

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІСНЕННЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ З ГАЗОПРОВОДУ

В. М. Боднар , **К. В. Новіков** 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: vitalii.bodnar@nung.edu.ua

Розглядається процес очищення магістральних газопроводів очисними поршнями манжетного типу від рідинних скупчень, що утворюються під час транспортування природного газу. Особливу увагу приділено вивченню гідродинамічних процесів, які виникають під час переміщення поршня в газопроводі, заповненому рідиною з не ньютонівськими властивостями. У роботі досліджено взаємодію рідинного скупчення з твердим тілом (очисним поршнем), що рухається з постійною швидкістю, та проаналізовано вплив фізико-механічних властивостей рідини на ефективність очищення трубопроводу.

На основі аналітичних досліджень отримано закономірності розподілу лінійних швидкостей по площі поперечного перерізу трубопроводу та уздовж довжини рухомого рідинного скупчення. Побудовано також залежності розподілу тиску в середовищі рідкої фази, які відображають характер взаємодії потоку з ущільнюючими елементами очисного пристрою. Визначено, що деформація манжет очисного поршня суттєво впливає на розподіл тиску та швидкості, сприяючи виникненню перетоків рідкої фази через рухому межу в запоршневий простір.

Отримані результати дали змогу побудувати повну картину гідродинамічних процесів, які супроводжують рух очисного поршня та впливають на ефективність очищення магістрального газопроводу. Установлено, що наявність не ньютонівських властивостей рідинних скупчень призводить до істотного збільшення об'ємів перетоків через поршень, що знижує ефективність процесу видалення рідкої фази. Дослідження виконано для двох випадків – витіснення води та не ньютонівської рідини з різними реологічними характеристиками. Результати моделювання показали суттєву залежність гідродинамічних параметрів від в'язкості та ступеня нелінійності течії, що необхідно враховувати при плануванні технологічних операцій з очищення магістральних газопроводів і розробленні конструкцій очисних поршнів підвищеної ефективності.

Ключові слова: *неньютонівська рідина, рівняння руху і нерозривності, розподіл швидкостей, перетоки через рухому границю, очисний поршень.*

Вступ

Процес витіснення рідини твердим тілом в трубопроводі описується складною системою рівнянь, що враховують розподіл швидкостей у області рідкої фази, пружну взаємодію рідини і твердого тіла, а також деформацію елементів ущільнювачів. Тому характер процесу багато в чому визначається фізичними властивостями рідини, що витісняється [1].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Аналіз стану внутрішньої порожнини газопроводу показав, що фізичні властивості рідких скупчень змінюються в широких межах, причому на початкових ділянках рідина може мати явно виражені не ньютонівські властивості. Неврахування властивостей рідини може привести до відхилення режиму чищення від оптимального, що в свою чергу приведе до зниження ефективності чищення [2-5].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Складність гідродинамічних процесів, а також процесів взаємодії рідини і твердого тіла, не дає можливості створити модель, що дозволяє вести розрахунки очищення газопроводу. У зв'язку з цим необхідно користуватися емпіричними і напівемпіричними залежностями. Проте, ці залежності повинні враховувати відхилення фізичних властивостей рідини від неньютонівських. В іншому випадку модель неадекватно відображає характеристики модельованого процесу [6].

Таким чином, для підвищення ефективності очищення порожнини газопроводів з відкладеннями неньютонівських рідин необхідно провести комплекс досліджень, що включаючи в аналіз впливу властивостей рідини на процес її витіснення.

Мета та завдання досліджень

Метою дослідження являється дослідження закономірностей витіснення з трубопроводу очисним поршнем рідини з неньютонівськими властивостями для підвищення ефективності очистки.

Дослідження

При витісненні рідкої фази твердим тілом з порожнини газопроводу спостерігається підвищення тиску в пристінкових областях рідкої фази, викликане відмінністю форм епюр швидкостей твердого тіла і рідини. В зв'язку з цим важливим питанням гідродинаміки виштовхуваної рідини є визначення характеру розподілу швидкостей рідини по перерізу потоку. Стаціонарний плин в'язких нестискуваних рідин описується наступною системою рівнянь [6, 7]

$$\begin{aligned} \nu \cdot \nabla \nu &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla \nu, \\ \nabla \bar{\nu} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де ν – вектор швидкості рідини з проекціями по напрямках ортогональних координатах U, V, W ; p – тиск; ρ – густина; ν – кінематична в'язкість; ∇ – оператор Лапласа.

Вважаючи що U , V , W на контурі L рівні нулю, одержимо рівняння нерозривності у вигляді

$$\int_S U dS = S \cdot u_o \quad (2)$$

Аналогічним чином з векторного рівняння руху одержимо:

$$\frac{d}{dx} \int_S U ds + \frac{S}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \oint \frac{\partial U}{\partial h} dL = 0. \quad (3)$$

Таким чином, задача про рух виштовхуваної рідини зводиться до інтегрування системи рівнянь (2) і (3) з наступними граничними умовами:

- на лівій межі рідинної пробки ($x=0$)

$$U(0, r) = U_o = const,$$

-на контурі труби

$$U(x, r) = 0$$

-на межі ядра і приграничного шару

$$\left. \frac{\partial U(x, r)}{\partial r} \right|_{r=R} = 0,$$

Для круглої труби діаметром $D = 2R$ в циліндричних координатах система рівнянь (2) і (3) з вказаними граничні умови запишуться у вигляді [8]

$$\frac{d}{dx} \int_0^R U^2 r dr + \frac{R}{2\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \nu \cdot R \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

$$2 \int_0^R U r dr = U_o \cdot R^2, \quad (5)$$

$$U|_{r=R} = 0, \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R-\delta_1} = 0. \quad (7)$$

Рівняння стану неньютонівської рідини представляється у вигляді

$$\tau_k = \alpha \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|^{n-1} \cdot \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (8)$$

де τ_k – дотичні напруження; x , y – плоскі координати; α – міра консистентності (структурна в'язкість); n – ступінь неньютонівської поведінки (показник тиксотропності).

Позначимо товщину приграничного шару δ_1 і прийемо, що швидкість в ядрі потоку постійна по перетину $U=U(x)$, а швидкість в до граничному шарі розподілена згідно із законом [9]

$$V = U_1(x) \left[1 - \left(1 - \frac{y}{\delta_i} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]. \quad (9)$$

Зв'язок між U і x можна одержати з рівняння збереження кількості руху, який стосовно даного випадку запишеться у вигляді

$$\frac{d}{dx} (R - \delta_1)^2 U_1^2 + 2 \int_0^{\delta_1} (R - r) V dr + \frac{R^2}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2\alpha R}{\rho} \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{r=0} = 0. \quad (10)$$

Після інтегрування і нескладних перетворень одержимо розв'язок у вигляді

$$U = \frac{2(2 \cdot n + 1)(3n + 1)}{K^2 + (3n + 1)(n + 1)}. \quad (11)$$

На рухомій межі твердого тіла і рідкої фази при $(x = 0)$ швидкості розподілені по перерізу потоку рівномірно ($U = 1$). Розглядаючи ці умови як граничні одержимо

$$x = \frac{[(2n + 1)(3n + 1)]}{2(3n + 2)[4(n + 1)]^n} \int_n^{3n+1} f_n(K) dK, \quad (12)$$

$$f_n(K) = \frac{(3n + 1 - K)^{1+n} [(9n + 7)K^3 - 3(n + 1)(3n + 1)K^2 w^2 -]}{[K + (3n + 1)(n + 1)^{3-n}]}$$

Для розподілу тиску по довжині рідинної пробки перед очисним поршнем, одержимо рівняння

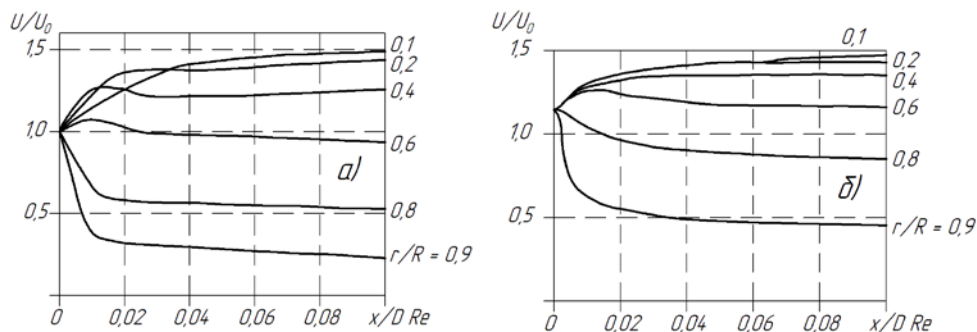
$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(\frac{P_0 - P}{0,5\rho U_0^2} \right) &= \frac{4(5n + 1 - K)(2n + 1)(3n + 1)}{(K - n - 1)(3n + 2)} * \\ * \frac{d}{dx} \left\{ \frac{(9n + 7)K^2 - 2(n + 1)(3n + 1)K + 3(n + 1)^2(3n + 1)}{[K^2 + (3n + 1)(n + 1)]^2} \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Розв'язок (13) має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{P_0 - P}{0,5\rho U_0^2} &= \frac{4(3n + 1)}{3n + 2} \left\{ \frac{n}{(2n + 1)^2} \ln \left[\frac{K^2 + (3n + 1)(n + 1)}{2(3n + 1)(2n + 1)} \right] V - \frac{2n}{2n + 1} \ln \left(\frac{K - n - 1}{2n} \right) + \right. \\ &+ \frac{(3n + 1)[(10n^2 + 9n + 1)K + (n + 1)(6n^2 + 9n + 2)]}{[K^2 + (3n + 1)(n + 1)]^2} - \\ &- \frac{2n(4n + 3)K + (n + 1)(36n^3 + 68n^2 + 41n + 7)}{2(n + 1)(2n + 1)[K^2 + (3n + 1)(n + 1)]} + \\ &+ \frac{5n^2 + 5n + 1}{(n + 1)(3n + 1)(2n + 1)} - \frac{n(6n^2 + 6n + 1)}{(n + 1)(2n + 1)^2 \sqrt{(3n + 1)(n + 1)}} \times \end{aligned}$$

$$\times \left[\operatorname{arctg} \frac{K}{\sqrt{(3n+1)(n+1)}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3n+1}{n+1}} \right], \quad (14)$$

Залежності (12) і (14) дозволяють побудувати характер розподілу швидкостей по перерізу труби у разі виштовхування ньютонівської рідини.



а) – вода; б) – неньютонівська рідина ($n = 0,7$; $N/\lambda = 0,5$).

Рис. 1. Розподіл швидкостей по перерізу потоку

Пружна дія рідинної пробки, що виштовхується поршнем з трубопроводу, з елементами ущільнювачів очисного пристрою, приводить до підвищення тиску в рідкій фазі і деформації ущільнень. В результаті такої взаємодії в при стінному шарі утворюються щілини, через які рідина протікає в за поршневий простір.

Характер деформацій і величина перетікань рідини, через рухому тверду границю визначається нерівномірністю розподілу тиску по перетину потоку в рідинній області, що в свою чергу викликається відмінністю у формах епюр швидкостей твердого тіла і рідкої фази. Нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу потоку виштовхуваної рідини визначається рівнянням (12), яке включає фізичні властивості рідини. При відомому розподілі швидкостей по перетину потоку $U(x, r)$ характер розподілу тиску по перетину визначається із залежності [7].

$$\frac{\Delta P(x, r)}{E} = \frac{2\delta_0}{\delta_0 + \delta} \left[1 - \frac{\delta}{\delta_0} \frac{U(x, r)}{U_0} \right], \quad (15)$$

де E – модуль пружності рідини.

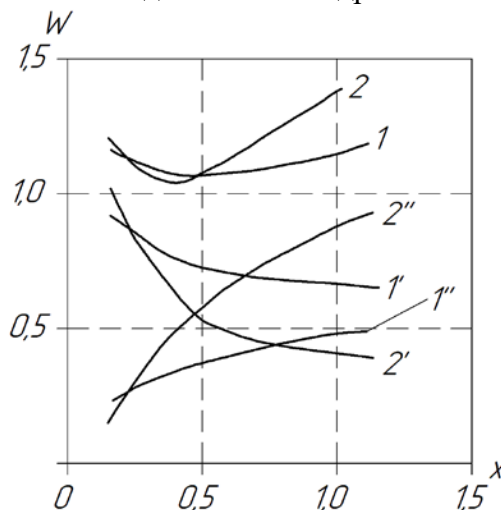
Одержане рівняння спільно з рівнянням деформацій манжет очисного пристрою дозволяють визначити об'єм перетоків рідини через рухому границю по довжині трубопроводу L .

Якщо в рівняння розподілу швидкостей в рідкій області (12) прийняти $n=1$, а структурну в'язкість α рівну в'язкості μ ньютонівської рідини, то вказане рівняння може служити основою для розрахунку режиму виштовхування ньютонівської рідини з трубопроводу.

Використовуючи описаний вище алгоритм, була побудована залежність, об'єму перетікань W від швидкості руху очисного пристрою U_0 . Результати у вигляді графіків приведені на рис. 2.

Іншим чинником, що сприяє утворенню перетікань рідини в запоршневий простір є гідравлічний удар, що виникає у момент зустрічі очисного поршня і пробки рідких скупчень. Величина підвищення тиску в наслідок гідравлічного удару очисного поршня і пробки рідини в трубопроводі може бути знайдена з рівняння Жуковського, що дозволить оцінити величину перетоків рідини через рухома границю внаслідок гідроудару.

Об'єм перетікань W_2 внаслідок гідравлічного удару поршня і пробки рідких скупчень із збільшенням швидкості руху очисного пристрою зростає. Це добре узгоджується з рівнянням Жуковського для гідравлічного удару. Загальний об'єм перетікань рідини в запоршневий простір може бути представлений у вигляді суми об'ємів W_1 і W_2 . Залежність загального об'єму перетікань від швидкості руху очисного пристрою приведена на рис. 2. Ця залежність має мінімум якому відповідає оптимальна швидкість руху очисного пристрою. Зіставлення кривих для ньютонівської і неньютонівської рідини показує, що оптимальні швидкості руху очисного пристрою в обох випадках істотно відрізняються.



1 – сумарні перетоки (вода); 2 – сумарні перетоки (неньютонівська рідина)

Рис. 2. Визначення оптимальної швидкості очисного пристрою

Аналіз результатів досліджень показує, що залежно від реологічних властивостей неньютонівської рідини, значення оптимальної швидкості поршня може відхилятися від значення, одержаного для ньютонівської рідини на величину до 40 %.

Висновки

На основі математичного моделювання процесу витиснення рідини з газопроводу очисним поршнем отримано залежності характеру розподілу

швидкостей руху рідини і тиску по перерізу труби і вздовж рідинного скупчення, які показують суттєвий вплив властивостей виштовхуваної рідини характер і величину перетоків через рухома границю, що необхідно враховувати при плануванні очищення газопроводів.

Література

1. Грудз Я.В. Энергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.
2. Грудз В.Я. Технічна діагностика трубопровідних систем / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.
3. Majd, A., Ahmadi, A., & Keramat, A. (2016). Investigation of non-Newtonian fluid effects during transient flows in a pipeline. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 62(2), 105-115.
4. Shams Eshaghi, S. (Year). Digitalization of displacement of non-Newtonian and Newtonian fluids in horizontal annuli (Master's thesis). *Montanuniversität Leoben*. Retrieved from
5. Rymchuk, D. V., Shevchenko, N., Tulska, A. G., Ponomarenko, V., & Shudryk, O. (2022). Research and development of a mathematical model of a polymer-based viscous non-Newtonian fluid for oil and gas wells drilling. *Petroleum and Coal*, 64(4), 796-803. Retrieved from
6. Воловецький, В. Б., & Щирба, О. М. (2019). Дослідження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 1.
7. Шевченко, Н. Г., Шудрик, О. Л., Лучанінов, К. М., & Андрієвська, В. С. (2022). Експериментальні та чисельні дослідження в гнучких трубах колттюбінгових установок з обліком реології технологічної рідини. *Вісник НТУ «ХП»*, 2022(2).

Стаття надійшла до редакційної колегії 30.10.2025 р.

Прийнято до друку 03.12.2025 р.

RESEARCH OF THE PROCESS OF NON-NEWTONIAN LIQUID PRESSURE FROM A GAS PIPELINE

V. M. Bodnar , K. V. Novikov 

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska Street;

tel. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: vitalii.bodnar@nungeu.edu.ua

The paper examines the process of cleaning main gas pipelines using sealing-type cleaning pistons designed to remove liquid accumulations that form during natural gas transportation. Special attention is paid to the study

of hydrodynamic processes occurring during the movement of the piston inside a pipeline filled with a fluid exhibiting non-Newtonian properties. The interaction between the liquid accumulation and the solid body (cleaning piston) moving at a constant velocity is analyzed, with consideration of the influence of the fluid's physical and mechanical properties on the cleaning efficiency of the pipeline.

Based on analytical research, the regularities of the distribution of linear velocities across the pipeline cross-section and along the length of the moving liquid accumulation were obtained. The corresponding pressure distribution in the liquid phase was also determined, reflecting the interaction between the flow and the sealing elements of the cleaning device. It was established that deformation of the sealing elements of the piston significantly affects the pressure and velocity distribution, leading to liquid phase leakage through the moving boundary into the space behind the piston.

The obtained results made it possible to develop a detailed picture of the hydrodynamic processes accompanying the motion of the cleaning piston and affecting the overall efficiency of pipeline cleaning. It was found that the presence of non-Newtonian properties in the liquid accumulations results in a significant increase in the volume of leakage through the piston, thereby reducing the effectiveness of liquid removal. The study was carried out for two cases — the displacement of water and of a non-Newtonian fluid with different rheological characteristics. The modeling results demonstrated a strong dependence of hydrodynamic parameters on viscosity and the degree of nonlinearity of flow behavior, which must be taken into account when planning technological operations for cleaning main gas pipelines and developing advanced designs of cleaning pistons with improved efficiency.

Keywords: *non-newtonian fluid, equations of motion and continuity, velocity distribution, flows through the moving boundary, cleaning piston.*