

Технічні науки

УДК 622.692.4

**Люта Наталія Вікторівна**

*кандидат технічних наук, доцент,*

*доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

**Люта Наталия Викторовна**

*кандидат технических наук, доцент,*

*доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтеохранилищ*

*Ивано-Франковский национальный технический*

*университет нефти и газа*

**Liuta Nataliia**

*PhD, Associate Professor,*

*Department Oil and Gas Pipelines and Storage Facilities*

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

**Лісафін Володимир Петрович**

*кандидат технічних наук, доцент,*

*доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

**Лисафин Владимир Петрович**

*кандидат технических наук, доцент,*

*доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтеохранилищ*

*Ивано-Франковский национальный технический*

*университет нефти и газа*

**Lisafin Volodymyr**

*PhD, Associate Professor,*

*Associate Professor of the Department Oil and Gas Pipelines and Storage Facilities*

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

**МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛІВ  
НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАФТИ  
МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПОЛЕЙ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТИ  
MECHANISM OF MAGNETIC AND ELECTRIC FIELD INFLUENCE  
ON THE REOLOGIOUS PROPERTIES OF OIL**

*Анотація.* Обґрунтовано можливість застосування магнітного та електричного полів для впливу на реологічні властивості нафти та розглянуто перспективи використання цього явища на нафтопроводах України.

*Ключові слова:* нафтопровід, в'язкість нафти, електричне поле, магнітне поле.

*Аннотация.* Обоснована возможность применения магнитного и электрического полей для влияния на реологические свойства нефти и рассмотрены перспективы использования этого явления на нефтепроводах Украины.

*Ключевые слова:* Нефтепровод, вязкость нефти, электрическое поле, магнитное поле.

*Summary.* The possibility of applying magnetic and electric fields to influence the rheological properties of oil is substantiated and the perspectives of the use of this phenomenon on the oil pipelines of Ukraine are considered.

*Key words:* oil pipeline, oil viscosity, electric field, magnetic field.

Характерною особливістю сучасного нафтовидобутку є збільшення у світовій структурі сировинних ресурсів частки запасів, до яких належить важка нафта з в'язкістю 30 мПа·с і вище. Запаси таких видів нафти становлять не менше 1 трлн. тон, що більш, ніж у п'ять разів перевищує обсяг залишкових видобутих запасів нафти малої і середньої в'язкості. У багатьох

промислово розвинених країнах світу важка нафта розглядається в якості основної бази розвитку нафтовидобутку на найближчі роки. Оскільки в майбутньому добуватимуть все більше і більше важкої нафти, надійна технологія впливу на реологічні властивості сирової нафти набуває актуальності.

Першим досліджував поведінку рідкої суспензії, до складу якої входили в якості дисперсної фази однорідні сфери, що перебували в дисперсійному середовищі - рідині з в'язкістю  $\eta_0$ , А. Ейнштейн у 1905 році [1]. Він запропонував визначати в'язкість суспензії формулою

$$\eta = \eta_0 (1 + 2,5\phi) \quad (1)$$

для для концентрації дисперсної фази  $\phi < 0,01$ .

G.K. Batchelor 1977 році та W.B. Russel, D.A. Saville, W.R. Schowalter, пропонують ввести уточнення для випадку розбавлення суспензії [2,3,4].

Для високих значень  $\phi$ , слід враховувати максимальне значення об'ємної концентрації дисперсної фази  $\phi_m$ , щоб мати можливість для додавання частинок. Для рідинних суспензій  $\phi_m$  приблизно становить 0,64, але не більше за 0,74, максимальний коефіцієнт дефекта маси гранецентрованої кубічної (ГЦК) ґратки. Коли ми збільшимо концентрацію дисперсної фази суспензії  $\phi$  на величину  $d\phi$ , об'єм, що залишиться доступним для додавання сфер, дорівнюватиме  $1 - \phi/\phi_m$ . Зростання в'язкості становитиме

$$d\eta/\eta = 2,5d\phi/(1 - \phi/\phi_m).$$

Звідси, при високому  $\phi$ , в'язкість визначається як

$$\eta/\eta_0 = (1 - \phi/\phi_m)^{-2,5\phi_m}.$$

I.M. Krieger та T. J. Dougherty [5] запропонували таку залежність для визначення в'язкості суспензії

$$\eta/\eta_0 = (1 - \phi/\phi_m)^{-[\eta]\phi_m} \quad (2)$$

яка дає можливість визначити в'язкість для частинок будь-якої форми шляхом вибору відповідного  $[\eta]$ . Наприклад,  $[\eta]=5/2$  для частинок сферичної форми, і  $[\eta]=5,8$  для плоских частинок. У той час як  $[\eta]$  істотно змінюється для частинок різної форми, величина  $[\eta]\phi_m$  практично залишається незмінною та приблизно дорівнює 1,9 [4-5].

При високому  $\phi$ , розподіл частинок за розмірами також впливає на в'язкість. З наукової літератури [7-8] відомі результати експериментальних досліджень суспензій із монодисперсними мікронними та субмікронними частинками, які вказують на те, що за сталого  $\phi$ , із збільшенням розміру частинок зменшується в'язкість суспензії. Як зображено на рисунку 1а, наприклад, при  $\phi=15\%$ , суспензія із частинок розміром 10,0 мкм має в'язкість тільки 23,9% від в'язкості суспензії з частинок розміром 0,05 мкм.

S. Matsumoto та D. G. Thomas [7-8] пропонують емпіричну формулу для визначення коефіцієнту максимальної упаковки  $\phi_m$ , що зростає із збільшенням розміру частинок:

$$1/\phi_m = 1,079 + e^{0,01008/D} + e^{0,0029/D^2},$$

де  $D$  – діаметр частинок в мікронах.

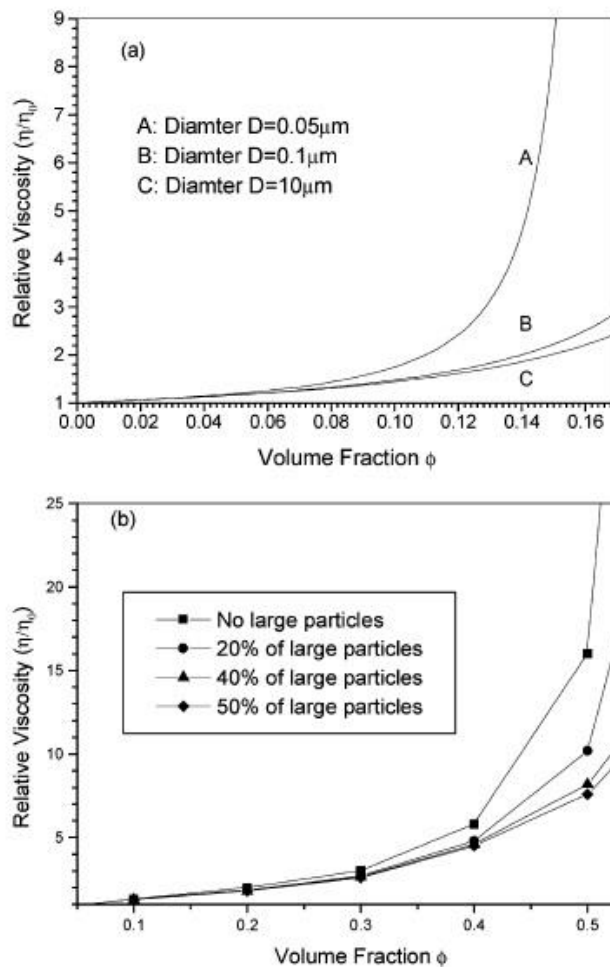
Оскільки на даний час немає ґрунтовних досліджень такого впливу розміру частинок, наступне пояснення допоможе зрозуміти його суть. Як правило, ефективна в'язкість залежить від того, наскільки рухомими є зважені частинки в суспензії. Чим менш рухомими є частинки, тим швидше розсіюється енергія і тим вища ефективна в'язкість. Середня довжина вільного пробігу сфер всередині суспензії визначається як

$$\lambda \approx a/(3\phi),$$

де  $a$  – радіус частинки.

Зі збільшенням  $a$ ,  $\lambda$  стає довшим, що вказує на те, що зважені частинки мають більше свободи для переміщення в суспензії. Таким чином,  $\eta$  зменшується.

Значення  $\phi_m$  в рівнянні (2) також збільшуються зі збільшенням полідисперсії [6]. Наприклад, коли відношення кількості великих частинок до кількості малих у суспензії з бінарним розподілом частинок за розміром збільшується, в'язкість суттєво зменшується (рисунок 1 б): якщо  $\phi \geq 50\%$ , коли співвідношення досягає 1:1, в'язкість знижується більш, ніж на 50% в порівнянні з монодисперсною суспензією.



а - залежність відносної в'язкості від концентрації дисперсної фази і розмірів частинок для монодисперсних суспензій;

б - залежність відносної в'язкості від концентрації дисперсної фази і розподілу частинок за розмірами; в'язкість в порівнянні з об'ємної частки частинок і частки розподіл.

Співвідношення розміру часток становить 5:1

**Рис. 1.** Вплив розподілу частинок за розмірами на в'язкість суспензії [10, с. 2047]

Для бінарного розподілу частинок за розмірами, можна вважати, що дрібні частинки ущільнюють дисперсійну (рідку) фазу, а більші частинки ущільнюють дисперсну (тверду) фазу; тому можна записати, що

$$\eta = \eta_o \cdot (1 - \phi_1 / \phi_{m1})^{-[\eta_1] \cdot \phi_{m1}} \cdot (1 - \phi_2 / \phi_{m2})^{-[\eta_2] \cdot m_2}.$$

Це значення буде меншим, ніж у суспензії з однорідних дрібних частинок з об'ємною концентрацією дисперсної фази  $\phi_1 + \phi_2$ .

Крім того, експерименти також показують, що в'язкість суспензії з великими зваженими частинками, яка рухається через капілярні трубки додатково знижується через тенденцію великих частинок рухатися до центра труби [9].

З наведеного вище видно, що агрегування дрібних частинок до великих у рідкій суспензії знизить ефективну в'язкість за умови, що  $\phi$  залишається незмінним. Для більшості суспензій, таку агрегацію можна реалізувати за допомогою електричного або магнітного поля.

У роботі [10, с. 2047] американський та китайський дослідники Р. Тао та Х. Ху розглянули вплив магнітного поля на в'язкість суспензій, але аналогічні фізичні процеси притаманні й електричному полю. Вони припустили, що магнітна проникність  $\mu_p$  частинок відрізняється від  $\mu_f$  базової рідини. У магнітному полі частинки поляризовані в напрямку поля. Якщо частинки є однорідними сферами радіусом  $a$ , то дипольний момент дорівнює

$$\vec{m} = \vec{H} \cdot a^3 \cdot (\mu_p - \mu_f) / (\mu_p + 2 \cdot \mu_f),$$

де  $\vec{H}$  – магнітне поле, що діє на сферу.

Взаємодія між двома наведеними індукованими магнітними диполями виражається

$$U = \mu_1 \cdot m^2 \cdot (1 - 3 \cos^2 \theta) / r^3,$$

де  $r$  – відстань між ними;

$\theta$  - кут між полем і лінією, що з'єднує два диполі.

Якщо взаємодія досить сильна, щоб подолати броунівський рух, частинки агрегуються і вирівнюються в напрямку поля.

Якщо ця взаємодія дуже сильна, частинки швидко об'єднуються в макроскопічні ланцюжки або стовпці, створюючи перешкоди для потоку рідини і збільшуючи в'язкість з магнітним полем. Це явище досить відоме, коли йде мова про магнітореологічні та електрореологічні рідини.

З іншої сторони, якщо застосувати короткі імпульси магнітного потоку, таким чином, що прикладеного часу недостатньо, щоб дипольна взаємодія вплинула на частинки, що знаходяться на макроскопічних відстанях одна від одної, але достатньо, щоб об'єднати частинки, що знаходяться поруч. Такі об'єднання мають обмежені розміри, скажімо, в діапазоні мікрометрів. Хоча деякі частинки піддаються агрегації, розмір агрегованих частинок збільшується. Під час використання поля, в'язкість швидко змінюється.

Проте, після того, як магнітне поле вимкнено, в'язкість суспензії стає початковою. Це відображає той факт, що поки об'ємна концентрація дисперсної фази залишається незмінною, розподіл часток за розмірами змінюється: зростає як кількість великих частинок, так і полідисперсія.

Важливо відзначити, що цей метод впливу на в'язкість не є наслідком зміни температури суспензії. Зниження стає більш вираженим, коли об'ємна концентрація дисперсної фази  $\phi$  зростає. Таким чином, імпульс електричного чи магнітного поля більш ефективний для щільних суспензій, ніж для розбавлених.

Оцінимо мінімальне магнітне поле  $H_c$ , необхідне для об'єднання частинок. Для щільності частинок  $n$ , типова відстань між двома сусідніми частинками становить близько  $n^{-1/3}$ , а їхня дипольна взаємодія становить

$m^2 n \mu_1$ . Ця взаємодія має подолати тепловий броунівський рух, щоб звести їх разом. Таким чином, необхідно, щоб виконувалася умова

$$\mu_1 m^2 n / (k_B T) \geq 1,$$

де  $k_B$  – стала Больцмана,

$T$  – абсолютна температура.

Звідси, маємо формулу для визначення критичного поля

$$H_c = \left[ k_B \cdot T / (n \mu_f) \right]^{1/2} \cdot (\mu_p + 2\mu_f) / \left[ a^3 \cdot (\mu_p - \mu_f) \right] \quad (3)$$

Для зміни в'язкості рідкої суспензії, прикладене магнітне поле не може бути меншим, ніж  $H_c$ . Це досить сильно відрізняється від магнітореологічних та електрореологічних рідин, для яких співвідношення  $\mu_1 m^2 n / (k_B T)$  перевищує у сотні разів. У цьому випадку потрібно, щоб дипольна взаємодія не була слабшою за тепловий рух.

Оцінимо необхідну тривалість імпульсу. Сила між двома сусідніми частинками становить близько  $6\mu_1 m^2 n^{4/3}$ . Від цієї сили і сили опору Стокса  $6\pi\eta_0 v$  ми розраховуємо середню швидкість руху частинок

$$v = \mu_1 m^2 n^{4/3} / (\pi\eta_0 a).$$

Час, необхідний для того, щоб дві сусідні частинки об'єдналися становитиме

$$\tau = n^{-1/3} / v = \pi\eta_0 \cdot (\mu_p + 2\mu_f)^2 / \left[ \mu_1 n^{5/3} a^5 \cdot (\mu_p - \mu_f)^2 H^2 \right] \quad (4)$$

Якщо імпульс магнітного поля набагато коротший, ніж  $\tau$ , часу не вистачить для агрегації. Якщо імпульс триває набагато довше, ніж  $\tau$ , можуть бути сформовані макроскопічні ланцюжки, які уповільняють рух потоку, що є небажаним для зниження в'язкості. Таким чином, для зниження в'язкості, тривалість імпульсу повинна бути на в межах  $\tau$ .



Щоб застосувати наведені вище рівняння у випадку електричного поля, потрібно замінити магнітну проникність відповідною діелектричною проникністю [10, с. 2050].

Агреговані частинки зазвичай витягнуті уздовж поля. Таким чином, в'язкість може бути додатково зменшена, якщо напрям потоку і поля паралельні.

Після вимкнення поля, взаємодія зникає і агреговані частинки під впливом броунівського руху поступово розпадаються. Тому в'язкість буде поступово збільшуватися, і, після того, як всі агреговані частинки розпадаються, повернеться до початкового значення. Оцінимо інтервал часу, необхідний для зниження в'язкості. За відсутності впливу інших чинників, як це буває при статичному потоці чи при постійному потоці, частинки в суспензії відокремлюються дифузно, тільки за рахунок броунівського руху з коефіцієнтом дифузії  $k_B T / (6\pi a \eta_o)$ . Дві, початково поєднані між собою, сфери радіусом  $a$ , віддаляються одна від одної на відстань  $a$  в інтервалі часу  $3\pi a^3 \eta_o / (k_B T)$ . Якщо  $a = 3$  мкм і  $\eta_o = 1$  П, розрахунковий час розпаду за кімнатної температури становить приблизно 2 години. Таким чином, цей процес розпаду на частинки йде повільно і знижена в'язкість тримається протягом декількох годин, що досить довго для багатьох важливих застосувань. Після того, як всі агреговані частинки розпадаються, суспензія повертається до реологічного стану, що передувало впливу імпульсу магнітного поля. Таким чином, в'язкість повертається до початкового значення. Повторне застосування імпульсу магнітного поля буде знову зменшувати в'язкість. Процес можна повторювати [10, с. 2051].

Описані вище явища можна використовувати для покращення реологічних властивостей нафт, що мають високу в'язкість або виражені аномальні реологічні властивості. Зокрема, нафти Долинського родовища, що характеризується дуже високою в'язкістю і нестабільністю при незначних

змінах температури. Це пояснюється тим, що дана нафта має дуже високий вміст (порівняно зі звичайною) парафінових частинок, що в свою чергу впливає на її транспортабельні властивості. Долинську високопарафіністу швидкозастигаючу нафту транспортують за допомогою методу перекачування з попереднім підігрівом [11, с. 49]. За високих температур (вищих за температуру застигання) дана нафта проявляє властивості ньютонівської рідини, що дає змогу проводити транспортування в режимі звичайного перекачування. Однак, по ходу траси нафтопроводу нафта охолоджується і в певній точці нафтопроводу температура досягає значення прояву аномальних властивостей. Під аномальними властивостями розуміють початок кристалізації парафінових частинок в більш крупні частини, що призводить до погіршення реологічних характеристик нафти. У цей момент нафту можна розглядати як суспензію, що складається з рідкої фази та дисперсної фази у вигляді частинок парафіну, на укрупнення та впорядкування яких можна вплинути, застосувавши магнітне поле відповідної величини  $H_c$  протягом часу  $\tau$ .

### **Література**

1. Einstein A. Ann. Phys. – 1905. – Ed. 17 (4). – 549 p.; 1906. – Ed. 19 (289). 371 p.
2. Colloidal Dispersion. Russel W. B., Saville D. A., Schowalter W. R. – Cambridge University Press: Cambridge, 1989. P. 456-503.
3. Batchelor G. K. J. Fluid Mech. 1977. P. 83, 97-117.
4. Mooney, M. J. Colloid Sci. 1951, 6, 162.
5. Krieger I. M. Trans. Soc. Rheol / Krieger I. M., Dougherty T. J. 1959. Ed. 3. P. 137-152.
6. Barnes H. A. An introduction to rheology / Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K. – Elsevier: Amsterdam, 1989. P. 119-127.

7. Matsumoto S. J. Colloid, Interface Sci / Matsumoto S., Sherman P. 1969. Ed. 30. P. 525- 536.
8. Thomas D. G. J. Colloid Sci. 1965. Ed. 20. P. 267-277.
9. Serge G. J. Fluid Mech / Serge G., Silibergerg A. 1951. Ed. 14. 86 p.
- 10.Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field. Tao R., X. Xu / Energy & Fuels, 2006 (20). P. 2046-2051.
- 11.Аналіз ефективності впливу термообробки нафти на гідравлічні втрати в магістральному нафтопроводі./ Л.Д. Пилипів // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», №10 (50), 2т., 2018. С. 48 – 50.