

Наука — виробництву

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2020-1(74)-89-95

ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДИН НА ПРОЦЕС ОЧИЩЕННЯ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ВІД РІДИННИХ ЗАБРУДНЕНЬ

¹В. Я. Грудз, ²Н. Б. Слободян*

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, (0342) 727138,
e-mail: v. grudz@nimg.edu.ua

²АТ “Івано-Франківськгаз”; 76010, м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського, 20, тел. (0342) 586274,
e-mail: nazar.slobodian28@gmail.com

Розглядаються сучасні технічні методи підвищення ефективності очищення магістральних газопроводів. Найбільш ефективним методом підвищення ефективності газопроводу є періодичні його очистки із застосуванням механічних очисних пристроїв. На практиці використовується велика кількість очисних поршинів з різними технологічними конструкціями, проте жоден з них не може повністю видалити рідинні скупчення. Причинами зниження ефективності очищення є наявність рідини в порожнині трубопроводу, яка може перебувати у двох формах – високов’язких смолистих відкладень та малов’язких рідких відкладень. Під час руху вони відіграють роль місцевих опорів. Характер процесу очищення магістральних газопроводів багато в чому визначається фізичними властивостями рідини, що витісняється. Отримано функціональну залежність розподілу швидкостей перерізом труби при виштовхуванні ньютонівської рідини, а також значення початкового тиску рідкої фази на очисний поршень. Досліджено взаємодію очисного пристрою, що містить рідкі скупчення із різними фізичними властивостями. Розроблено алгоритм для розрахунку об’єму перетікання через рухомих границю у запоршневій простір за їх швидкістю. Побудовано залежність об’єму перетікання рідини унаслідок гідравлічного удару для ньютонівської і ньютонівської рідин. На основі проведених розрахунків побудовано графічні залежності поправочного коефіцієнта від відношення динамічного в’язкості до міри консистентності, а також залежності загального об’єму перетікання від швидкості руху очисного пристрою. Отримано формулу для розрахунку поправочного коефіцієнта. Наведено результати розрахунків значення поправочного коефіцієнта, який враховує реологічні властивості рідини. Визначено оптимальну швидкість очисного пристрою, яка залежить від властивостей і реології ньютонівської рідини.

Ключові слова: реологія, рідинні скупчення, ньютонівська рідина, очищення, очисний поршень, оптимальна швидкість, гідравлічний удар, перетікання рідини.

Рассматриваются современные технические методы повышения эффективности очистки магистральных газопроводов. Наиболее эффективным методом повышения эффективности газопровода являются периодические его очистки с применением механических очистных устройств. На практике используется большое количество очистных поршиней различных технологических конструкций, однако ни один из них не в состоянии полностью удалить жидкостные скопления. Причинами снижения эффективности очистки является наличие жидкости в полости трубопровода, которая может находиться в двух формах - высоковязких смолистых отложений и маловязких жидких отложений. При движении они играют роль местных сопротивлений. Характер процесса очистки магистральных газопроводов во многом определяется физическими свойствами вытесняемой жидкости. Получена функциональная зависимость распределения скоростей по сечению трубы при выталкивании ньютонической жидкости, а также значение начального давления жидкой фазы на очистной поршень. Исследовано взаимодействие очистного устройства с ридкими скоплениями, имеющими различные физические свойства. Разработан алгоритм для расчета объема

перетоков через подвижну границю в запариневоє простір по їх швидкості. Побудовано залежність об'єму перетоков рідини внаслідок гідравлічного удару для ньютонівської і неньютонівської рідин. По результатам проведених розрахунків побудовано графічні залежності поправочного коефіцієнта від відношення динамічної в'язкості до ступеня консистентності, а також залежності загального об'єму перетоков від швидкості руху очищувача. Отримано формулу для розрахунку поправочного коефіцієнта. Приведено результати розрахунків значення поправочного коефіцієнта, який враховує реологічні властивості рідини. Визначено оптимальну швидкість очищувача, залежну від властивостей і реології неньютонівської рідини.

Ключові слова: реологія, рідинні скоплення, неньютонівська рідина, очищення, очищувач, поршень, оптимальна швидкість, гідравлічний удар, переток рідини.

The article deals with modern technical methods of improving the efficiency of gas pipelines cleaning. The most effective method of improving the efficiency of a gas pipeline is its periodical cleaning with mechanical treating units. In practice, a large number of cleaning pistons of various technological designs are used. Regardless of the design, none of them can completely remove the fluid accumulations. The reason for the decrease in efficiency is the presence of fluid in the cavity of the pipeline. The fluid can be of two types – high-viscosity resinous deposits and low-viscosity liquid deposits. When moving, they perform the role of local resistance. The type of the main gas pipeline purification process is largely determined by the physical properties of the fluid which is being displaced. The authors specify the functional dependence of the velocity distribution in the pipe cross-section while displacing the Newtonian fluid, as well as the value of the initial pressure of the liquid phase on the cleaning piston. The interaction of a purifying device with fluid accumulations having different physical properties is investigated. The authors develop the algorithm of calculating the volume of the flows over a moving boundary into a back-piston space, in relation to their velocity. The dependence of the volume of fluid flows caused by hydraulic shock for Newtonian and non-Newtonian fluids is composed. Based on the calculations, the authors plot the graphical dependence of the correction coefficient on the ratio of dynamic viscosity to the degree of consistency, as well as the dependence of the total flow rate on the speed of movement of the cleaning unit. The formula for calculating the correction coefficient is obtained. The article presents the results of calculating the value of the correction coefficient which takes into account the rheological properties of the fluid. In relation to the properties and rheology of the non-Newtonian fluid, the authors determine the optimal velocity of a treating unit.

Keywords: rheology, fluid accumulations, non-Newtonian fluid, cleaning, cleaning piston, optimum speed, hydraulic shock, fluid flows.

Вступ

Найбільш ефективним методом підвищення гідравлічної ефективності газопроводу є періодичні його очищення із застосуванням механічних очисних пристроїв. Незалежно від конструкції очисного пристрою жоден з них не може повністю видалити рідинні забруднення. Очищення магістральних газопроводів від різного роду забруднень є технологічно складним і енерговитратним процесом.

Процес витіснення рідини твердим тілом у 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.

Мета роботи – з'ясувати вплив фізичних властивостей рідини на процес її витіснення із магістрального газопроводу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Аналіз стану внутрішньої порожнини газопроводу свідчить, що фізичні властивості рід-

ких скупчень змінюються в широких межах, причому на початкових ділянках рідина може мати явно виражені неньютонівські властивості. Неврахування властивостей рідини може призвести до відхилення режиму очищення від оптимального, що, в свою чергу, негативно вплине на якість цього очищення [1].

Як зазначалося вище, відкладення в газопроводі по довжині лінійної ділянки є нерівномірним. Так, на початкових від входу кілометрах траси (приблизно до 20-25 км) відкладення в трубопроводі мають вигляд смолистих речовин із неньютонівськими властивостями і є продуктами витіснення мастила з нагнітачів. Поза позначкою 20-25 км від початку траси досягається «точка роси» газу, тому відкладення на цій ділянці газопроводу є малов'язкими і представлені різними фракціями води і конденсату: вони залягають у понижених ділянках траси і мають вигляд рідинних корків.

Для очищення газопроводу від рідинних скупчень очисними поршнями розроблено технологію процесу, основою якої є забезпечення оптимальної швидкості очисного пристрою заданої конструкції. В [2] наведено розрахункові залежності для визначення оптимальної швидкості руху очисного пристрою. Також ряд до-

слідників [3] вбачають вирішення поставленої задачі в створенні нових конструкцій очисних пристроїв, здатних зменшити підвищення тиску рідинного корка на поршень у момент їх зустрічі. Проте, швидка зношувальність елементів ущільнювачів очисного пристрою робить неефективними ці конструкції для очищення газопроводів великої протяжності.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як було показано вище, неньютонівські властивості рідинних відкладів у газопроводі на перших 20-25 км кілометрах траси суттєво впливають на величину оптимальної швидкості очищення. Отже, щоб досягти максимального ефекту від очищення початкової ділянки газопроводу слід забезпечити оптимальну швидкість із врахуванням неньютонівських властивостей відкладів. На решті площі газопроводу оптимальна швидкість повинна суттєво зрости для повного видалення малов'язких рідких скупчень з газопроводу. В такому випадку виникає запитання: чи призведе неврахування неньютонівських властивостей відкладів на початку лінійної ділянки газопроводу до зниження гідравлічної ефективності після очищення.

Формулювання цілей статті

Через складність гідродинамічних процесів та процесів взаємодії рідини і твердого тіла неможливо створити модель, яка б дала змогу проводити 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 залежності неадекватно відобразатимуть характеристики процесу очищення трубопроводів.

Таким чином, для підвищення ефективності очищення порожнини газопроводів з відкладенням неньютонівських рідин необхідно провести комплекс досліджень, що включають аналіз впливу фізичних властивостей рідин на процес очищення газопроводу від рідинних забруднень.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Пружна дія рідинної пробки, що виштовхується поршнем із трубопроводу, з елементами ущільнювачів очисного пристрою, призводить до підвищення тиску в рідкій фазі і деформації ущільнювачів. В результаті такої взаємодії в пристінному шарі утворюються щілини,

через які рідина протікає в запоршневий простір [4].

Характер деформацій і величина перетікань рідини, через рухому тверду границю визначається нерівномірністю розподілу тиску в перетині потоку рідинної області, що, в свою чергу, викликано відмінністю між формами епюр швидкостей твердого тіла і рідкої фази. нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу потоку виштовхувальної рідини визначається рівнянням, яке включає фізичні властивості рідини. При відомому розподілі швидкостей у перетині потоку $U(x, r)$ характер розподілу тиску в ньому визначається із залежності [5].

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

де E – модуль пружності рідини.

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

Зусилля, що впливає на ущільнюючу манжету площею ω , може бути визначено із залежності

$$F = \int_{\omega} P(x, r) dr. \quad (2)$$

Розглядаючи манжету як консольну балку з розподіленим навантаженням $f = \frac{F}{2\pi R}$, до вільного кінця якої прикладена сила $F = \frac{T}{2\pi R}$, знайдемо прогинання вільного кінця балки

$$y = \frac{fh^4}{8(EI)_n}, \quad (3)$$

де $(EI)_n$ – жорсткість матеріалу манжети.

Ширина щілини, що утворюється при цьому біля стінки трубопроводу при вказаній величині деформації манжети становитиме

$$\Delta = \frac{y^2}{2z}, \quad (4)$$

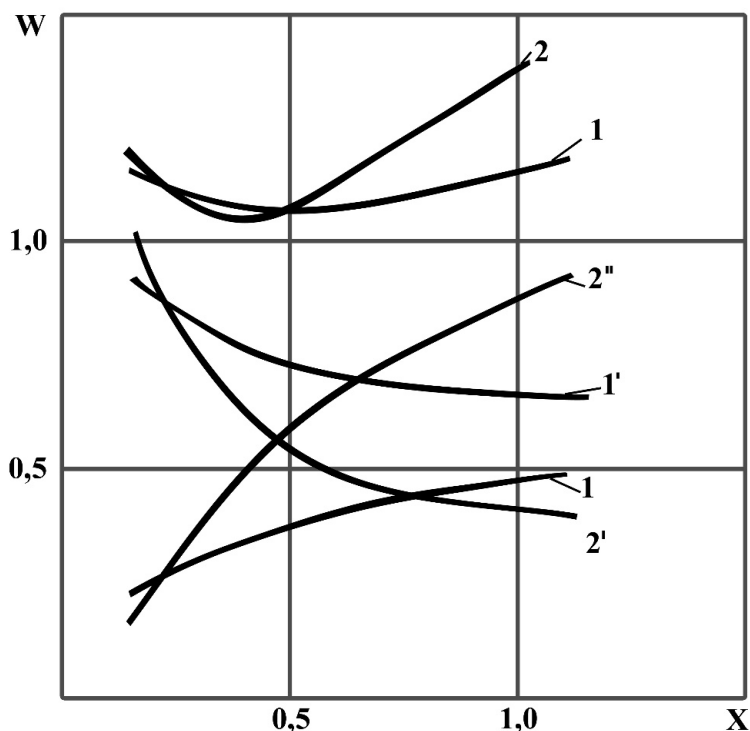
z – ширина манжети.

Загальна площа кільцевої щілини

$$\omega_{щ} = 2\pi R \Delta. \quad (5)$$

З огляду на малу товщину манжети (довжини щілини), можна припустити, що коефіцієнт витрати через щілину буде постійним і не залежатиме від властивостей рідини. Тоді витрата рідини через щілину обчислюватиметься за виразом

$$Q_{щ} = \mu \omega_{щ} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho g}}, \quad (6)$$



1 – сумарні перетікання (ньютонівська рідина); 2 – сумарні перетікання (неньютонівська рідина); 1' – перетікання унаслідок гідродудару (ньютонівська рідина); 2' – перетікання унаслідок гідродудару (неньютонівська рідина); 1'' – шляхові перетікання (ньютонівська рідина); 2'' – шляхові перетікання (неньютонівська рідина)

Рисунок 1 – Залежність об'єму перетікань від швидкості руху очисного пристрою

де ΔP – перепад тиску на рухомому очисному пристрої.

$$\Delta P = \frac{4T}{\pi R^2}, \quad (7)$$

де T – сила тертя манжет стінки труб.

Загальний об'єм рідини, який перетікає через рухому границю на відстані L при постійній швидкості руху очисного поршня, може бути знайдений з формули

$$W_1 = Q_{ш} \frac{L}{U_0}. \quad (8)$$

Використовуючи описаний вище алгоритм, було побудовано залежність об'єму перетікань W_1 від швидкості руху очисного пристрою U_0 . Діапазон вимірювання швидкості очисного пристрою був прийнятий на рівні 2-20 м/с. Результати у вигляді графіка наведені на рисунку 1.

Якщо в рівняння розподілу швидкостей в рідкій області 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 [6].

Використовуючи викладений вище алгоритм, було проведено розрахунки об'ємів перетікань ньютонівської рідини в запоршневий простір. При цьому динамічна в'язкість виштовхуваної рідини вимірювалася в межах від 0,8 до 3,8 сП. Решта параметрів (довжина і діаметр трубопроводу, пружність манжет поршня, швидкість його руху) приймалася такими ж, як і у разі виштовхування неньютонівської рідини. В результаті побудовані графіки залежності об'єму перетікань від швидкості руху очисного пристрою.

Іншим чинником, що сприяє перетіканню рідини в запоршневий простір, є гідравлічний удар, що виникає у момент зустрічі очисного поршня і корка рідких скупчень. Величина підвищення тиску внаслідок гідравлічного удару очисного поршня і корка рідини в трубопроводі може бути знайдена з рівняння Жуковського [7]

$$\Delta P_x = U_0 \cdot \rho \cdot c, \quad (9)$$

де ρ – густина рідини;

c – швидкість розподілу звукової хвилі в рідкій фазі.

$$c = \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}. \quad (10)$$

Тоді

$$\Delta P_y = U_0 \sqrt{E \cdot \rho}. \quad (11)$$

Використовуючи рівняння деформації мажета у вигляді (4), а також рівняння витрати рідини через щілину у вигляді (6), можна визначити об'єм рідини, що перетікає за час, рівний фазі гідравлічного удару

$$t_y = \frac{2l_n}{c} = \frac{2M_g}{\pi R^2 \sqrt{E\rho}}, \quad (12)$$

де M_g – маса рідини в трубопроводі діаметром $2R$;

l_n – довжина рідинного корка.

За рівнянням (8) з врахуванням (6) і (5) можна побудувати залежність об'єму перетікань рідини унаслідок гідравлічного удару в запоршневому просторі.

$$W_2 = \mu_{ц} \omega_{ц} t_y \sqrt{\frac{\Delta P_y}{\rho g}}. \quad (13)$$

За формулою (13) побудовано залежності об'ємів перетікання W_2 внаслідок гідроудару від швидкості руху очисного пристрою U_0 . Ці залежності побудовані при різних значеннях фізичних властивостей ньютонівської рідини і у вигляді графіків наведені на рисунку 1.

З графіків видно, що об'єм перетікання W_1 на довжині трубопроводу L через нерівномірність розподілу швидкостей у перетині потоку із збільшенням швидкості руху очисного пристрою зменшується. Це пояснюється наближенням форми епюру рідини і твердого тіла при збільшенні швидкості руху останнього.

Об'єм перетікань W_2 внаслідок гідравлічного удару поршня і корка 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 наведена на рисунку 1. Ця залежність має мінімум, якому відповідає оптимальна швидкість руху очисного пристрою.

Аналогічно крива залежності об'єму загальних перетікань побудована для випадку витіснення поршнем ньютонівської рідини. Зіставлення кривих для ньютонівської і неньютонівської рідин показує, що оптимальні швидкості руху очисного пристрою в обох випадках істотно відрізняються.

Слід зазначити, що для визначення оптимальної швидкості руху очисного поршня, що

виштовхує ньютонівську рідину, в роботі [5] одержано емпіричну формулу такого вигляду:

$$\left(\frac{U_0 d \rho}{\mu} \right)^m = \frac{A}{c} \left(\frac{B}{M_g / (\rho d^2 \delta)} + \frac{\delta \mu^2}{d T \rho} \right). \quad (14)$$

За цією формулою визначалася оптимальна швидкість очисного пристрою для тих же умов, для яких вона визначалася у ході теоретичних досліджень. Порівняння результатів показує, що значення оптимальної швидкості, одержане різними методами, не збігаються.

Це пояснюється деякою ідеалізацією умов витіснення рідини при реалізації аналітичного методу визначення оптимальної швидкості. Звідси випливає, що у визначенні оптимальної швидкості руху очисного пристрою, що виштовхує неньютонівську рідину, буде також допущена істотна помилка. Тому для чисельного визначення оптимальної швидкості руху очисного пристрою у разі неньютонівської рідини запропоновано метод, що базується на порівнянні результатів емпіричних і теоретичних досліджень. Згідно з цим методом оптимальна швидкість очисного пристрою при витісненні неньютонівської рідини визначалася із залежності

$$U_0^* = k \cdot U_0, \quad (15)$$

де U_0 – оптимальна швидкість руху очисного пристрою при витісненні ньютонівської рідини, яка визначалася із формули (15);

k – поправочний коефіцієнт, що враховує властивості реології неньютонівської рідини.

Для визначення коефіцієнта k порівнювали оптимальну швидкість U_0 , розраховану за формулою (15) з аналогічним значенням цієї величини, одержаної для неньютонівської рідини аналітичним методом. Розрахунки виконувалися при різних значеннях ступеня неньютонівської поведінки n , при різних відношеннях динамічної в'язкості і міри консистентності μ та α , а також при різних відносних об'ємах рідини в трубопроводі $V_p/V_{тр}$. У кожному випадку визначалося значення поправочного коефіцієнта

$$k = \frac{U_0^*}{U_0}. \quad (16)$$

Результати у вигляді графіків зображені на рисунку 2 і наведені в таблиці 1. Їх обробка методами регресивного аналізу дала змогу одержати формулу для розрахунку поправочного коефіцієнта у вигляді

$$k = 0,743 \left(\frac{V_p}{V_{mp}} \right)^{-0,013} \left(\frac{\mu}{\alpha} \right)^{0,667} n^{0,25}. \quad (17)$$

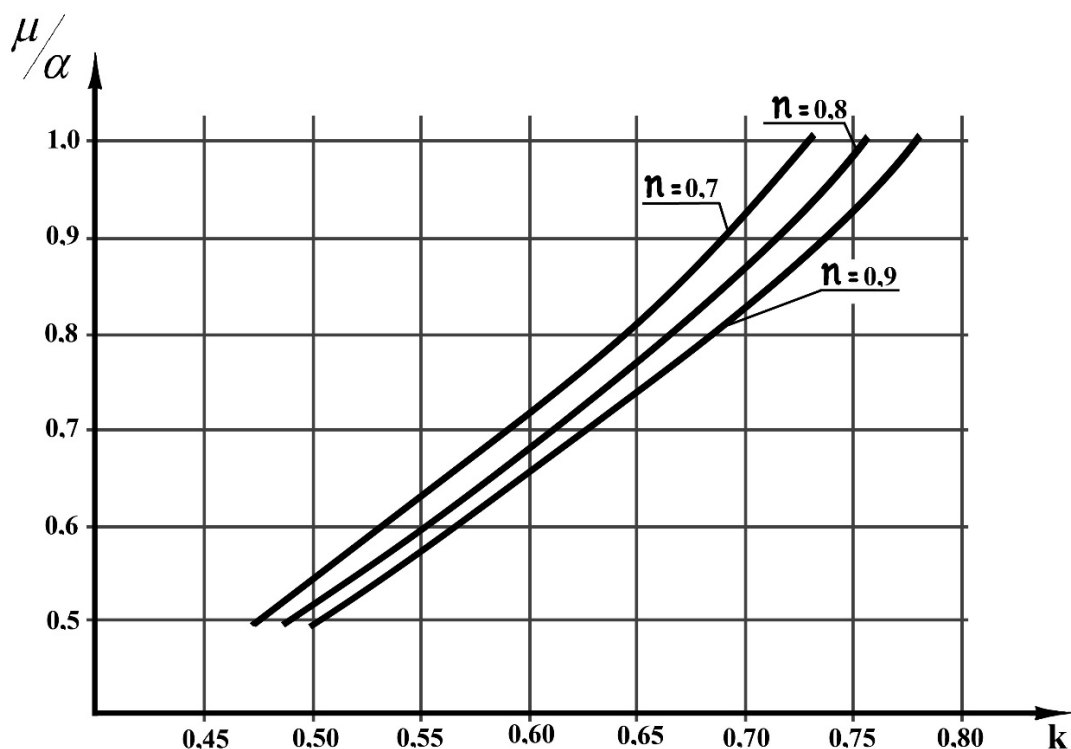


Рисунок 2 – Залежність поправочного коефіцієнта від відношення динамічного в’язкості до міри консистентності

Таблиця 1 – Значення поправочного коефіцієнта, який враховує реологічні властивості рідини

Ступінь неньютонівської поведінки, n	μ/α	Поправочний коефіцієнт, k
0,7	0,6	0,5317516
0,7	0,8	0,6442330
0,7	1,0	0,7376216
0,8	0,6	0,5498026
0,8	0,8	0,6661024
0,8	1,0	0,7630007
0,9	0,6	0,5662326
0,9	0,8	0,6860078
0,9	1,0	0,7861007

Таким чином, для розрахунку оптимальної швидкості руху очисного пристрою, який витісняє неньютонівську рідину, необхідно заздалегідь знайти з (14) значення швидкості U_0 , а потім з (17) поправочного коефіцієнта k і відповідно до (15) скоригувати значення оптимальної швидкості.

Аналіз результатів досліджень показує, що залежно від властивостей та реології неньютонівської рідини, значення оптимальної швидкості поршня може відхилитися від значення, одержаного за (14) на величину до 40 %.

Висновки

Отримано функціональну залежність розподілу швидкостей у перерізі труби при виштовхуванні ньютонівської рідини, а також значення початкового тиску рідкої фази на очисний поршень. Досліджено взаємодію очисного пристрою з рідкими скупченнями, розроблено алгоритм для розрахунку об’єму перетікань через рухомию границю в запоршневий простір за його швидкістю. Побудовано залежність об’єму перетікань рідини унаслідок гідравлічного удару для ньютонівської і неньютонівської рідин. В результаті проведених розрахунків визначено оптимальну швидкість очисного пристрою в залежності від властивостей і реології неньютонівської рідини.

Література

References

1. Галлиулин З.Т., Ходанович И.Е., Девичев В.В. Вопросы физического моделирования нестационарных течений газа в магистральных газопроводах с учетом влияния инерционных сил и зон гидравлического сопротивления. *Сб. трудов ВНИИГАЗ*. 1976. С. 56-59.
2. Грудз В.Я., Калинин С.И., Михалкив В.Б., Тымкив Д.Ф. Методика состояния магистрального газопровода. Киев: Час, 1990. С. 86-87.
3. Грудз В.Я. Исследование эффективности очистных устройств в газопроводах с пересеченным профилем трассы. Диссертационная работа на соискание ученой степени к.т.н., Ивано-Франковськ, 1980. С. 44-48.
4. Капцов И.И., Гончаров Б.Н. Анализ загрязнений магистральных газопроводов. *Газовая промышленность*. 1979. № 8. С. 103-108.
5. Грудз В.Я., Переяслов В.Н., Хизгилов И.Х. Влияние скорости очисных устройств на эффективность продувки газопроводов. *Нефтяная и газовая промышленность*. 1974. № 6. С. 65-67.
6. Калинин С.И. Грудз В. Я. Про витиснення твердим тілом неньютонівської рідини з трубопроводу. *Нафтова і газова промисловість*. 1992. № 4. С. 25-27.
7. Кутыршин А.П., Корнилов Г.Г. Оценка характеристики движения разделителей по трубопроводу. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. Труды БНИИСПТнефТЬ, вып.9, Уфа, 1972. С. 37-40.
8. Губин В.Е., Левин В.С. Течение неньютоновской жидкости в начальном участке круглой трубы. *Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов*. 1972. Выпуск IX. С. 20-23.
9. Губин В.Е., Левин В.С.. Течение вязкопластичной жидкости в начальном участке круглой трубы. *Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов*. 1972. Выпуск IX . С. 32-40.

1. Galliulin Z.T., Hodanovich I.E., Devichev V.V. Voprosyi fizicheskogo modelirovaniya nestatsionarnyih techeniy gaza v magistralnyih gazoprovodah s uchetom vliyaniya inertsionnyih sil i zon gidravlicheskogo soprotivleniya. *Sb. trudov VNIIGAZ*, 1976 P. 56-59. [in Russian]
2. Grudz V.Ya., Kalin S.I., Mihalkiv V.B., Tyimkiv D.F. Metodika sostoyaniya magistralnogo gazoprovoda. Kiev: Chas, 1990. P. 86-87. [in Russian]
3. Grudz V.Ya. Issledovanie effektivnosti ochistnyih ustroystv v gazaprovodah s peresechenym profilem trassyi. Dissertatsionnaya rabota na soiskanie uchenoy stepeni k.t.n., Ivano-Frankovsk, 1980. P. 44-48. [in Russian]
4. Kaptsov I.I., Goncharov B.N. Analiz zagryazneniy magistralnyih gazoprovodov. *Gazovaya promyshlennost*. 1979. No 8. P. 103-108. [in Russian]
5. Grudz V.Ya., Pereyaslov V.N., Hizgilov I.H. Vliyanie skorosti ochisnyih ustroystv na effektivnost produvki gazoprovodov. *Neftyanyaya i gazovaya promyshlennost*. 1974. No 6. P. 65-67. [in Russian]
6. Kalyn S.I. Hrudz V. Ya. Pro vytysnennia tverdym tilom neniutonivskoi ridyny z truboprovodu. *Naftova i hazova promyslovist*. 1992. No 4. P. 25-27. [in Ukrainian].
7. Kutyirshin A.P., Kornilov G.G. Otsenka harakteristiki dvizheniya razdeliteley po truboprovodu. *Transport i hranenie nefi i nefteproduktov*. Trudy BNIISPTneft. 1972.Vol.9. P. 37-40. [in Russian]
8. Gubin V.E., Levin V.S. Tечenie nenyutonovskoy zhidkosti v nachalnom uchastke krugloy trubyi. *Transport i hranenie nefi i nefteproduktov*. 1972. Vol IX. P. 20-23. [in Russian]
9. Gubin V.E., Levin V.S.. Tечenie vyazkoplastichnoy zhidkosti v nachalnom uchastke krugloy trubyi. *Transport i hranenie nefi i nefteproduktov*. 1972. Vol IX. P. 32-40. [in Russian]