

Технічні науки

УДК 622.692.4

**Григорський Станіслав Ярославович**

*кандидат технічних наук,*

*доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

**Григорский Станислав Ярославович**

*кандидат технических наук,*

*доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ*

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

**Hryhorskyi Stanislav**

*PhD, Associate Professor of the*

*Department of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storages*

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

**РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ВОДЯНИХ СКУПЧЕНЬ В  
МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОПРОВОДАХ ВНАСЛІДОК ЗУПИНОК  
ПЕРЕКАЧУВАННЯ**

**РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ВОДНЫХ СКОПЛЕНИЙ В  
МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ОСТАНОВОК ПЕРЕКАЧКИ**

**CALCULATION THE PROCESS OF FORMATION OF WATER  
ACCUMULATIONS IN OIL PIPELINES AS A RESULT  
OF PUMPING STOPPING**

*Анотація.* Досліджено процес осідання дрібних крапель води в порожнині магістрального нафтопроводу після зупинки перекачування. Виявлено закономірності впливу сезонних чинників на швидкість осідання крапель води. Отримано узагальнену формулу для розрахунку швидкості

руху крапель води в нерухомій нафті залежно від її фізико-хімічних властивостей та розмірів крапель.

**Ключові слова:** магістральний нафтопровід, зупинка перекачування, швидкість осідання води, режим руху краплі води, коефіцієнт лобового опору.

**Аннотація.** Исследован процесс оседания мелких капель воды в полости магистрального нефтепровода после остановки перекачки. Выявлены закономерности влияния сезонных факторов на скорость оседания капель воды. Получено обобщенную формулу для расчета скорости движения капель воды в неподвижной нефти в зависимости от ее физико-химических свойств и размеров капель.

**Ключевые слова:** магистральный нефтепровод, остановка перекачки, скорость оседания воды, режим движения капли воды, коэффициент лобового сопротивления.

**Summary.** The process of settling of small water droplets in the cavity of the main oil pipeline after stopping the pumping was investigated. The regularities of the influence of seasonal factors on the sedimentation rate of water droplets had been revealed. A generalized formula was obtained for calculating the speed of movement of water droplets in motionless oil, depending on its physical and chemical properties and droplet size.

**Key words:** main oil pipeline, pumping stop, water sedimentation rate, water droplet motion mode, drag coefficient.

Можливість існування водяних скупчень в магістральних нафтопроводах показана у численних дослідженнях вітчизняних та зарубіжних вчених [1-5]. Скупчення води можуть утворюватися внаслідок планових та непланових зупинок нафтопроводу, неповного видалення води

під час проведення ремонту, випробування та пуску нафтопроводу в експлуатацію та перекачування нафти із певним вмістом води.

Під дією потоку нафти за певних умов скупчення води в нафтопроводі розмиваються, розпадаючись на окремі краплі. Розміри крапель, як показали експерименти, мають діаметр 2-3 мм [6]. Внаслідок зупинки перекачування краплини води, що містяться у нафті під дією сили тяжіння осідають на нижню частину внутрішньої порожнини нафтопроводу.

Процес руху крапель води в нерухомій нафті можна розглядати як падіння частинки діаметром  $d_{кр}$  у рідині з меншою густиною, яка створює певний опір переміщенню (рис. 1). Рівняння руху краплі води відповідно до другого закону Ньютона має вигляд

$$m_{кр} \cdot \bar{a} = \bar{G}_{кр} + \bar{F}_a + \bar{F}_{on}, \quad (1)$$

де  $m_{кр}$ ,  $G_{кр}$  – відповідно маса та вага краплі води;

$a$  – прискорення, з яким крапля води рухається в нафті;

$F_a$ ,  $F_{on}$  – відповідно виштовхувальна (підіймальна) сила та сила опору рідкого середовища, що діють на краплю.

Сили, які діють на краплину води в нерухомій нафті визначаються за формулами:

- сила тяжіння (вага краплі)

$$G_{кр} = m_{кр} \cdot g = \rho_v \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^3}{6} \cdot g; \quad (2)$$

- сила Архімеда (сумарна сила тиску, що діє на краплю в нафті)

$$F_a = \rho_n \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^3}{6} \cdot g; \quad (3)$$

- сила опору при русі краплі (сила в'язкого тертя)

$$F_{on} = \xi \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^2}{4} \cdot \frac{\rho_n \cdot w^2}{2}, \quad (4)$$

де  $\rho_v, \rho_n$  – відповідно густина води та нафти;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $\xi$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору середовища;  
 $w$  – швидкість руху (осідання) краплі води.

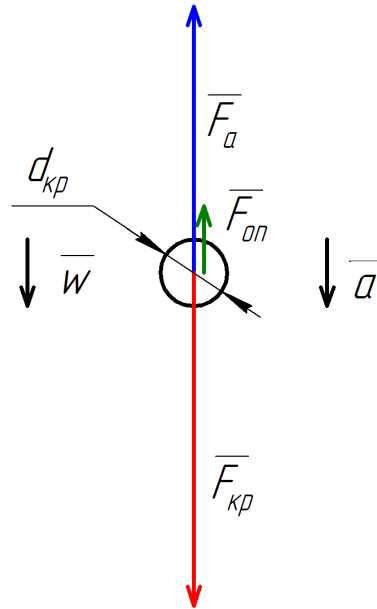


Рис. 1. Сили, що діють на краплину води в нерухомій нафті

Коефіцієнт опору рідкого середовища (лобового опору) визначається за узагальненою напівемпіричною формулою [7]

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}^m}, \quad (5)$$

де  $A$  – сталий коефіцієнт для певного режиму руху краплі;  
 $m$  – показник режиму руху краплини води;  
 $\text{Re}$  – число Рейнольдса для процесу осідання краплі води у нафті,

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_{kp}}{\nu_n}, \quad (6)$$

$\nu_n$  – кінематична в'язкість нафти.

Вказані коефіцієнти у формулі (5) приймають наступні значення [7]:

- ламінарний режим руху краплі (застосовується формула Стокса),  
якщо  $\text{Re} \leq 2$

$$A = 24, \quad m = 1; \quad (7)$$

- перехідний режим руху краплі (застосовується формула Аллена) у випадку  $2 < Re \leq 500$

$$A = 18,5, \quad m = 0,6; \quad (8)$$

- турбулентний режим руху краплі за умови  $Re > 500$

$$A = 0,44, \quad m = 0. \quad (9)$$

Рівняння (1) в проекції на вертикальну вісь з урахуванням формул (2)-(6), після математичних перетворень набуде вигляду

$$a = \frac{dw}{dt} = a_0 - b_0 \cdot w^{2-m}, \quad (10)$$

де  $a_0, b_0$  – коефіцієнти, що визначаються за формулами

$$a_0 = (1 - \Delta_n) \cdot g, \quad \frac{M}{c^2}, \quad (11)$$

$$b_0 = \frac{3 \cdot \Delta_n \cdot A \cdot v_n^m}{4 \cdot d_{кр}^{m+1}}, \quad \frac{M^{m-1}}{c^m}, \quad (12)$$

$$\Delta_n = \frac{\rho_n}{\rho_e}, \quad (13)$$

$\Delta_n$  – відносна густина нафти.

Значимо, що коефіцієнт  $a_0$  показує прискорення руху краплі води в момент часу  $t = 0$ , а коефіцієнт  $b_0$  – швидкість зміни прискорення краплі води в часі.

Розв'язавши диференціальне рівняння (10) для граничних випадків, отримуємо такі залежності для розрахунку прискорення краплі води у нафті в часі:

- ламінарний режим руху

$$a = a_0 \cdot \exp(-b_0 \cdot t); \quad (14)$$

- турбулентний режим руху

$$a = a_0 \cdot \left[ 1 - \operatorname{th}^2 \left( \sqrt{a_0 \cdot b_0} \cdot t \right) \right]. \quad (15)$$

Використовуючи залежності (14) та (15) можна оцінити час  $\tau$ , впродовж якого прискорення осідання краплі води зменшиться в  $10^3$  разів в порівнянні з початковим значенням при  $t = 0$ . Іншими словами час  $\tau$  буде дорівнювати часу стабілізації руху краплі ( $a \approx 0, w = const$ ). Наприклад, для краплі діаметром  $d_{кр} = 2$  мм за відносної густини нафти  $\Delta_n = 0,85$  та кінематичної в'язкості нафти  $\nu_n = 20$  сСт, що відповідає ламінарному режиму руху, час  $\tau$  становить 0,1 с. За значення кінематичної в'язкості нафти  $\nu_n = 0,4$  сСт, що відповідає турбулентному режиму руху краплі момент часу  $\tau$  складає 0,3 с. Повний час осідання краплини води в порожнині нафтопроводу при її русі від верхньої до нижньої твірної трубопроводу становить десятки секунд [5]. Отже, можна зробити висновок, що процес осідання краплі в нерухомій нафті буде усталеним впродовж всього часу руху в порожнині трубопроводу.

Прирівнявши до нуля ліву частину виразу (10) можна отримати узагальнену формулу для розрахунку швидкості рівномірного осідання краплі води

$$w_o = \left( \frac{a_0}{b_0} \right)^{\frac{1}{2-m}} = \left[ \frac{4 \cdot g \cdot d_{кр}^{m+1}}{3 \cdot A \cdot \nu_n^m} \cdot \left( \frac{1}{\Delta_n} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2-m}}. \quad (16)$$

Складність формули (16) полягає в тому, що коефіцієнти режиму руху  $A$  та  $m$  є невідомими. Їх необхідно визначати за допомогою методу послідовних наближень з обов'язковою перевіркою режиму руху за формулою (6). Для того, щоб уникнути методу ітерацій при розрахунку швидкості руху краплі в нерухомій нафті підставляємо значення швидкості осідання  $w_o$  з виразу (16) у формулу (6) для визначення числа Рейнольдса. Прирівнявши праву частину отриманого виразу (6) з перехідними значеннями чисел Рейнольдса, отримуємо формули для розрахунку

першого  $\nu_I$  та другого  $\nu_{II}$  перехідних значень кінематичної в'язкості нафти ( $m^2/c$ ):

$$\nu_I = 0,5219 \cdot d_{кр}^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta_H} - 1}; \quad (17)$$

$$\nu_{II} = 1,085 \cdot 10^{-2} \cdot d_{кр}^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta_H} - 1}. \quad (18)$$

Тоді при виконанні наступних умов реалізуються такі режими руху краплі:

- ламінарний режим ( $A = 24$ ;  $m = 1$ ) за умови  $\nu_n \geq \nu_I$ ;
- перехідний режим режим ( $A = 18,5$ ;  $m = 0,6$ ) за умови  $\nu_{II} \leq \nu_n < \nu_I$ ;
- турбулентний режим ( $A = 0,44$ ;  $m = 0$ ) за умови  $\nu_n < \nu_{II}$ .

Тобто для розрахунку швидкості осідання краплі води за формулою (16) спочатку визначаємо перехідні значення кінематичної в'язкості нафти за формулами (17), (18) та вибираємо відповідні значення коефіцієнтів режиму руху ( $A$ ,  $m$ ) залежно від фактичної в'язкості нафти  $\nu_n$ .

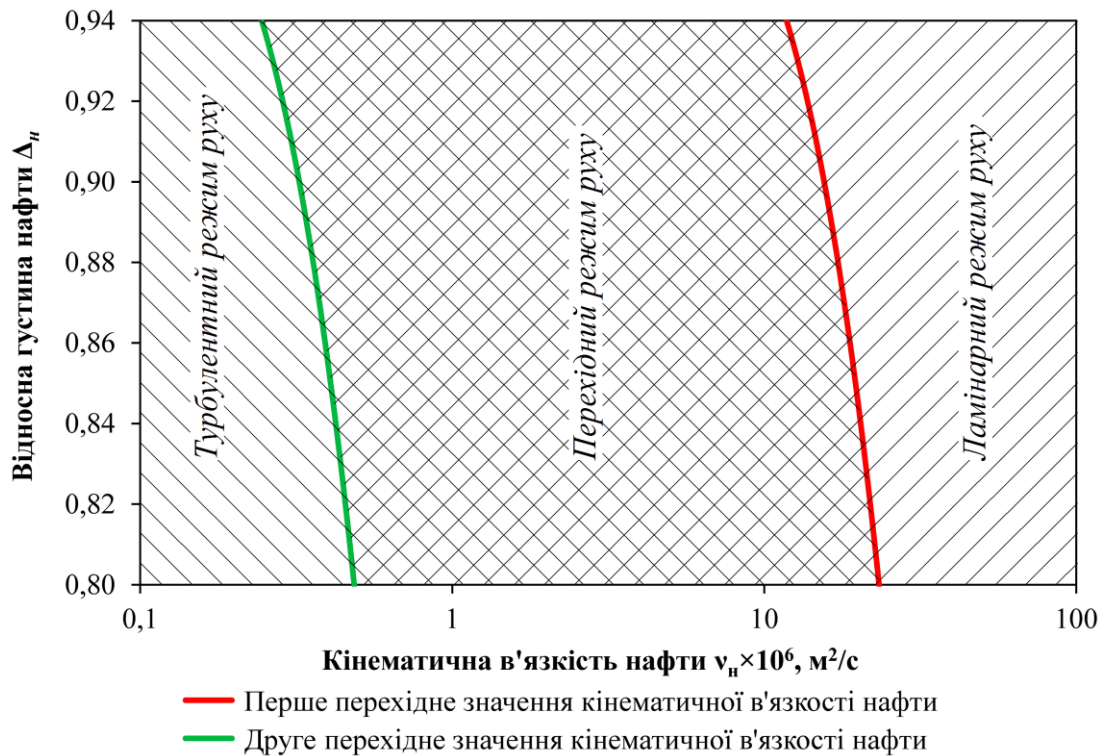
На рисунку 2 показано діаграму розподілу режиму руху краплі залежно від фізичних властивостей нафти. З даного рисунка видно, що при збільшенні густини нафти перехідні значення кінематичної в'язкості нафти зменшуються. Тобто для більш важких нафт перехід від одного до другого режиму руху здійснюється при менших значеннях кінематичної в'язкості нафти і навпаки.

Повний час осідання краплини води в порожнині трубопроводу від верхньої до нижньої твірної можна визначити за формулою

$$\tau = \frac{d}{w_0 \cdot \cos \alpha}, \quad (18)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр ділянки нафтопроводу

$\alpha$  – кут нахилу ділянки нафтопроводу до горизонту.



**Рис. 2. Діаграма режимів руху краплі води діаметром 2 мм залежно від фізичних властивостей транспортованої нафти**

З аналізу формул (16) та (18) можна зробити висновок, що за зимових умов перекачування швидкість осідання крапель води зменшується та відповідно збільшується час їх руху до нижньої твірної трубопроводу у порівнянні з літніми умовами. Тому особливо небезпечними є довготривалі зупинки перекачування у теплий період року, коли швидкість осідання крапель води майже у два-три рази більша, ніж у холодний [8].

### **Висновки**

1. Виявлено закономірності впливу сезонних чинників на швидкість осідання крапель води у потоці нафти після зупинки процесу перекачування нафти.
2. Результати теоретичних досліджень засвідчили, що режим руху краплі води в нерухомій нафті за умов магістральних нафтопроводів залежно від в'язкості нафти може бути ламінарним або перехідним.



3. Отримано узагальнену формулу для розрахунку швидкості осідання крапель води залежно від фізичних властивостей нафти без застосування методу послідовних наближень. Для знаходження режиму руху краплі розроблено залежності за якими розраховуються перехідні значення в'язкості нафти.

### Література

1. Кутуков С. Е. Проблема построения технологической модели нефтепровода. Водные скопления / Кутуков С. Е. // Нефтегазовое дело (сетевое издание). 2004. № 2. URL: <http://ogbus.ru/article/view/problema-postroeniya-technologicheskoy-modeli-nefteprovoda-vodnye-skopleniya>.
2. Кутуков С. Е. Характеристика участка нефтепровода со скоплением воды / Кутуков С. Е., Бажайкин С. Г., Мухаметшин Г. Р. / Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 4 (106). С. 118-125.
3. Angeli P., Hewitt G.F. Flow Structure in Horizontal Oil-Water Flow // *Int. J. of Multiphase Flow*. 2000. № 26. P. 1117-1140.
4. Chun M.-H. & Sung C.-K. Onset of Slugging Criterion Based on Characteristics and Stability Analyses of Transient One-Dimensional TwoPhase Flow Equations of Two-Fluid Model / *Int.Comm. Heat Mass Transfer*. Vol.23. № 4, 1996. PP. 473-484.
5. Al-Safran E. Two-Phase Flow in a Hilly-Terrain Pipeline // TUFFP report. Advisory Board Meeting. 2000. Nov. 16. PP. 121-145.
6. Порядок очищення лінійної частини магістральних нафтопроводів ПАТ «Укртранснафта». Київ: АТ «Укртранснафта». 2018. 55 с. [Введ. наказом № 71 від 07.03.2018].
7. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: [учебник для вузов] / [Скобло А. И., Молоканов Ю. К., Владимиров А. И., Щелкунов В. А.] 3-е изд., перераб. и доп. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 677 с.

8. Теоретичні дослідження поступового виносу скупчень води з порожнини нафтопроводу / С. Я. Григорський // Матеріали III Міжнародної наукової конференції «Наукові дослідження: парадигма інноваційного розвитку» 26-30 травня 2020 р. Братислава – Відень, 2020. С. 15-17.