

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПРОВОДІВ ВІД РІДИННИХ ЗАБРУДНЕНЬ

<sup>1</sup>В.Я. Грудз, <sup>2</sup>Н.Б. Слободян\*

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,  
e-mail: v.g r u d z @ n i n g . e d u . u a

<sup>2</sup>ПАТ “Івано-Франківськгаз”; 76010, м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського, 20,  
тел. (0342) 586274, e-mail: n a z a r . s l o b o d i a n 2 8 @ g m a i l . c o m

У статті розглядаються сучасні методи підвищення ефективності очищення трубопроводного транспорту. Найбільш ефективним методом підвищення ефективності газопроводу є періодичне його очищення із застосуванням механічних очисних пристроїв. Причинами зниження ефективності є наявність рідини в порожнині трубопроводу, яка може перебувати у двох формах – високов’язких смолистих відкладів та малов’язких рідких відкладів. Відкладення зменшують площу поперечного перерізу і збільшують гідравлічний опір. Незалежно від конструкції очисного пристрою жоден з них не може повністю видалити рідинні забруднення. Проаналізовано причини виникнення перетоків через рухомих границю, які призводять до погіршення якості очищення газопроводу. В момент зустрічі очисного поршня з пробкою рідинних забруднень у газопроводі виникає гідравлічний удар, внаслідок чого деформуються ущільнюючі елементи поршня, і частина рідини перетікає в запоршневий простір. Авторами встановлено, що підвищення ефективності очищення можна досягнути, знизивши величину підвищення тиску в результаті гідродудару, не знижуючи при цьому швидкості руху поршня. Запропоновано алгоритм підвищення ефективності очищення трубопроводу, що базується на зменшенні перетоків через рухомих границю при витисненні рідини з трубопроводу очисним поршнем, шляхом аерації рідинної пробки. Досліджено вплив газового вмісту рідинної пробки на величину перетоків у просторі за поршнем. Побудовано математичну модель процесу, на основі реалізації якої встановлено закономірності коливання тиску в газорідинному середовищі. На основі проведених розрахунків побудовано графічні залежності зміни тиску у рідинній фазі від довжини пробки та величини тиску на поршень від газонасиченості рідинної пробки.

Ключові слова: газопроводи, тиск, очисний поршень, підвищення ефективності, очищення трубопроводу, гідравлічний удар, газорідинна пробка.

В статье рассматриваются современные методы повышения эффективности очистки трубопроводного транспорта. Наиболее эффективным методом повышения эффективности газопровода являются периодическая его очистка с применением механических очистных устройств. Причинами снижения эффективности является наличие жидкости в полости трубопровода, которая может находиться в двух формах - высоковязких смолистых отложений и маловязких жидких отложений. Отложения уменьшают площадь поперечного сечения и увеличивают гидравлическое сопротивление. Независимо от конструкции очистного устройства ни один из них не может полностью удалить жидкостные загрязнения. Проанализированы причины возникновения перетоков через подвижную границу, которые приводят к ухудшению качества очистки газопровода. В момент встречи очистного поршня с пробкой жидкостных загрязнений в газопроводе возникает гидравлический удар, в результате чего деформируются уплотнительные элементы поршня, и часть жидкости перетекает в запоршневое пространство. Авторами установлено, что повышение эффективности очистки можно достичь, снизив величину повышения давления в результате гидроудара, не снижая при этом скорости движения поршня. Предложен алгоритм повышения эффективности очистки трубопровода, основанный на уменьшении перетоков через подвижную границу при вытеснении жидкости из трубопровода очистным поршнем, путем аэрации жидкостной пробки. Исследовано влияние газового содержания жидкостной пробки на величину перетоков в пространстве за поршнем. Построена математическая модель процесса, на основе реализации которой установлены закономерности колебания давления в газожидкостной среде. На основе проведенных расчетов построены графические зависимости изменения давления в жидкостной фазе от длины пробки и величины давления на поршень от газонасыщенности жидкостной пробки.

Ключевые слова: газопроводы, давление, очистной поршень, повышение эффективности, очистка трубопровода, гидравлический удар, газожидкостная пробка.

*The article considers modern methods of improving the efficiency of pipeline transport cleaning. The most effective method for increasing the efficiency of the gas pipeline is its periodic cleaning with the use of mechanical cleaning units. The reasons for the decrease of efficiency are the presence of fluid in the pipeline interior. Fluid can be in two forms – high-viscosity resin sediments and low-viscosity liquid sediments. Sediments reduce the area of the cross-section and increase the hydraulic resistance. Regardless of the design of the cleaning units, none of them can completely remove liquid contamination. The authors analyze the causes of the flow over the moving boundary. This overflow worsens the quality of gas pipeline cleaning. At the moment when the cleaning piston meets an obstruction of liquid contaminants in the gas pipeline there is a hydraulic impact as a result of which the sealing elements of the piston deform, and part of the fluid overflows into the chamber behind the piston. The authors discover that the increase of cleaning efficiency can be achieved by reducing the amount of pressure increase (which is the result of hydraulic impact) without decreasing the piston speed. The algorithm for improving the efficiency of pipeline cleaning is suggested. It is based on the reduction of over-the-moving-boundary flow by the aeration of the liquid plug. The influence of the gas content of the liquid plug on the amount of the flow in behind-the-piston space has been investigated. A mathematical model of the process was created. On the basis of its implementation the patterns of pressure fluctuations in the gas-liquid medium are established. On the basis of the calculations, the authors have designed the graphic dependence of the pressure change in the liquid phase on the length of the obstruction and the dependence of the pressure on a piston on the gas saturation of the liquid plug.*

Key words: gas pipelines, pressure, pig, efficiency improvement, pipeline cleaning, hydraulic impact, gas-liquid plug.

## **Вступ**

Очищення газопроводів від рідинних скупчень за допомогою очисних пристроїв є технологічно складним і енергозатратним процесом, тому при його плануванні необхідно створити всі умови, які б забезпечували максимальну його ефективність.

Пропускання механічного засобу очищення під тиском газу не гарантує повного витиснення рідкої фази з трубопроводу, тобто не забезпечує 100% очищення останнього. Мета роботи полягає у виявленні чинників, які впливають на ефективність очищення трубопроводу від рідинних скупчень.

## **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**

Як вказується в [1], причиною виникнення перетікання через рухому границю рідкого середовища, що призводить до погіршення якості очищення трубопроводів, є невідповідність форм епюр швидкостей твердого тіла і рідинної пробки.

Так, епюра швидкостей рідини, що контактує з твердим тілом, повторює епюру швидкостей твердого тіла, тобто вздовж перерізу труби швидкості у всіх точках однакові. Тому у виділений в пристінній зоні елемент вливається більше рідини, ніж з нього витікає. Це призводить до підвищення тиску в пристінному шарі рідини. Якщо перемістити виділений елемент на вісь труби, то швидкість, з якою рідина вливається в нього, буде меншою за швидкість витікання. Внаслідок цього всередині елемента спостерігатиметься знижений тиск. Нерівномірність розподілу тиску по перерізу труби при-

зведе до деформації ущільнюючих елементів твердого тіла, що обумовить перетікання рідини через рухому границю і погіршить ефективність очищення.

Зі збільшенням швидкості руху твердого тіла ламінарний режим переходить в турбулентний, і епюри швидкостей твердого тіла і рідкої фази за формою наближаються одна до одної. Нерівномірність розподілу тиску по перерізу труби вирівнюється, і об'єм перетікання через рухому границю зменшується. В цьому випадку з пришвидшенням поршня підвищуватиметься ефективність очищення трубопроводу.

Однак, в момент зустрічі поршня, що рухається з великою швидкістю, з пробкою рідинних скупчень у газопроводі виникає гідравлічний удар [2]. При цьому спостерігається підвищення тиску навколо рідинної пробки. Згідно з законом Жуковського величина підвищення тиску пропорційна швидкості руху твердого тіла. У результаті гідродару деформуються ущільнюючі елементи поршня, і частина рідини перетікає в запоршневий простір. У цьому випадку збільшення швидкості поршня зменшить ефективність очищення трубопроводу.

## **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Як бачимо, існуючі на сьогоднішній очисні пристрої для видалення рідинних скупчень не позбавлені конструктивних недоліків, крім того принцип їх роботи не досліджено в реальних умовах.

Тому невирішеною проблемою залишається удосконалення конструкції поршня та його апробація.

### Формулювання цілей статті

Очевидно, щоб зробити очищення більш ефективним, слід знизити різницю тисків до і після гідроудару, не знижуючи при цьому швидкості руху поршня.

З метою зменшення величини перетікання через рухому границю під час витиснення рідини з трубопроводу поршнем необхідно зменшити модуль пружності рідини. Для цього пропонується насичувати рідину газом до утворення гомогенного двофазового середовища. Практична реалізація способу вимагає визначення раціонального газонасичення рідинної пробки і вибору шляху його практичної реалізації.

Величиною, що кількісно визначає об'єм перитікання у просторі за поршнем, є ступінь підвищення тиску в рідинній області, що виникає на границі з поршнем в момент, коли останній здригається [3]. Тому важливо оцінити, як впливає газовий вміст рідинної пробки на величину перетоків у просторі за поршнем.

### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Розглянемо процес витіснення стискаючого середовища з трубопроводу очисним поршнем. Нехай в початковий момент часу система "поршень-газорідинна пробка" перебувають в стані спокою. Стаціонарне значення тиску в газорідинній області вважатимемо рівним нулю. Нехай в деякий момент часу  $t > 0$  очисний поршень набуває початкової швидкості  $U$  і постійного прискорення. Розглянемо, як в часі підвищуватиметься тиск в газорідинній області по довжині пробки.

Характер руху газорідинної пробки перед поршнем може бути описаний системою рівнянь [4]

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\lambda \rho \omega^2}{2d} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial P}{\partial t} &= c^2 + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (1)$$

Провівши лінеаризацію рівняння руху (за А.І. Чарним) і прийнявши  $2a$  до  $\frac{\lambda \omega}{2d}$  (де  $\omega$  середня швидкість середовища), отримаємо рівняння руху у вигляді

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = 2a(\rho \omega) + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}. \quad (2)$$

Шляхом лінеаризації рівняння руху у формі (2) і рівняння нерозривності, отримаємо рів-

няння розподілу підвищення тиску в газорідинній області у вигляді

$$-\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (3)$$

де  $c = \sqrt{\frac{E\varphi}{\rho}}$  – швидкість звуку в середовищі;

$E, \varphi$  – модуль пружності та щільності середовища.

Початкові умови для даної постановки задачі запишуться у вигляді

при  $t = 0$ ;

$$P(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

Граничні умови для даної задачі знайдемо з таких фізичних міркувань. На лівому кінці газорідинної пробки ( $x=0$ ) при  $t > 0$ , лінійна швидкість руху рідини і її прискорення рівні швидкості і прискорення поршня

$$\omega(0, t) = U; \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} \Big|_{x=0} = \omega.$$

Тоді з першого рівняння системи (1) отримаємо

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = \rho \left( \frac{\lambda U^2}{2d} + \omega \right). \quad (5)$$

На правому кінці газорідинної пробки ( $x=L$ ) підвищення тиску не спостерігається

$$P(L, t) = 0. \quad (6)$$

Розв'язком рівняння (3) при початкових (4) і граничних (5) і (6) умовах шукаємо у вигляді

$$P(x, t) = v(x, t) + \gamma_1 + \gamma_2, \quad (7)$$

де  $v(x, t)$  – розв'язок відповідної однорідної крайової задачі;

$\gamma_1, \gamma_2$  – постійні коефіцієнти, які визначаються із граничних умов

$$\gamma = -\rho \left( \frac{\lambda U^2}{2d} + \omega \right); \quad \gamma_1 = -\gamma_2.$$

В такому випадку для функції  $v(x, t)$  маємо рішення на основі методу Фур'є у вигляді ряду

$$v(x, t) = \quad (8)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} a_n e^{-at} \cos \frac{2n+1}{L} \pi x \cos \sqrt{\frac{(2n+1)^2 \pi^2 c^2 - at}{4L^2}}.$$

Коефіцієнти розкладання

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L v(x, 0) \cos \frac{2n+1}{2L} \pi x dx. \quad (9)$$

Визначаючи початковий розподіл функції  $(x, 0)$  з (7), отримаємо остаточне рішення функції у вигляді

$$P(x,t) = \rho \left( \frac{\lambda U^2}{2d} + \omega \right) L \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-at}}{(2n+1)} \times \right. \\ \left. \times \cos \frac{2n+1}{2L} \pi x \cos \sqrt{\frac{(2n+1)^2 \pi^2 c^2}{4L^2} - a^2} t \right) \quad (10)$$

Проведемо аналіз отриманого рівняння (10). Позначимо

$$\omega_{np} = \frac{\lambda U^2}{2d} + \omega.$$

Ця величина є приведеним прискоренням очисного пристрою та середовища, яке з ним контактує.

Добуток  $\rho \cdot L = \rho \cdot L \cdot F / F = m / F$  є масою газорідинної пробки, таким чином

$$\rho \left( \frac{\lambda U^2}{2d} + \omega \right) L = \omega_{np}; \quad \frac{m}{F} = -\frac{I}{F}.$$

З фізичної точки зору, наведений вираз є рівнянням сили інерції поршня і середовища, яке контактує з ним, віднесеної до одиниці площі перерізу трубопроводу. Якщо діаметр трубопроводу не змінюється і відсутнє шляхове скидання рідини з трубопроводу, то ця величина не змінюється в процесі очищення, оскільки залежить тільки від прискорення поршня і не залежить від стану рідкої фази.

Газонасичення рідинної пробки не призведе до зменшення сили контактної взаємодії поршня і пробки рідких скупчень.

Величина  $t_y = 2L/c$  є тривалістю фази гідравлічного удару. З урахуванням наведених величин рівняння (10) набуде вигляду

$$P(x,t) = \frac{I}{F} \left( 1 - \frac{x}{L} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-at}{(2n+1)^2} \times \right. \\ \left. \times \cos \frac{2n+1}{2L} \pi x \cos \sqrt{\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{\tau^2} - a^2} t \right) \quad (11)$$

Газонасичення рідинної пробки, що рухається перед очисним поршнем, призведе до збільшення довжини пробки. Якщо відомий газовий склад рідинної пробки, то густина газорідинної суміші обчислюватиметься за виразом

$$\rho_c = \rho_p (1 - \varphi) + \rho_g \varphi, \quad (12)$$

де  $\rho_p$  – густина рідини;

$\rho_g$  – густина газу в робочих умовах.

Модуль пружності газорідинного двофазового середовища може бути визначений з рівняння

$$E_c = P_0 \left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \cdot \frac{1 - \varphi}{\varphi} + \frac{P}{P_0} \right), \quad (13)$$

де  $P$ ,  $P_0$  – відповідно робочий і стандартний тиски.

Тоді довжина газорідинної пробки становитиме

$$l_n = L - \frac{\rho_p}{\rho_c}. \quad (14)$$

Швидкість поширення звуку в газонасиченій рідкій фазі

$$C_c = \sqrt{\frac{E\varphi}{\rho_c}}. \quad (15)$$

Таким чином, газонасичення рідинної пробки призведе до збільшення її довжини  $l_n$  і до зниження швидкості поширення звуку в двофазовому середовищі до  $C_c$ . Тому тривалість фази гідравлічного удару зростає до  $t_c$ . Робота сил тертя в фазі гідроудару призведе до гасіння імпульсу тиску.

Для кількісної оцінки впливу газонасичення рідинної пробки на ступінь її взаємодії з очисним поршнем за рівнянням (10) розраховано зміну тиску в рідкій фазі по довжині пробки і в часі. Передбачалося, що очисний поршень виштовхує ненасичену газом водяну пробку довжиною 1000 м з трубопроводу внутрішнім діаметром 1000 мм з прискоренням 2 м/с. Навіть розглядалися випадки, коли газовий вміст рідинної пробки становить відповідно 70 % і 95 %. Результати розрахунків у вигляді графіків наведені на рисунках 1 і 2.

З графіків видно, що чим більше газонасичення рідинної пробки, тим менший градієнт тиску  $-\frac{\partial P}{\partial x}$ , і отже, менший тиск на очисний

поршень чинить рідинна пробка. Так, при газонасиченні пробки 70 % зниження тиску на поршень в порівнянні з чистою водяною пробкою становить 40,4 %, а при газонасиченні 95 % тиск на поршень знижується на 64,8 %.

З плином часу тиск у рідинній області зростає. Це викликано постійним прискоренням поршня і нестисненням рідкої фази [5]. Зі збільшенням газонасичення в рідкій фазі зростання тиску на поршень сповільнюється. Так, при чисто рідинній пробці ( $\varphi = 0$ ) тиск на поршень протягом 1 секунди зростає на 9,5 %, при газонасиченні  $\varphi = 0,7$  тиск за цей же час збільшується на 4,9 %, а при газонасиченні  $\varphi = 0,95$  зростання тиску на поршень за 1 секунду складе лише 2 %. З віддаленням від поршня зменшується як сама величина тиску, так і його зростання. Так, для чистої рідини ( $\varphi = 0$ ) збільшення тиску в середньому перерізі за 1 секунду становить 2,46 %, в той час, як в початковому перерізі (в перерізі контакту поршня і пробки рідини) зростання тиску більше, ніж в 4 рази.

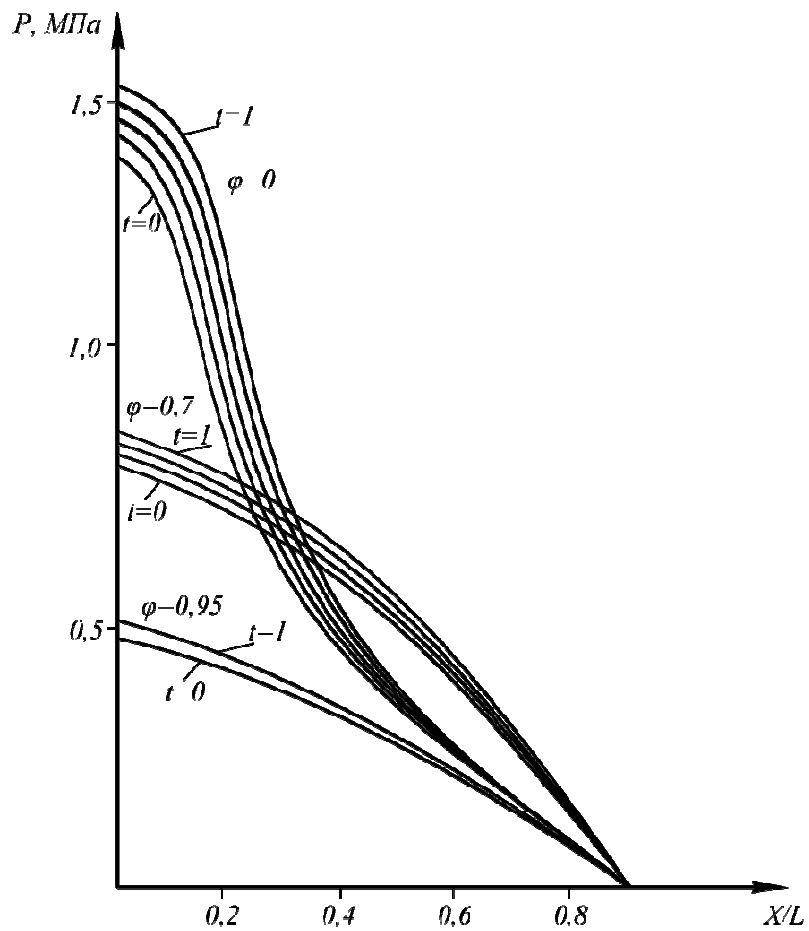


Рисунок 1 – Зміна тиску у рідинній фазі

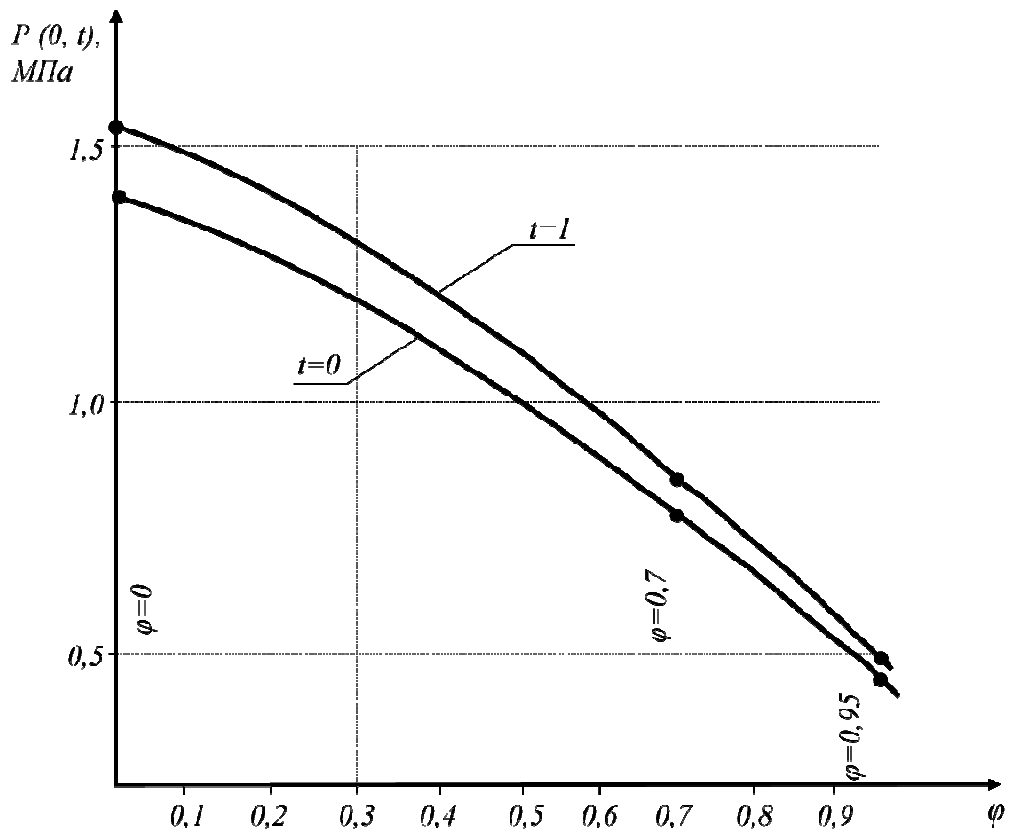


Рисунок 2 – Вплив газонасиченості рідинної пробки на величину тиску на поршень

Якщо газонасичення рідинної пробки становить  $\varphi=0,7$ , то в середньому перетині ( $x/L=0,5$ ) зростання тиску за 1 секунду становить 4,05 %, а при газонасиченні  $\varphi=0,95$  зростання тиску становить 1,4 %.

В кожному перетині рідинної пробки з часом тиск зростає. Це викликано дією інерційних сил. При насиченні рідини газом спостерігається деяке зниження тиску в початковий момент руху очисного пристрою. Цей факт має таке фізичне пояснення. При виштовхуванні поршнем нестисненої рідини на останню впливає сила, пропорційна прискоренню поршня і обернено пропорційна його масі. Оскільки маса рідинної пробки набагато перевищує масу поршня, то передана рідині сила інерції викликає значно менше її прискорення, що, в свою чергу, призводить до виникнення сили взаємодії поршня і рідини. У випадку газонасиченої рідини в перший момент виникає аналогічна сила тиску на поршень. Однак, внаслідок стискання газорідинної суміші прискорення набувають лише тільки ті шари рідини, які безпосереднього контактують з поршнем. Внаслідок незначної маси і значно менших дотичних напружень тертя ці шари набувають більшого прискорення, ніж саме прискорення поршня. Однак, в наступний момент внаслідок пружності газонасиченого середовища тиск передається наступним шарам, а в перетині перед поршнем спостерігається деякий спад тиску. При газонасиченні  $\varphi=0,7$  він становить 1,13 % від початкового тиску, а при газонасиченні  $\varphi=0,95$  падіння тиску становить 1,57 % від початкової величини.

### **Висновки**

Таким чином, зі збільшенням тривалості фази гідравлічного удару величина тиску газорідинної пробки на ущільнюючі елементи поршня зменшується, що підвищує ефективність очищення трубопроводу.

### **Список використаних джерел**

1. Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б та ін. Трубопровідний транспорт газу. Київ : АренаЕКО, 2002. 600 с.
2. Альтшуль А.А. Гидравлические сопротивления. М. : Недра, 1970. 135 с.
3. Грудз В.Я Исследование эффективности очистных устройств в газопроводах с пересеченным профилем трассы: дисс. ... канд. техн. наук. Ивано-Франковск, 1980. 140 с.
4. Жидковой М.А. Переходные процессы в магистральных газопроводах. Киев : Наукова думка, 1979. 255 с.
5. Грудз В.Я. Исследование процесса продувки газопроводов многократным пропуском очистного устройства. *Строительство трубопроводов*. 1977. № 6. С. 15-16.

### **References**

1. Kovalko M.P., Grudz V.Ya., Mihalkiv V.B ta in. Truboprovodnij transport gazu. Kyiv : ArenaEKO, 2002. 600 p.
2. Altshul A.A. Gidravlicheskie soprotivleniya. M. : Nedra, 1970. 135 p.
3. Grudz V.Ya Isledovanie effektivnosti ochistnyh ustrojstv v gazoprovodah s peresehenym profilem trassy : diss. ... kand. tehn. nauk. Ivano-Frankovsk, 1980. 140 p.
4. Zhidkovej M.A. Perehodnye processy v magistralnyh gazoprovodah. Kiev : Naukova dumka, 1979. 255 p.
5. Grudz V.Ya. Issledovanie procesa produvki gazoprovodov mnogokratnym propuskom ochistnogo ustrojstva. *Stroitelstvo truboprovodov*. 1977. No 6. P. 15-16.