:

- присадка CDR-102 фірми «СОПОС» (США) являє собою 7–10 % гелеподібний розчин продукту полімеризації олефінів молекулярною масою  $10^6 \cdot 10^7$  у газі;
- присадка FLO (1003, 1008, 1010, 1020, 1031 та ін.) фірми «Baker Pipeline Products» (США) гелеподібна і містить в активній частині поліолефіни;
- присадка «Віол» Томського політехнічного університету являє собою 6–12 % розчин поліолефінів молекулярною масою  $3 \cdot 10^6$  у бензині;
- присадка Necadd-547 фірми «Fortum Oil & Gas» (Фінляндія) – це 5–8 % гелеподібний розчин поліолефінів молекулярною масою  $3 \cdot 10^6$  у газі.

Останнім часом на ринку стали пропонувати протитурбулентні присадки з тією ж гідравлічно активною частиною, але у вигляді водної емульсії: CDR-202, Liquid Power™ («СОПОС»); вуглеводневої: FLO XL «Baker Pipeline Products» і Necadd-447 «Fortum Oil and Gas Oy».

Це дає можливість отримати присадку з великим вмістом полімеру – до 20–25 %.

Характеристики ПТП деяких фірм-виробників наведено в таблиці.

Таблиця

**Характеристики ПТП деяких фірм-виробників**

Найменування присадки	Liquid Power™ «СОПОС»	FLO XL «Baker»	Necadd-547 «Fortum»	«Віол», Томськ
Призначення	МНП	МНП	МНП, МНВП	МНП
Агрегатний стан	дисперсія	дисперсія	гель	гель
Колір присадки	білий	сірий	безбарвний	жовтуватий
Густина, кг/м <sup>3</sup>	970	960	769	800
В'язкість (20 С) сПз	250–400	200–250	44 000	–
Температура кипіння, °С	100	120	126	–
Розчинність у воді	не розчиняється	диспергує	не розчиняється	не розчиняється
Розчинність у нафті	розчиняється	розчиняється	розчиняється	розчиняється
Вміст гідралічно активного полімеру, % (мас.)	23,7	даних немає	5,5   10	–

Особливістю протитурбулентних присадок, яка визначає міру зниження гідралічного опору нафтопроводу в процесі їх застосування, є високі вимоги до ступеня чистоти продукту, в зв'язку з чим ринкова вартість імпортованих ПТП сягає від 12 000 дол. США за тону. Суттєво дешевшою є присадка «Віол» виробництва РФ 173143 руб./т (5 585 дол. США) [1]. Однак її дефіцит потребує пошуку нових дешевих замінників.

Дехто з дослідників [2, 3] пропонує як протитурбулентні присадки використовувати технічний поліакриламід (ПАА) та карбоксиметилцелюлозу (КМЦ).

Поліакриламід – високомолекулярний полімер акриламід (аміду акрилової кислоти), являє собою безбарвний кристал. Хімічна формула:  $[CH_2=CHC(O)NH_2]_n$ , молекулярна маса: 71,08; температура плавлення: 84,5 °С, кипіння: 215 °С; тиск пружних парів: 0,93 Па при  $t=25$  °С і 9,3 Па при  $t=50$  °С. Добре розчинний у воді і спиртах.

Сьогодні широко застосовують водорозчинні полімери на основі акриламід, об'єднані загальною назвою «Поліакриламід». До цієї групи входять: поліакриламід (ПАА) – неіоногенний полімер, його аніонні похідні, наприклад частково гідролізований ПАА, й катіонні похідні, наприклад полівініламін, а також сополімери з різними іоногенними і неіоногенними мономерами. Полімери й сополімери з різною молекулярною масою, молекулярно-масовим розподілом, хімічним складом і розподілом ланок вихідних мономерів уздовж ланцюга, лінійні, розгалужені і зшиті мають різне функціональне призначення і різні сфери застосування.

Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ, целюлозогліолева кислота,  $[C_6H_7O_2(OH)_3-x(OCH_2COOH)_x]_n$ , де  $x=0,08-1,5$ ) – похідна целюлози, в якій карбоксиме-

тильна група ( $-CH_2-COOH$ ) з'єднується гідроксильними групами глюкозних мономерів. Є слабкою кислотою, безбарвна. Вперше синтезована і запатентована німецьким хіміком Янсенем у 1918 році. Зовнішній вигляд: світло-бежевий кристалічний порошок, рН (1 % розчин у воді): 7,7. У хімічній, харчовій і медичній промисловості найбільш часто використовують як натрієву сіль – натрій-карбоксиметилцелюлозу (На-карбоксиметилцелюлозу), водні розчини якої в'язкі, псевдопластичні, а у деяких сортів – тиксотропні. На-карбоксиметилцелюлозу застосовують як пластифікатор, загущувач. Використовують також у виробництві клею (наприклад, клею бустилат). Глинисті суспензії На-карбоксиметилцелюлози використовують у ході буріння. Вона також входить до складу мийних засобів та наповнювачів для акумуляторів холоду.

Широкий вибір різних типів і марок протитурбулентних присадок на світовому ринку висуває завдання щодо порівняльного аналізу ефективності їх застосування під час транспортування різних нафт і нафтопродуктів. При цьому потрібно порівнювати не лише ступінь зниження гідралічного опору, а й техніко-економічні показники.

Дотепер порівняльного аналізу ефективності застосування ПТП різних типів у фаховій літературі не було. Це пов'язане, по-перше, із тим, що різні типи протитурбулентних присадок у суміші з різними видами нафт і нафтопродуктів показують різну ефективність, тобто різний ступінь зниження гідралічного опору. Навіть використання конкретного типу ПТП у суміші з стандартним нафтопродуктом, але виготовленим із різних нафт різними виробниками показує різну ефективність зниження гідралічного опору нафтопроводу. По-друге, кожен розробник проводить випробування тільки власної продукції, а по-третє, зазначені випробування проводяться в нестандартних умовах. У [4] запропоновано використовувати для порівняльного аналізу ефективності різних типів ПТП критерій Рейнольдса і Дебори.

Критерій Дебори, або число Дебори ( $De$ ), – це критерій подібності в реології, що показує ступінь текучості матеріалу в експерименті. Число Дебори визначається як відношення

$$De = \frac{t_p}{t_n}, \quad (1)$$

де  $t_p$  – характерний час релаксації матеріалу,  $t_n$  – характерний час спостереження.

Якщо час спостереження перевищує характерний час релаксації, то матеріал тече, тобто чим менше число Дебори, тим плинніший матеріал у рамках проведеного експерименту. Критерій був введений М. Рейнером, який і запропонував назву [5], критерій може бути застосовано до рідин Максвелла, але не до рідин Кельвіна–Фойгта.

Обробка експериментальних даних, що містяться в роботах [5–8], дозволила стверджувати таке.

За розвинених чисел Рейнольдса величина числа Дебори на малих діаметрах труб істотно більша, ніж на великих діаметрах. Це свідчить, зокрема, про

неможливість прямого перенесення подібних результатів на промислові трубопроводи. Із дослідів [5] бачимо, що збільшення концентрації ПТП у паливі ТС-1 призводить до того, що число Дебори при сталому критерії Рейнольдса спочатку зростає, а потім починає зменшуватися. Це відповідає відомому факту [9] існування деякого порогового значення концентрації полімеру, перевищення якого сприяє зниженню гідравлічного ефекту від малих добавок високомолекулярних речовин. Навіть за розвиненого турбулентного режиму і досить значних добавок ПТП гудрону в гас показники числа Дебори невеликі. Це дає змогу зробити висновок про низьку ефективність використання цієї високомолекулярної речовини. Результати промислових експериментів із присадкою «ВІОЛ» [3, 4], в яких залежність числа  $De$  від  $Re_0$  обернено пропорційна, суперечать закономірностям, які спостерігаються у досліді із іншими ПТП. Як зазначено у [9], ефективне число Рейнольдса за турбулентного режиму перекачування нафтопродуктів із протитурбулентними присадками може бути знайдене:

$$Re = Re_0(1 + De^2), \quad (2)$$

де  $Re_0$  – число Рейнольдса за тих же умов, але за наявності присадки.

За такої постановки завдання прогнозування величини коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_n$  під час транспортування суміші нафтопродукту з ПТП зводиться до розробки методики обчислення числа Дебори  $De$  за відомого значення коефіцієнта гідравлічного опору під час транспортування чистого нафтопродукту  $\lambda_0$ . Використовуючи для коефіцієнта гідравлічного опору узагальнену формулу

$$\lambda = A Re^{-m},$$

перепишемо (2) у вигляді:

$$\left(\frac{A}{\lambda_n}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{A}{\lambda_0}\right)^{\frac{1}{m}} (1 + De^2). \quad (3)$$

Звідси знаходимо:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{(1 + De^2)^m}. \quad (4)$$

Як відомо [9], ефективність ПТП, яка характеризує ступінь зменшення гідравлічного опору,

$$\varphi = 1 - \frac{\lambda_n}{\lambda_0}. \quad (5)$$

Тепер, враховуючи (4), отримаємо

$$De = \sqrt[m]{\frac{1}{1-\varphi}} - 1. \quad (6)$$

Залежність (6) пов'язує ступінь ефективності присадки  $\varphi$  із критерієм Дебори, що дає змогу застосувати критерій Дебори для порівняння ефективності різних типів ПТП у різних умовах.

Графіки залежності числа Дебори від числа Рейнольдса для різних ПТП представлено на рис. 1, а–г. Для їх побудови використано дані [10, 11] і результати влас-

них експериментальних досліджень застосування домішок ПАА і КМС як ПТП під час перекачування дизельного палива і гасу з оптимальними концентраціями.

Неважко бачити, що розкид експериментальних точок істотний. Частково це пояснюється відмінністю концентрацій високомолекулярних речовин у перекачуваних рідинах.

Однак, мабуть, необхідно погодитися з [11], де написано, що «... різні полімери помітно відрізняються один від одного за своїми властивостями, і зниження рівня пульсації у них відбувається завдяки різним

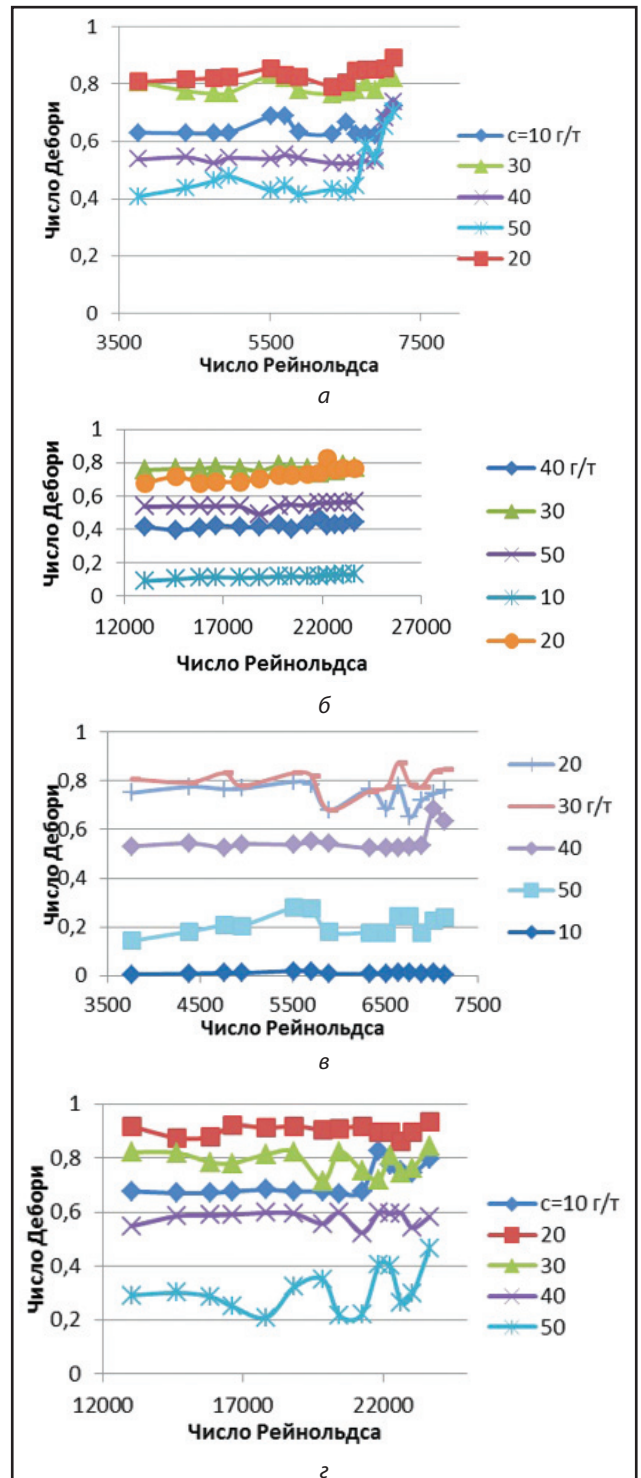


Рис. 1. Експериментальні залежності критерію Дебори від критерію Рейнольдса: а – дизельне паливо – ПАА; б – гас – ПАА; в – дизельне паливо КМС; з – гас – КМС

механізмам». Отримані експериментальні дані різних дослідників відрізняються умовами проведення дослідів, зокрема величиною критерію Рейнольдса, який має вирішальний вплив на ефективність ПТП.

$$De = \alpha_0 \theta^{\alpha_1} Re^{\alpha_2}, \quad (7)$$

де  $\theta$  – концентрація ПТП у г/т;  $\alpha_i (i=0,1,2)$  – сталі параметри для кожної пари «нафтопродукт–ПТП», які визначають за експериментальними даними, приведені на рис. 1.

Використовуючи формулу (7), нескладно виконати порівняльний аналіз ефективності застосування ПТП різних марок за однакових умов. Результати розрахунків числа Дебори за оптимальних концентрацій присадки і чисел Рейнольдса в межах 10 000 ... 100 000 наведено на рис. 2.

Оскільки великим значенням числа Дебори відповідають менші показники коефіцієнта гідравлічного опору, на підставі виконаних розрахунків можна зробити висновки про порівняну ефективність розглянутих присадок.

## Висновки

Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш ефективною присадкою з числа розглянутих як для транспортування дизельного палива, так і для гасу є Necadd-547. Дещо нижчі показники ефективності у присадки FLO XL. Потрібно зауважити, що ефективність присадок із зростанням числа Рейнольдса збільшується, що характерно для всіх без винятку ПТП.

Ефективність присадок ПАА і «Віол» знаходиться приблизно однакова. Дещо нижча ефективність присадки КМЦ, особливо для розчину в гасі.

Вибираючи тип ПТП, у кожному конкретному випадку необхідно враховувати вартість полімеру, яка, за даними [1], для імпортних продуктів сягає від 12 000 дол. США за тону, для присадки «Віол» – 5 585 дол. США за тону, а для вітчизняних ПАА і КМЦ – 2 090 і 1 800 дол. США за тону відповідно. Тому раціональне рішення щодо вибору ПТП у конкретних умовах необхідно приймати на основі техніко-економічного розрахунку.

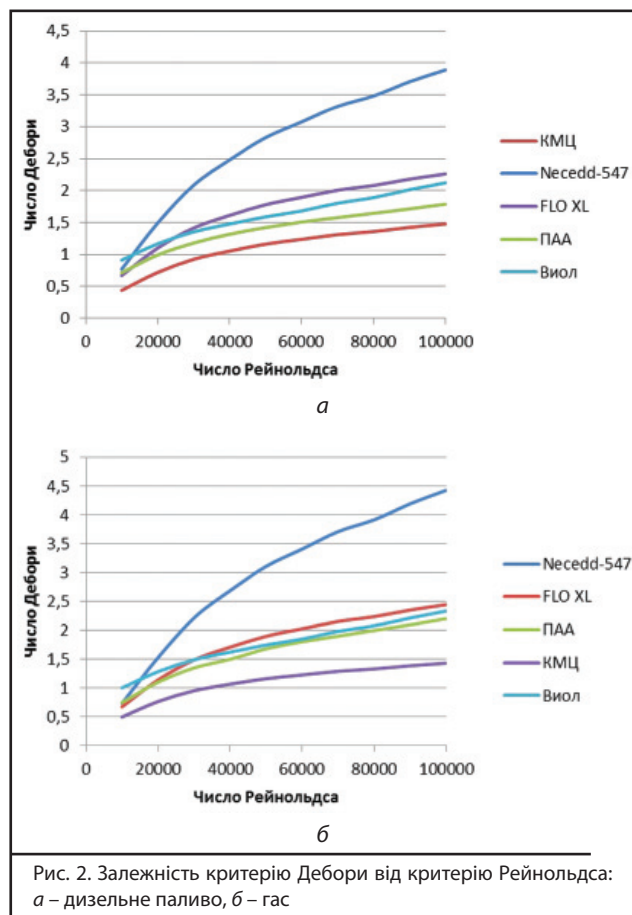


Рис. 2. Залежність критерію Дебори від критерію Рейнольдса: а – дизельне паливо, б – гас

Тому для порівняння різнотипних даних, отриманих у різноманітних умовах, використано методіку [11], яка базується на застосуванні формули

## Список використаних джерел

- Коновалов К.Б.** Разработка технологии и оценка эффективности производства антитурбулентной присадки суспензионного типа / К.Б. Коновалов, Г.В. Несын, Н.М. Полякова, В.С. Станкевич // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1(1). – С. 104–112.
- Порайко И.Н.** Снижение давления в промышленном нефтепроводе с помощью полиакриламида / И.Н. Порайко, А.И. Арутюнов // Нефтепромысловое дело. – 1978. – № 6. – С. 46–48.
- Белоусов Ю.П.** Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей / Ю.П. Белоусов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 145 с.
- Хуссейн М.Н.А.** Применение противотурбулентных присадок для улучшения гидравлических характеристик нефтепроводов / М.Н.А. Хуссейн, А.А. Коршак // Строительство. Коммунальное хозяйство. Насосы. Трубопроводы-2008: Мат. XII Междунар. научн.-техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2008. – Т. II. – С. 71–72.
- Кацюцевич Е.В.** Противотурбулентные полимерные добавки в трубопроводном транспорте нефтепродуктов / Е.В. Кацюцевич, Ю.П. Белоусов, Н.М. Гостев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1988. – № 6. – С. 9–12.
- Манжай В.Н.** Лабораторные исследования и промышленные испытания полимерной добавки для снижения энергетических затрат на магистральном нефтепроводе / В.Н. Манжай, А.В. Илюшников, М.М. Гареев, Г.В. Несын // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т. 65. – № 5. – С. 515–517.
- Ерошкина И.И.** Повышение пропускной способности магистральных нефтепродуктопроводов на основе применения противотурбулентных присадок: дис. канд. техн. наук / Ерошкина И.И. – М., 2003. – 146 с.
- Прохоров А.Д.** О коэффициенте гидравлического сопротивления магистральных нефтепродуктопроводов при перекачке дизельного топлива, обработанного противотурбулентной присадкой / Прохоров А.Д., Челинцев С.Н., Черников А.В. [и др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1999. – № 12. – С. 4–6.
- Макаров С.П.** Опыт применения противотурбулентной присадки на нефтепродуктопроводах ОАО «АК «Транснефтепродукт» / Макаров С.П., Фокин С.М. [и др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 4. – С. 14–17.
- Walsh M.** Theory of drag reduction in dilute high polymer flows / Walsh M. // Trans. Soc. Rheol. – 1978. – V. 27. – P. 134–137.
- Хуссейн М.Н.А.** Улучшение параметров работы нефтепроводов путем применения противотурбулентных присадок: Дис. канд. техн. наук / М.Н.А. Хуссейн. – Уфа, 2009. – 121 с.