

УДК 622.691.4

ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОФАЗНИХ ПОТОКІВ У ГАЗОПРОВОДАХ

М.В.Гордійчук, І.І.Капцов, С.М.Стецюк

УкрНДІгаз, Україна, м. Харків, Красношкільна набережна, 20

Проведено исследование по определению истинного содержания жидкости в двухфазном потоке на горизонтальных участках промышленных и межпромышленных газопроводов, определена ее зависимость от расходного содержания, скорость смеси и вязкости жидкости. Разработана методика по определению истинного содержания жидкости, определены границы перехода в горизонтальных трубах от пробкового режима до кольцевого.

Під час руху двофазної суміші характер потоку в часі змінюється, оскільки газорідинна суміш здійснює пульсуючі рухи. Тому всі фізичні величини, які визначають рух, осереднюються за просторово-часовими координатами. Оскільки в загальному випадку витрата газу або рідини через довільний переріз труби змінює свої значення в різні моменти часу, то для кожної форми потоку є певний проміжок часу, впродовж якого ця витрату можна вважати постійною.

Відмінною особливістю односпрямованих рухів у двофазних системах є те, що вони у більшості випадків рухаються в газопроводі не суцільним потоком, а одна фаза рухається відносно другої, до того ж фаза, яка має більшу питому вагу, рухається більш повільно, гальмуючи рух легкої фази. Існує декілька видів рухів таких систем залежно від масової швидкості кожної фази (газонасиченості), а також від горизонтального чи вертикального напрямку їх руху. Окрім того, під час транспортування газорідинної суміші по газопроводах, траса яких ідентична рельєфу місцевості, на окремих ділянках відбувається зміна структури рідинної і газової фаз, що створює різноманітність структури руху.

Майже чверть століття даним питанням практично ніхто не займався, і розрахунки газопроводів здійснювались без урахування вказаних вище процесів, тому актуальність даної проблеми є очевидною. Ця проблема є складовою програми розвитку нафтогазової промисловості до 2010 року, розробленої за сприяння вчених УкрНДІгазу.

У розрахунках дійсного вмісту рідини і коефіцієнта гідравлічного опору в потоці, як правило, використовуються співвідношення, одержані для вертикальних труб. Але експериментальних даних, які б дали змогу провести перевірку прийнятих припущень, у літературі немає.

Прооце в літературі широко відомі роботи, що вказують на суттєву асиметрію горизонтального кільцевого потоку. Це роботи Рассела і

Investigation to determinate the true content of liquid into two-phase flow at horizontal sections of commercial and intercommercial gas pipelines is carried out, dependence of liquid on a consumption flow content, overall volumetric flux and fluid viscosity is determined. The method on determination of the true liquid content is developed; interfaces of transition of flow into horizontal pipes from plug flow to annular one are determined.

Ламба [1], Г.Макмануса і Р.Плетчера [2], Л.Яковіца і Р.Бродкі [3].

Під дією сил тяжіння, направлених перпендикулярно до потоку суміші, виникає циркуляційний рух півки рідини. У результаті енергія осередненого руху в горизонтальному потоці витрачається також і на здійснення роботи в межах поля сил тяжіння елементами рідинної півки. Тоді в загальному випадку застосування методів розрахунку, розроблених для вертикального потоку, на горизонтальний є необґрунтованими.

Але на великих швидкостях газового потоку і малій товщині півки осьові дотичні напруження досить великі і забезпечують приблизно рівномірний розподіл рідини по усьому перерізу півки. За цих умов закономірності зміни дійсного вмісту рідини у вертикальних і горизонтальних трубах можуть бути однаковими, оскільки гравітаційні ефекти тут малі.

Ці положення добре ілюструються дослідженнями Макмануса [4], в яких товщина півки вимірювалась методом індикації потоку траєкторіями речовинами. Досліди показали, що за високих витрат газу рідина розподілена по периметру труби приблизно рівномірно. На малих швидкостях газу, коли гравітаційні ефекти достатньо великі, горизонтальний кільцевий потік є нестійким, оскільки рідина стікає до нижньої утворюючої труби, а газовий потік намагається витіснити рідину на периферію до верхньої утворюючої каналу. У результаті цього пульсує товщина стінки, і амплітуда, змінюючись, сприяє відриву і винесенню крапель рідини газовим ядром. Звідси стає очевидною необхідність у визначенні прямих змін щодо дійсного вмісту рідини в горизонтальному кільцевому потоці і пошуку визначальних для нього критеріїв.

Сформульовано такі основні завдання:

1. Дослідити вплив в'язкості компонентів суміші на істинний газовміст і гідравлічний опір.

2. Дослідити межі існування і переходу з одного в другий потоків з різними фізичними властивостями компонентів.

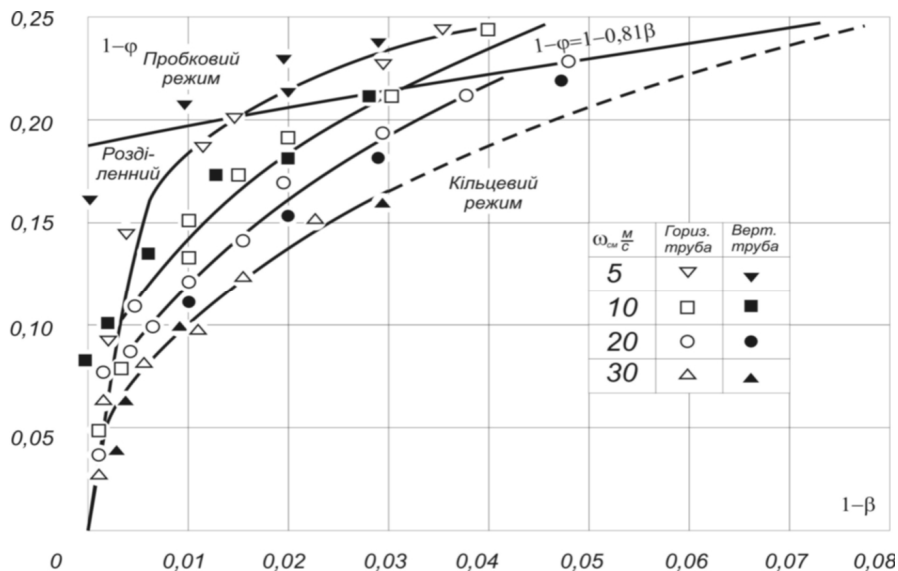


Рисунок 1 — Залежність дійсного вмісту рідини від витратного вмісту на різних швидкостях суміші, $\alpha=0^\circ$

3. Вивчити закономірності зміни дійсного газовмісту і гідравлічного опору.

Досліди проводились відповідно до основних висновків, одержаних у процесі дослідження дійсного вмісту рідини у вертикальному кільцевому потоці. Тобто, вважалось, що за решту рівних умов узагальненим параметром для дійсного вмісту є швидкість суміші.

Залежність дійсного вмісту рідини $1-\beta$ від витратного газовмісту $1-\phi$ і швидкості суміші ω в повітряно-водяному горизонтальному кільцевому потоці зображена на рис. 1. На рисунку бачимо, що дійсний вміст рідини в горизонтальному потоці, як і у вертикальному, незалежно від швидкості суміші збільшується зі збільшенням витратного вмісту рідини $1-\beta$. Певний інтерес представляє поведінка кривих за величин витратного газовмісту, близьких до нуля. Якщо у вертикальному потоці за $1-\beta=0$ і швидкості газу, меншій від швидкості реверсу плівки, криві $1-\phi=f(1-\beta; \omega_{см})$ відсікають на осі $1-\phi$ кінцеві значення, то в горизонтальному потоці практично всі криві сходяться в точці $1-\phi=0$.

У досліджуваному діапазоні лінійних швидкостей суміші 5-30 м/с можна спостерігати такі структури руху: розділену, пробкову і кільцеву.

Порівняння візуальних спостережень із закономірністю зміни дійсного вмісту суміші засвідчило, що за значень $1-\beta=0,001\div 0,004$ і швидкостей суміші 10-30 м/с спостерігається перехід від розділеного режиму до пробкового. За $\omega_{см}=5$ м/с кільцевий режим не спостерігається, розділений режим одразу переходить у пробковий. За межу переходу кільцевого режиму в пробковий для горизонтального потоку, як і для вертикального, прийнято точки перетину залежностей $1-\phi=f(\omega_{см}; 1-\beta)$ для кільцевого режиму руху із залежністю $1-\phi=1-0,81\beta$ для пробкового.

Порівняння дослідних даних за дійсним вмістом рідини в горизонтальній і вертикальній

трубі свідчать, що в області кільцевого потоку за $\omega_{см}=10; 15; 30$ м/с збіг величин дійсного вмісту рідини складає понад 95%. За швидкості $\omega_{см}=5$ м/с крива $1-\phi=f(1-\beta)$ для вертикальної труби дещо вища від кривої для горизонтальної труби. Це пояснюється малими швидкостями суміші у вертикальній трубі, коли гравітаційні ефекти більш суттєві, і потоки мають різну структуру.

Для оцінки впливу в'язкості рідини на її істинний вміст в кільцевому потоці проведені досліді, в яких в'язкість рідини змінювалась від 0,001 до 0,04 н·с/м². Результати досліджень зображені на рис. 3 у вигляді залежності $1-\phi=f(1-\beta)$ за постійної швидкості. Зі збільшенням в'язкості рідини (рис. 3) дійсний вміст рідини збільшується.

Аналіз залежності $1-\phi=f(1-\beta)$ для різних в'язкостей рідини засвідчив, що дійсний вміст рідини в горизонтальній трубі залежить від в'язкості такою ж мірою, як і для вертикального потоку, тобто:

$$\varphi_1 = \frac{k}{k + \frac{\varphi_2}{1 - \varphi_2}}, \quad (1)$$

де: $k = \left(\frac{\mu_{1,1}}{\mu_{1,2}}\right)^{0.2}$ – безрозмірний коефіцієнт;

$\mu_1; \mu_2$ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, газу.

Задовільний збіг значень $1-\phi$ для горизонтального і вертикального потоків за $\omega_{см} > 10$ м/с, однаковий вплив в'язкості на $1-\phi$ дасть змогу в розрахунках дійсного вмісту рідини в кільцевому горизонтальному потоці використовувати співвідношення руху газової фази

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \omega_1}{\partial Z} + \omega_1 \frac{\partial \omega_1}{\partial Z} \right) = -\rho_1 g + \frac{4}{D(1-\varphi)} (\tau_{zp} \sqrt{\varphi} - \tau_0) - \frac{\partial P}{\partial Z}, \quad (2)$$

ρ_1, ρ_2 – густина рідини, газу;
 $\lambda_{гр}$ – граничний коефіцієнт гідравлічного опору;
 τ_0 – дотичне напруження; одержаних для кільцевого потоку у вертикальних трубах.

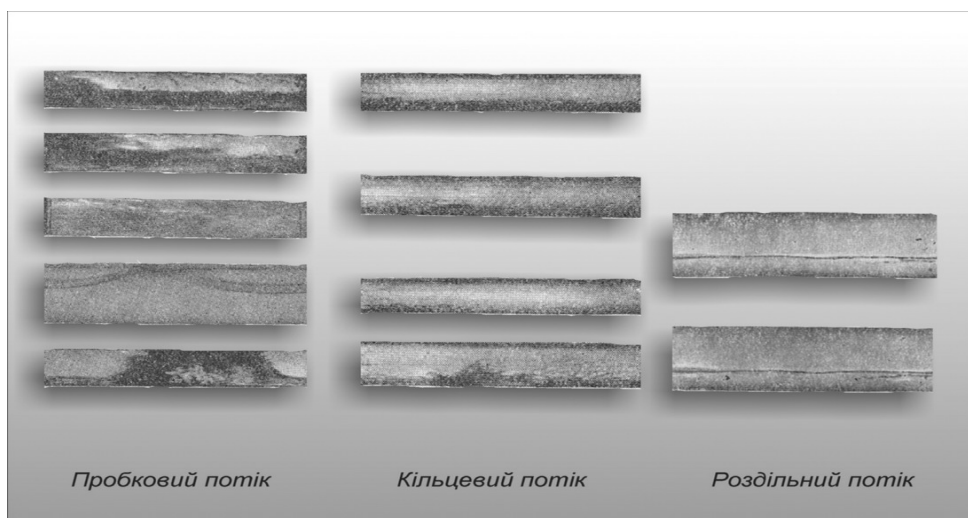


Рисунок 2 — Основні структури двофазних потоків

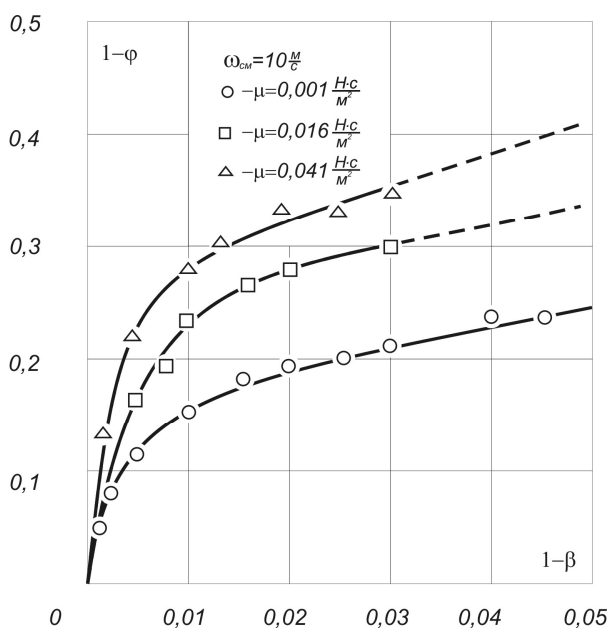


Рисунок 3 — Вплив в'язкості на істинний вміст рідини за $\omega_{см} = \text{const}$, $\alpha = 0^\circ$

та зв'язок тертя зі зведеною і фазовою швидкостями хвиль на поверхні розподілу C ,

$$\tau_{zp} = \frac{\lambda_{zp}}{8} \rho_2 \left(\frac{\omega_2}{\varphi} - C \right)^2, \quad (3)$$

де: D – діаметр газопроводу;
 g – прискорення вільного падіння;
 P – тиск;
 Z – осьова координата;
 φ – дійсний об'єм вмісту рідини;
 $1-\varphi$ – дійсний об'єм вмісту газу;
 ω_1, ω_2 – дійсна швидкість рідини і газу;
 ω_2 – дійсна швидкість газу;

У розрахунку дійсного вмісту рідини в горизонтальних трубах за цими відношеннями необхідно правильно визначити область існування кільцевого потоку.

Проведено порівняння межі переходу пробкового режиму в кільцевий за даними різних авторів, зведеними до однакових умов. Розбіжності під час визначення межі режимів (рис. 3) досить значні. Основною причиною цих розбіжностей є відсутність на сьогодні єдиного критерію для визначення межі існування режимів. У наших дослідах межа переходу від пробкового режиму до кільцевого в горизонтальній трубці визначалась за закономірностями зміни дійсного газомісту в цих режимах.

На основі експериментальних даних була одержана емпірична формула для межі переходу від пробкового режиму до кільцевого у вигляді

$$\omega_{zp}^* = (2,2 - 1,7 \cdot 10^{-3} \mu^{-0,6}) \cdot 10^{(5,3+115\mu)(1-\beta)}, \quad (4)$$

за $\omega^* > \omega_{гр}^*$ – режим руху кільцевий;
за $\omega^* < \omega_{гр}^*$ – режим руху пробковий.

Розрахунок гідравлічного опору за кільцевого руху потоку суміші в горизонтальній трубці пропонується здійснювати відповідно до моделі, розробленої для вертикального кільцевого потоку, за відношенням

$$\psi = 0,95 - (0,22 - 0,0055\Phi \cdot Re_1) \lg \frac{1500}{Re_1}, \quad (5)$$

де: Φ – число Фруда;
 Re – число Рейнольдса рідини,

$$\text{За } Re < 1500 \text{ і } \lambda_{oo} = \frac{64}{Re_1}.$$

За $Re_1 > 1500$ зведений коефіцієнт гідравлічного опору можна з достатньою точністю апроксимувати лінією, паралельною осі абсцис,

$$\varphi = 0,95 \text{ за } Re = 1500; \lambda_{од} \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (6)$$

Одержане співвідношення для зведеного коефіцієнта тертя ψ слід використовувати, як-

Результати даних досліджень є складовою частиною у розробці інженерної методики і алгоритму розрахунку руху газорідних сумішей в газопроводі, що дасть змогу швидко, з високою точністю здійснювати гідравлічні роз-

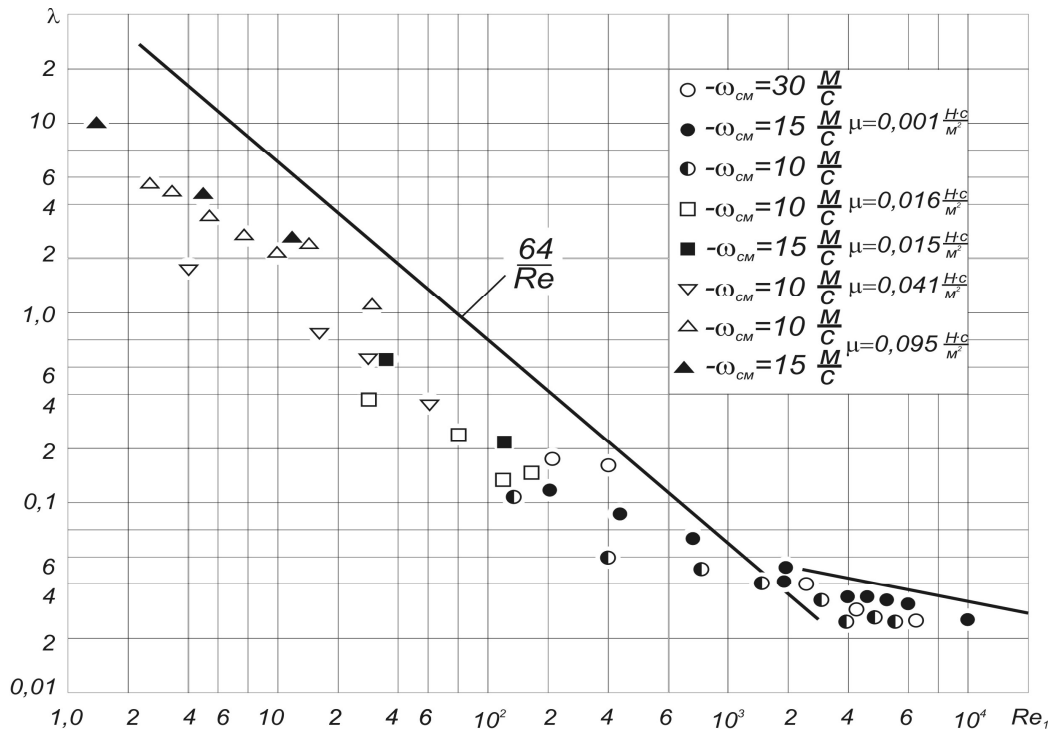


Рисунок 4 — Залежність λ від критерію Re_1 при різних швидкостях суміші і в'язкості рідини

що винесення рідини не перевищує 20%, оскільки під час великого винесення структура потоку стає дисперсно-кільцевою і змінюється математична модель руху.

На рис. 4 зображено графік залежності $\lambda = f(Re_1)$, де λ – коефіцієнт гідравлічного опору, що визначається за втратами тиску по довжині труби і дійсній середній швидкості плівки рідини Re_1 – зведене число Рейнольдса рідини.

Порівняння цієї залежності із залежністю, побудованою за експериментальними даними для вертикальних труб [5], ще раз підтверджують правильність припущення про те, що в розвинутому двофазному потоці (пробковому або кільцевому) падіння тиску, зумовлене тертям, не залежить від нахилу труби.

Висновки

1. Одержано залежність для визначення межі переходу від пробкового режиму до кільцевого з урахуванням витратних і фізичних характеристик потоку в горизонтальних трубах.

2. Одержані визначальні критерії і розроблено відношення розрахунку дійсного вмісту рідини і коефіцієнта гідравлічного опору за кільцевого режиму руху.

3. Підтверджено правильність припущення про те, що в розвинутому двофазному потоці падіння тиску, зумовлене тертям, не залежить від нахилу труби.

рахунки як діючих, так і проектних газопроводів з урахуванням структури і фізичних властивостей потоку. На основі алгоритму буде розроблена програма з використання EOM. На даний час гідравлічні розрахунки здійснюють без урахування вказаних вище параметрів. Тому застосування даної методики дасть змогу заощаджувати кошти ще на стадії проектування і, безпосередньо, під час експлуатації промислових і міжпромислових газопроводів, використовуючи результати розрахунків для вибору оптимальних параметрів транспортування.

Література

1. Russel T.W.F. Flow mechanism of two-phase annular flow / T.W.F. Russel, D.E. Lamb // Can. J. Chem. Eng. – 1965. – V 43. – P. 273.
2. Pretcher R.N. An analytic study of the film behavior in horizontal annular two-phase flow / R.N. Pretchem, H.N. McManys // Interim. Report ARO (D): Project № 3199-E, Grant DA-ARO(D)-31-124-6-188. April. 1965.
3. Jacowitz L.A. An analysis of geometry and pressure drop for the horizontal annular two-phase flow of water and air in the entrance region of pipe / L.A. Jacowitz, R.S. Brodkey // Chem. Eng. Sci. – 1964. – V 19. – P. 261.
4. McManys H.N. An experimental investigation of liquid distribution in horizontal annular two-phase flow // OOR Project № 2117,

Contract DA-30-115. Ord-992. – Interim. Rep.
№ 1, Cornell Univ., October, – 1959.

5. Арманд А.А. Исследования механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе / А.А. Арманд, М.И. Невструева // Изв. ВТИ. – 1950. – № 2.