

© М.М. Якимів  
ТОВ «Діпрогаз»

## Аналітичні дослідження характеру розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу

УДК 622

*У статті розглянуто задачу про вплив кількості рідкої фази в газопроводі на зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності. Подано результати аналітичних досліджень процесу перенесення крапель рідини вздовж траси газопроводу і характеру формування відкладень рідини в його порожнині. Показано принцип реалізації задачі і використання її результатів.*

**Ключові слова:** гідравлічна ефективність, крапельна волога, рідинні відкладення, розподіл.

*В статье рассматривается задача о влиянии количества жидкой фазы в газопроводе на снижение коэффициента гидравлической эффективности. Представлены результаты аналитических исследований процесса переноса капель жидкости вдоль трассы газопровода и характера формирования отложений жидкости в его полости. Показан принцип реализации задачи и использования ее результатов.*

**Ключевые слова:** гидравлическая эффективность, капельная влага, жидкостные отложения, распределение.

*Conducted an analytical study of the liquid deposits distribution nature along the gas pipeline route. This research main goal is to determine the liquid phase amount influence in the gas pipeline onto the Gas Transmission System hydraulic efficiency overall and consequently, onto the hydraulic efficiency coefficient reduction in particular. In the given article conducted abovementioned analytical researches and compared to the experimental data results, illustrated in the references for the gas pipeline transport. As a result, found out positive convergence of the projected and actual results, and generally their influence onto the hydraulic efficiency coefficient reduction. This study results are important to take into consideration for the gas transmission operating companies. The output of the found out patterns might allow increasing the Gas Transmission System hydraulic efficiency coefficient. Demonstrated task implementation principles and its results application.*

**Key words:** hydraulic efficiency, drop moisture, liquid deposits, distribution.

Старіння магістральних газопроводів та їх систем в умовах тривалої експлуатації з газодинамічної точки зору характеризується зростанням гідравлічного опору рухові потоку газу в трубах. За фіксованого перепаду тисків на початку і в кінці лінійної ділянки зростання гідравлічного опору призводить до зменшення пропускної здатності газопроводу чи системи. З фізичної точки зору, до посилення гідравлічного опору газопроводу призводить випадання рідкої фази в порожнині труб та зростання шорсткості їх внутрішньої поверхні. Джерелом надходження рідинної фази в газопровід є сам потік газу: при високих тисках і відповідних температурах газу в трубах досягається його точка роси по воді та важких вуглеводнях, що призводить до конденсації рідини. Зростання шорсткості внутрішньої поверхні стінок труб відбувається завдяки процесам внутрішньотрубної корозії. Досвід експлуатації газопроводів показує, що основною причиною зниження пропускної здатності газопроводів є наявність у трубах рідинної фази. Для оцінки міри зниження пропускної здатності газопроводу в результаті посилення гідравлічного опору труб загальноприйнято використовувати коефіцієнт гідравлічної ефективності [1, 2].

Уперше поняття коефіцієнта ефективності газопроводу запропонував І.Є. Ходанович [3] для оцінки

міри старіння газопроводу з гідравлічної точки зору. Теоретичні та експериментальні засади розвитку гідравлічної ефективності висвітлено в працях С.А. Бобровського [4], З.Т. Галіулліна [1], В.Я. Грудза [5], Є.І. Яковлева [6] та інших дослідників, де наведено методи розрахунку гідравлічної ефективності, зміни коефіцієнта в часі, аналіз причин його зниження, способи підвищення. Однак вплив кількості рідкої фази в газопроводі та її розподілу по довжині траси вивчено недостатньо через складність цієї проблеми.

Гідравлічна ефективність газопроводу пов'язана з кількістю рідини в порожнині газопроводу та з її розподілом по довжині ділянки, фізичними властивостями відкладень. Тому важливою є задача про формування відкладень у порожнині газопроводу в процесі його експлуатації.

Метою цього дослідження є створення математичної моделі перенесення крапельної вологи потоком газу і випадання крапель у порожнині газопроводу для встановлення характеру розподілу рідинних скупчень по довжині газопроводу і в часі.

Задача про дисперсію краплинної вологи по довжині ділянки газопроводу тісно пов'язана з дослідженнями характеру і кількості відкладень у порожнині газопроводу та їх властивостей.

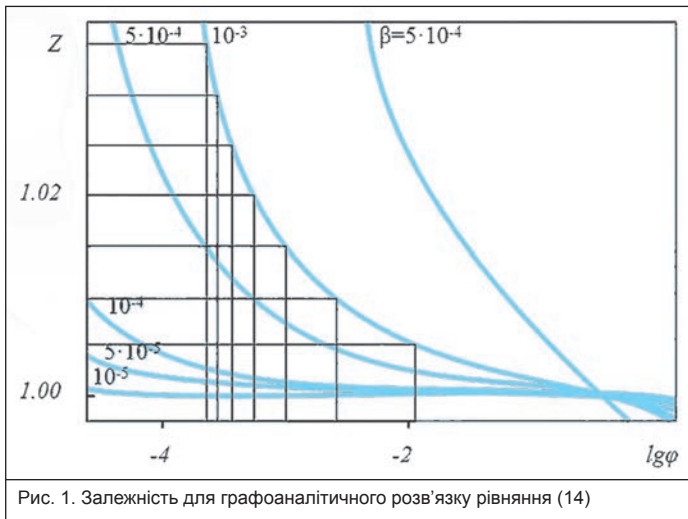


Рис. 1. Залежність для графоаналітичного розв'язку рівняння (14)

Рух потоку газу і крапель рідини в горизонтальній трубі розглядається як взаємопроникний рух двох середовищ.

Рівняння руху і зберігання маси виписуються окремо для кожного середовища, при цьому враховується їх динамічний вплив один на одного шляхом уведення сил взаємодії. Такий підхід до дослідження руху двох різних середовищ добре відомий і неодноразово використовувався багатьма науковцями.

Передбачається, що усереднений рух потоку відбувається паралельно до осі труби. Рівняння руху кожного середовища в напрямку потоку мають вигляд:

$$\begin{aligned} -F_1 \frac{\partial P}{\partial x} - T_1 + W &= 0, \\ -F_2 \frac{\partial P}{\partial x} - T_2 + W &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $F_1$  і  $F_2$  – відповідно частини площ поперечного перетину труби, зайняті газом і краплями рідини;  $P$  – тиск, що вважається постійним по перетину;  $T_1$  і  $T_2$  – сили тертя газу і крапель рідини до внутрішньої поверхні труби, віднесені до одиниці довжини;  $W$  – сила взаємодії середовищ, що рухаються, на одиниці довжини.

Рівняння нерозривності для кожного середовища можуть бути записані у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_2 F_2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 U F_2}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial \rho_1 F_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 U F_1}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – відповідно щільність рідини та газу;  $U$ ,  $W$  – швидкості крапель рідини і газу, постійні по перетину труби.

Із (2) випливає, що сумарна масова витрата рідини і газу постійна по лінійній координаті і залежить тільки від часу, тобто

$$\rho_1 F_1 U + \rho_2 F_2 W = M(t). \quad (3)$$

Якщо врахувати, що витрата крапель рідини  $M_{ж}$  набагато менша від витрати газу  $M_{г}$  ( $M_{ж} \ll M_{г}$ ), то можна прийняти, що сумарна витрата дорівнює витраті газу до появи крапель у потоці рідини.

Із метою визначення сили взаємодії між газом і краплями рідини вводимо такі припущення:

- краплі рідини мають форму кола радіусом  $r$ ; краплі рідини розсіяні по всьому перетину труби, не стикаючись одна із одною;
- в околі бічної поверхні краплі існує область впливу, що може бути подана у вигляді циліндра радіуса  $R$ , усередині якої відбувається взаємодія краплі і газового потоку;
- межі областей впливу стикаються одна з одною;
- швидкість газу щодо краплі всередині області впливу пропорційна відстані від бічної поверхні краплі.

Вважається, що лінійні швидкості газу більше швидкостей прямування крапель, тобто краплі захоплюються газовим потоком. Виходячи з цього і припущення про лінійну зміну швидкості всередині області впливу, з урахуванням теорії розмірностей і подібності можна записати для швидкості газу всередині області впливу

$$W = U + \frac{\tau Y}{\eta}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – абсолютна в'язкість газу.

Усереднену величину швидкості газу по перетину потоку знаходимо з принципу нерозривності:

$$W = \frac{\int_0^R 2\pi r y W dy}{\pi(R^2 - r^2)} = U + \frac{2}{3} \frac{\tau r}{\eta} \left( \frac{R^3/r^3 - 1}{R^2/r^2 - 1} \right). \quad (5)$$

За аналогією з дійсним газовмістом у потоці двофазних середовищ позначимо відношення площі, зайнятої краплями рідини, до загальної площі перетину ( $F = \frac{\pi d^2}{4}$ ) через  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{F_1}{F}. \quad (6)$$

Враховавши це та вираз для діаметра краплі, для швидкості газового потоку в середині області впливу одержимо:

$$W = U + \frac{2}{3} \frac{\tau_0}{\eta} \left( \frac{F}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{N^{1/2}} (1 + \varphi^{1/2} + \varphi). \quad (7)$$

Із (7) випливає, що якщо збільшувати число крапель, зменшуючи їх розмір таким чином, щоб  $U = \text{const}$ , то швидкість краплі наближається до швидкості потоку. І навпаки, зі збереженням числа крапель постійним ( $N = \text{const}$ ) та збільшенням їх розміру розходження у швидкостях потоку і краплі зростає. Цей висновок справедливий, якщо вважати, що зі змінною діаметра краплі дотичні напруження  $\bar{\tau}_0$  залишаються постійними.

Для дотичних напружень отримаємо:

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{\eta}{r} \frac{\varphi^{1/2} (1 - \varphi)}{1 - \varphi^{3/2}} (W - U). \quad (8)$$

Перетворивши отриманий вираз із урахуванням рівнянь руху і нерозривності стаціонарного газового потоку, будемо мати

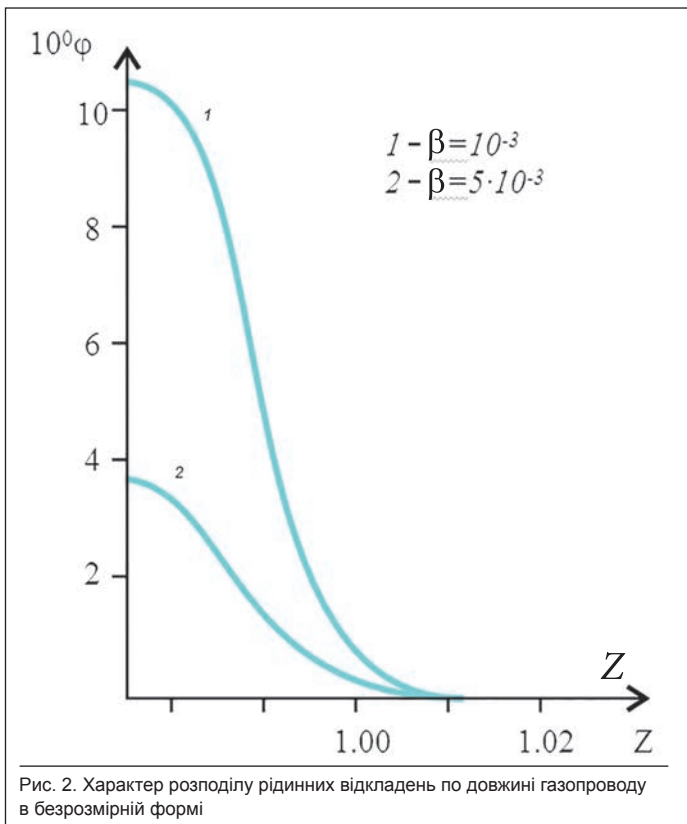


Рис. 2. Характер розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу в безрозмірній формі

$$\varphi U = \frac{M}{\rho_1 F} \left[ \varphi + \frac{\lambda M r^2}{12 \alpha \eta d F} \cdot \varphi^{1/2} (1 - \varphi^{3/2}) \right]. \quad (9)$$

Уведемо параметр

$$\beta = \frac{\lambda M r^2}{12 \alpha \eta d F}.$$

Побудуємо функцію

$$\Phi(\varphi) = \varphi + \beta \varphi^{1/2} (1 - \varphi^{3/2}). \quad (10)$$

Ця функція залежить від аргументу  $0 < \varphi < 1$  і параметра  $\beta < 1$  і змінюється у межах  $0 < \Phi(\varphi) < 1$ .

Із урахуванням виразу для швидкості газового потоку це рівняння може бути подане у вигляді

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = - \frac{M}{\rho_1 F} \frac{\partial \Phi(\varphi)}{\partial x}. \quad (11)$$

Уведемо нові змінні

$$\tau = \frac{M t}{\rho_1 F d}; \quad \xi = \frac{x}{d}. \quad (12)$$

Тоді

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = - \frac{\partial \Phi(\varphi)}{\partial \xi}.$$

Виразимо відношення  $\varphi$  через число крапель у цьому перетині та отримаємо:

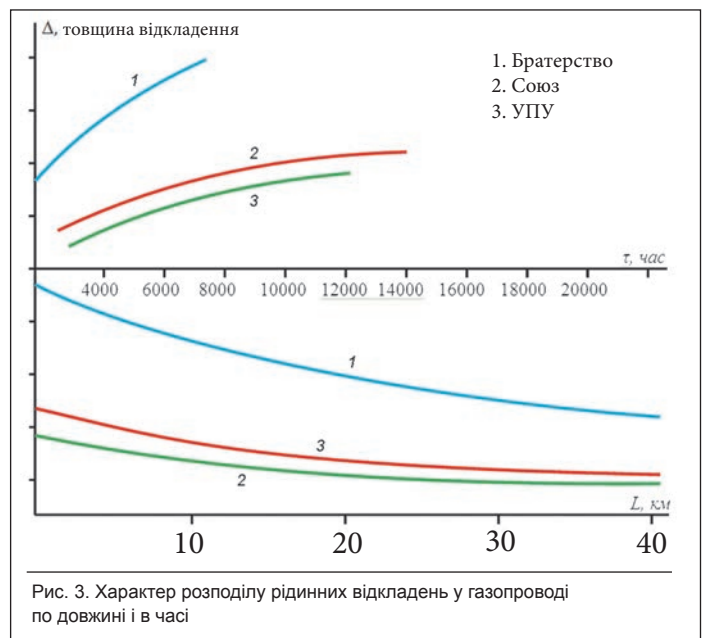


Рис. 3. Характер розподілу рідинних відкладень у газопроводі по довжині і в часі

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = - \frac{\partial N}{\partial \xi} \Phi'(\varphi), \quad (13)$$

де  $N = N(\tau, \xi)$ .

Розв'язок доцільно шукати в області автомодельності залежно від параметра  $z = \frac{\xi}{\tau}$ .

Тоді

$$\frac{dN}{dz} [z - \Phi'(\varphi)] = 0, \quad (14)$$

$$N(0) = N_0; \quad N(\infty) = 0.$$

Рівняння має два розв'язки:

$$N = \text{const і } z = \Phi'(\varphi).$$

Розв'язання задачі доцільно проводити графоаналітичним способом. Для цього будемо залежності  $\Phi'(\varphi)$  за постійних значень параметра  $\beta$ . Відкладаючи по осі ординат значення параметра  $z$ , по графіках знаходимо величину  $\varphi$  і будемо залежності  $\varphi = \varphi(z)$  при  $\beta = \text{const}$  (рис. 1). Їх аналіз покаже, що вміст крапель у газовому потоці спадає від початку газопроводу за законом, близьким до нормального закону розподілу, при цьому параметр  $\beta$  відіграє роль дисперсії.

На основі графоаналітичного розв'язку рівняння (14) можна побудувати функціональну залежність між параметрами  $\varphi$  та  $z$ , графік якої подано на рис. 2.

Аналіз побудованих кривих показує залежність функції від параметра  $\beta$ , який, по суті, характеризує гідравлічний опір потоку двофазної системи в трубі. Зі збільшенням параметра  $\beta$  зменшується максимальний розмір відносної площі, зайнятої краплями рідини на початку газопроводу (при  $z=0$ ). Проаналізувавши величини і принцип побудови параметра  $\beta$ , можемо сказати, що чим більші розміри крапель, тим менше їх знаходиться в потоці газу в газопроводі. Отже, зі збільшен-

ням коефіцієнта гідравлічного опору газопроводу параметр  $\beta$  зростає, що призводить до зменшення кількості крапель у початковому перетині газопроводу.

Зі зменшенням параметра  $\beta$  зростає крутість кривої залежності  $\varphi=\varphi(z)$ . Це означає, що зі зменшенням параметра  $\beta$  інтенсивність випадання крапель у газопроводі зростає. Проаналізувавши структуру параметра  $\beta$ , можемо сказати, що зі зменшенням коефіцієнта гідравлічного опору інтенсивність випадання крапель у газопроводі посилюється. До такого ж ефекту призводить зменшення масової витрати газу, а також збільшення динамічної в'язкості газу і коефіцієнта опору руху краплі в газовому потоці. У трубах великого діаметра кількість рідкої суспензії в газопроводі більша, а інтенсивність її випадання збільшується. Величину, що описано, приведено в безрозмірній формі – у виразі співвідношень.

Характеристика потоку  $\varphi$ , відповідно до (6), являє собою відношення площі поперечного перерізу труби, яку займає рідка фаза (краплі), до загальної площі живого перерізу, тобто її можна розглядати як безрозмірну насиченість потоку краплями рідини. Зменшення характеристики  $\varphi$  можна розглядати як процес випадання рідкої фази в порожнині газопроводу.

Параметр  $z$  у безрозмірній формі представляє просторово-часову характеристику двофазного потоку. Тому залежність  $\varphi=\varphi(z)$  при  $\beta=\text{const}$  можна трактувати як безрозмірну функціональну залежність процесу осідання рідинних крапель у порожнині газопроводу.

У [5] на основі фактичних вимірювань на реальних газопроводах побудовано залежності товщини відкладень від лінійної координати ділянки газопроводу і часу, які у вигляді графіків показано на рис. 3.

### Висновок

Порівняння тенденцій залежності обсягу рідинних відкладень у газопроводі, отриманих на основі аналітичних залежностей та фактичних даних, свідчить про збіг їх характеру. З огляду на вищесказане, проведені аналітичні дослідження допоможуть створити теоретичні засади процесу відкладання рідинних скупчень у порожнині газопроводу.

З боку дослідження ефективності особливий інтерес має вплив величини коефіцієнта гідравлічного опору газопроводу на характер процесу переносу потоком газу крапель рідини. У початковий момент експлуатації газопроводу (після очищення порожнини) коефіцієнт гідравлічного опору має мінімальне значення і величина параметра  $\beta$  мінімальна. Із цього випливає, що в потоці знаходиться максимальна кількість крапель рідини, а інтенсивність їх випадання найбільша. Тому рідкі скупчення утворюються в початковій ділянці газопроводу. Внаслідок цього величина коефіцієнта гідравлічного опору зростає, що призводить до збільшення параметра  $\beta$ . Тому кількість рідини в потоці зменшується, інтенсивність випадання крапель рідини знижується. Проте при цьому краплі рідини переносяться на більшу відстань від початку газопроводу.

### Список використаних джерел

1. **Галиуллин З.Т.** Оценка влияния инерционных сил при нестационарном течении газа в магистральных газопроводах [Текст] / З.Т. Галиуллин, И.Е. Ходанович, В.В. Девичев [и др.]; под. общ. ред. З.Т. Галиуллина // Магистральные газопроводы. Труды ВНИИГАЗ. – М., 1975. – С. 132–139.
2. **Ковалко М.П.** Трубопроводный транспорт газа [Текст] / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків [та ін.]; під. заг. ред. М.П. Ковалка. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
3. **Ходанович И.Е.** Об эффективности продувки газопровода [Текст] / И.Е. Ходанович // Газовая промышленность. – 1958. – № 3. – С. 24–25.
4. **Бобровский С.А.** Трубопроводный транспорт газа [Текст] / С.А. Бобровский, С.Г. Щербаков, Е.И. Яковлев [и др.]; под. общ. ред. С.А. Бобровского. – М.: Наука, 1976. – 491 с.
5. **Грудз В.Я.** Обслуговування і ремонт газопроводів [Текст] / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків [та ін.]; під. ред. В.Я. Грудза. – Івано-Франківськ: Лілея НВ, 2009. – 711 с.
6. **Яковлев Е.И.** Анализ неустойчивых процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами [Текст] / Е.И. Яковлев // Изв.вузов. Нефть и газ. – 1968. – № 2. – С. 72–76.

### Автор статті



#### Якимів Микола Мирославович

Заступник директора з зовнішньоекономічної та комерційної діяльності ТОВ «ДІПРОГАЗ». За фахом – інженер-механік. Спеціаліст із проектування і експлуатації газопроводів та газосховищ (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), магістр з управління міжнародного бізнесу (Київський національний економічний

університет ім. В. Гетьмана), бакалавр із фінансового консультування та управління ризиками (John Napier University, м. Единбург, Великобританія). Коло виробничих та наукових інтересів: розроблення проектної документації для забезпечення надійної експлуатації газотранспортної системи загалом та в Україні зокрема, гідравлічна та енергетична ефективності систем транспортування газу.