

## ЗАХИСТ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ НАФТОПРОВОДІВ ВІД КОРОЗІЇ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕКАЧУВАННЯ НАФТИ І НАФТОПРОДУКТІВ МАГІСТРАЛЬНИМИ ТРУБОПРОВОДАМИ

Ю.І. Дорошенко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,  
e-mail: tznng@nimg.edu.ua

У процесі експлуатації магістральних трубопроводів гідравлічний опір зростає через наявність відкладень парафіну (нафтопроводи), скупчень води, конденсату чи внаслідок утворення гідратів вуглеводневих газів (газопроводи). Для зниження гідравлічного опору періодично очищують внутрішню порожнину трубопроводів спеціальними шкребками чи розділювачами.

Метою роботи є розроблення методик для оптимізації процесу перекачування нафти і нафтопродуктів у комплексі технологічних заходів із захисту внутрішньої поверхні трубопроводу від корозії.

Досягнення цієї мети передбачає розв'язання наступних задач:

1. Розробити математичну модель процесів, які забезпечують усунення умов виникнення явища канавкової корозії.

2. Розробити методику розрахунку оптимальних параметрів перекачування нафти і нафтопродуктів трубопроводами для усунення умов виникнення процесу канавкової корозії за рахунок періодичного розсіювання корозійноактивної водної фази, що рухається в нижній частині трубопроводу.

Об'єктом дослідження є процес розсіювання попутної води в потоці нафтової суміші, що рухається нафтопроводом.

У ході вирішення поставлених завдань застосовувався комплексний підхід до дослідження, що включає: аналіз і узагальнення даних з експлуатації промислових і магістральних нафтопроводів; функціональний аналіз причин аварій і відмов; використовувалися підходи і методи теорії подібності, планування експерименту та обробки дослідних даних.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні закономірностей процесу розсіювання пластової води у потоці нафтової суміші і обґрунтуванні та формуванні залежностей для розрахунку оптимальної швидкості потоку у трубопроводі та визначення оптимального кута нахилу трубопроводу.

Ключові слова: водні скупчення, швидкість винесення, висхідна ділянка, кут нахилу ділянки трубопроводу, водяна крапля

В процессе эксплуатации магистральных трубопроводов гидравлическое сопротивление возрастает по причине отложения парафина (нефтепроводы), накопления воды, конденсата или образования гидратов углеводородных газов (газопроводы). Для снижения гидравлического сопротивления внутренней полостью трубопроводов периодически очищают специальными скребками или разделителями.

Целью работы является разработка методик для оптимизации процесса перекачки нефти и нефтепродуктов в комплексе технологических мероприятий по защите внутренней поверхности трубопровода от коррозии.

Достижение этой цели предполагает решение следующих задач:

1. Разработать математическую модель процессов, обеспечивающих устранение условий возникновения явления канавочной коррозии.

2. Разработать методику расчета оптимальных параметров перекачки нефти и нефтепродуктов трубопроводами для устранения условий возникновения процесса канавочной коррозии за счет периодического рассеивания коррозионноактивной водной фазы, движущейся у нижней части трубопровода.

Объектом исследования является процесс рассеивания попутной воды в потоке нефтяной смеси, движущейся в нефтепроводе.

В ходе решения поставленных задач применялся комплексный подход в исследовании, включает: анализ и обобщение данных по эксплуатации промышленных и магистральных нефтепроводов; функциональный анализ причин аварий и отказов; использовались подходы и методы теории подобия, планирования эксперимента и обработки опытных данных.

Научная новизна исследования заключается в установлении закономерностей процесса рассеивания пластовой воды в потоке нефтяной смеси и на их основе обоснования и формирования зависимостей для расчета оптимальной скорости потока в трубопроводе и определения оптимального угла наклона трубопровода.

Ключевые слова: скопления воды, выносная скорость, восходящий участок, угол наклона участка трубопровода, водяная капля

During operation of main pipelines, the wall friction rises due to paraffin deposits (oil pipelines), water and condensate accumulation, formation of hydrocarbon gas hydrates (gas pipelines). To reduce the wall friction, the pipeline inner cavity is regularly cleaned by means of special scraping tools or splitters.

The objective of the study is to develop optimization methods for the delivery of oil and oil products within the complex technological activities aimed at the pipeline inner surface corrosion protection.

The following solutions will make it possible:

1. To develop a mathematical model of the processes ensuring elimination of the formation conditions of corrosion initiation.

2. To develop the computing method of the optimal parameters of oil and oil products delivery through pipelines to eliminate the formation conditions of corrosion initiation by periodic dispersion of corrosion-active aqueous phase flowing along the pipeline bottom.

The object of research is the process of associated water dispersion in oil mixture flow in the pipeline.

In the process of problem solving, the comprehensive approach was applied, including: data analysis and integration concerning operation of industrial and main oil pipelines, emergency and failure cause analysis, approaches and methods of similarity theory, experimental design and processing of experimental data were applied.

The scientific novelty of the study consists in determination of objective laws referring to the dispersion process of formation water in oil mixture flow and establishment of relations to calculate the optimal flow rate in the pipeline and determination of the optimal inclination angle of the pipeline.

Keywords: water accumulation, remote speed, up-going section, pipeline section inclination, water droplet

Безпечна експлуатація трубопроводів пов'язана з проблемою підвищення їх надійності та довговічності і є складним комплексним завданням, що включає в себе вирішення технічних, технологічних, економічних та організаційних аспектів. Цій проблемі присвячені численні дослідження вітчизняних і зарубіжних авторів, проте в даний час вона повністю ще не вирішена і багато питань залишаються відкритими.

Експлуатаційна надійність нафтопроводів значною мірою визначається інтенсивністю корозії стінок трубопроводу.

Окрім корозії зовнішньої поверхні трубопроводу піддаються інтенсивній внутрішній корозії, швидкість якої часто багаторазово перевищує швидкість корозії їх зовнішньої поверхні і залежить від концентрації і складу мінеральних солей, що містяться в пластовій воді, яка видобувається і транспортується в суміші з нафтою до установок підготовки нафти. За кількісними показниками (кількість і розміри дефектів) внутрішня поверхня трубопроводу кородує в 3,0-3,5 рази інтенсивніше, ніж зовнішня [1]. Термін служби трубопроводів в особливо важких умовах (наявність в продукції сірководню, вуглекислого газу, кисню, пластової води високої мінералізації) при відсутності спеціальних заходів щодо захисту їх від корозії обчислюється місяцями.

Аналіз умов експлуатації трубопроводів та існуючих способів підвищення їх довговічності в умовах активізації внутрішньої корозії свідчить, що кількість відмов трубопроводів через внутрішню корозію становить по галузі близько 90 % від їх загальної кількості. Понад 70 % аварій припадає на специфічне руйнування у вигляді "канавкового" зношування [2].

Корозія призводить щорічно до мільярдних збитків, і вирішення цієї проблеми є важливим завданням. Основний збиток, що заподіюється корозією, полягає не у втраті металу як такого, а у величезній вартості виробів, що руйнуються корозією. Ось чому щорічні втрати від неї в промислових розвинених країнах настільки великі. Справжній збиток від неї не можна визначити, оцінивши лише прямі втрати, до яких відносяться вартість зруйнованої конструкції, вартість заміни обладнання, витрати на заходи із захисту від корозії. Ще більшими є непрямі втрати через зупинення устаткування при замі-

ні деталей і вузлів, що прокородували, витікання вуглеводневих продуктів, порушення технологічних процесів.

Ідеальний захист від корозії на 80% забезпечується правильною підготовкою поверхні, і лише на 20% якістю використовуваних лакофарбових матеріалів і способом їх нанесення. Найбільш продуктивним і ефективним методом підготовки поверхні перед подальшим захистом субстрату є абразивоструминне очищення.

Економічні втрати від корозії металів величезні. За останніми даними НАСЕ в США збиток від корозії і витрати на боротьбу з нею склали 3,1% від ВВП (276 млрд доларів). В Німеччині цей збиток склав 2,8% від ВВП. За оцінками фахівців різних країн ці втрати в промислових розвинених країнах становлять від 2 до 4% валового національного продукту. При цьому втрати металу, що включають масу металевих конструкцій, виробів, обладнання, які вийшли з ладу, складають від 10 до 20% річного виробництва сталі [3].

Різноманітність методів боротьби з внутрішньою корозією (застосування інгібіторів, внутрішні покриття і т.д.) не забезпечує належного захисту трубопроводів від канавкової корозії і вимагає пошуку нових технічних рішень, спрямованих на забезпечення безпечної експлуатації, підвищення їх довговічності і стабільності функціонування. Існуючі методи боротьби з канавковою корозією не набули широкого застосування, тому що вони або не достатньо ефективні, або дорогі і вимагають значних фінансових і трудових витрат із залученням великої кількості спеціалізованої техніки.

Функціональна модель методів захисту від процесів корозії можна подати у такому вигляді (рисунок 1).

Значний внесок у розробку і вдосконалення способів видалення скупчень рідини зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: Чарний І.А., Галлямов А.К., Іванова О.Л., Касперович В.К., Щищенко Р.Н., Медведєв В. Ф., Губин В.Є., Черняєв В.Д., Одішарія Г.Е., Нечваль А.М., S. Coleman, H. Clay, D. McCurdy, R. Turner, M. Hubbard, A. Dukler, R. Mcneil, D. Lillico і багато інших.

Усе згадане дозволяє сформулювати мету і задачі наукової роботи.



Рисунок 1 – Функціональна модель методів захисту від процесів корозії

**Мета роботи.** Розроблення методик для оптимізації процесу перекачування нафти і нафтопродуктів в комплексі технологічних заходів із захисту внутрішньої поверхні трубопроводу від корозії.

Досягнення цієї мети передбачає розв’язання наступних задач:

1. Розробити математичну модель процесів, які забезпечують усунення умов виникнення явища канавкової корозії.

2. Розробити методик розрахунку оптимальних параметрів перекачування нафти і нафтопродуктів трубопроводами для усунення умов виникнення процесу канавкової корозії за рахунок періодичного розсіювання корозійно-активної водної фази, що рухається в нижній частині трубопроводу.

**Об’єктом дослідження** є процес розсіювання попутної води в потоці нафтової суміші, що рухається нафтопроводом.

**Методи досліджень.** У ході вирішення поставлених завдань застосовувався комплексний підхід до дослідження, що включає: аналіз і узагальнення даних з експлуатації промислових і магістральних нафтопроводів; функціональний аналіз причин аварій і відмов; використовувалися підходи і методи теорії подібності, планування експерименту та обробки дослідних даних.

**Наукова новизна** дослідження полягає у встановленні закономірностей процесу розсіювання пластової води у потоці нафтової суміші і обґрунтуванні та формуванні залежностей для

розрахунку оптимальної швидкості потоку у трубопроводі та визначення оптимального кута нахилу трубопроводу.

Традиційно для визначення стану фаз в багатофазних потоках використовуються численні вузькоспеціалізовані діаграми структурних форм дво- і трифазних потоків “газ-нафта-вода” [4] застосовані в умовах, близьких до експериментальних.

Найменші зміни кута нахилу трубопроводу до горизонту принципово змінюють діаграму, що робить їх непридатними для вирішення завдань в узагальненій постановці. Однак існують і аналітичні залежності, що описують особливості існування структурних форм. Наприклад, за результатами досліджень відділу Ядерних Технологій (Korea, Advanced Institute of Science & Technology) [5] залежність критичної швидкості рідинного потоку над скупченням води, отриманої з передумов теорії стійкості Kelvin-Helmholtz [6, 7], представлена у вигляді, зручному для використання в технологічних розрахунках:

$$g_{кр} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \left( 1 + \sin \frac{\Theta}{2} \right) \sqrt{\left( 1 + \frac{\rho_0}{\rho_w} \right) \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot D \cdot \cos \alpha}{\rho_0 \cdot \sin \frac{\Theta}{2}}}, \quad (1)$$

де  $\rho_0, \rho_w$  - густина нафти і води;  
 $\Theta$  - кут у перерізі трубопроводу;  
 $D$  - внутрішній діаметр нафтопроводу, мм;  
 $g$  - прискорення вільного падіння, см/с;  
 $\alpha$  - кут нахилу ділянки трубопроводу до горизонту.

Якщо швидкість потоку над скупченням перевищує критичне значення, переважає процес ерозії водного скупчення емульгуванням води хвильовими процесами на межі розділу фаз. В іншому випадку - акумуляція.

На підставі аналізу експериментальних даних [8] Шищенко Р. І. запропонував проводити розрахунок критичної швидкості потоку нафти, при якому забезпечується винесення води, за залежністю

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{D \cdot (\rho_e - \rho_n) \cdot g}{5,64 \cdot \rho_n}}, \quad (2)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр труб, м;  
 $\rho_e$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_n$  – густина нафти, кг/м<sup>3</sup>.

Однак, запропонована Шищенко Р. І. залежність не враховує в'язкість нафти та кут нахилу висхідної ділянки нафтопроводу.

Детальними експериментами з винесення води з нафтопродуктопроводів займався Касперович В. К. [9].

При визначенні швидкості винесення для висхідних ділянок з кутом  $\approx 40^\circ$  при витісненні води малов'язкими нафтопродуктами ( $v = 8 \div 10$  сСт) автором було запропоновано користуватися наступною залежністю

$$w_e = k \cdot \sqrt{g \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_n} - 1\right) \cdot d_k^{5/7} \cdot D^{2/7}}, \quad (3)$$

де  $k$  – безрозмірний коефіцієнт  $k = 2,8$ ;

$d_k$  – діаметр краплини води (відповідно до даних експериментів прийнято значення діаметра краплини в 0,2 см);

$D$  – внутрішній діаметр нафтопроводу, мм;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, см/с.

Запропоновану залежність в умовах системи “Укртранснафта” недоцільно використовувати у зв'язку з малим діапазоном в'язкості (до 10 сСт).

Із врахуванням поправки на в'язкість пропонується наступна залежність для визначення швидкості винесення води з нафтопроводу (кут нахилу висхідної ділянки  $\approx 40^\circ$ ).

$$w_e = 98 \cdot \left(\frac{D}{v_n}\right)^{1/7} \cdot d_k^{4/7} \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho} - 1\right)^{4/7}, \quad (4)$$

де  $w_e$  – швидкість винесення, см/с;

$v_n$  – в'язкість нафти, Ст ;

$D$  – внутрішній діаметр нафтопроводу, см;

$d_k$  – діаметр краплини води,  $d_k = 0,2$  см.

Швидкість винесення води для ділянок з кутами нахилу  $\leq 40^\circ$  та із врахуванням в'язкості нафти на підставі аналізу результатів експериментів із витіснення малих скупчень води, пропонується визначати за такою залежністю

$$w = 8,9 \cdot v^{0,23} \cdot d^{0,54} \cdot \left(\frac{\rho_e - \rho_n}{\rho_n \cdot d_k} \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\operatorname{tg}(\alpha)}\right)^{0,38}, \quad (5)$$

де  $w$  – швидкість винесення, см<sup>2</sup>/с;

$v$  – в'язкість нафти, см<sup>2</sup>/с;

$\rho_e$  – густина води, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_n$  – густина нафти, г/см<sup>3</sup>;

$d$  – діаметр нафтопроводу, см;

$d_k$  – діаметр краплини води (відповідно до

аналізу експериментальних даних із винесення води в розрахунках прийнято, що  $d_k = 0,2$  см);

$\alpha$  – кут нахилу висхідної ділянки нафтопроводу, град.

На основі запропонованих залежностей було проведено розрахунок швидкості винесення для нафтопроводу діаметром 1020, 720 та 530 мм та при куті нахилу висхідної ділянки від  $0,5^\circ$  до  $30^\circ$  за таких вихідних даних: густина нафти  $\rho_n = 870$  кг/м<sup>3</sup>; густина води  $\rho_e = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; в'язкість нафти  $v = 25$  сСт  $= 25 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с.

Графічна залежність зміни швидкості винесення від кута нахилу висхідної ділянки для нафтопроводу діаметром 1020, 720 та 530 мм зображена на рисунку 2.

У роботі [10] визначення швидкості винесення пропонується проводити за залежністю

$$w_{кр} = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot D \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_n} - 1\right) \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}}, \quad (6)$$

де  $w_{кр}$  – критична швидкість (швидкість винесення), м/с;

$D$  – внутрішній діаметр нафтопроводу, м;

$\alpha$  – кут нахилу висхідної ділянки до горизонту, град;

$\rho_e$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  – густина нафти, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору, який визначається за формулою Блазіуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{\operatorname{Re}^{0,25}}; \quad (7)$$

$K$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначається так:

$$K = 0,1 \cdot \frac{v_n^{0,363}}{(\sin(\alpha))^{0,332} \cdot v_e^{0,363}}, \quad (8)$$

де  $v_n$  – в'язкість нафти, м<sup>2</sup>/с;

$v_e$  – в'язкість води, м<sup>2</sup>/с.

Під час проведення розрахунків за запропонованою методикою [10] для висхідних ділянок нафтопроводу розрахована швидкість винесення значно перевищує рекомендовані швидкості руху нафти в нафтопроводах. Так, при діаметрі 1020×10 мм та куті нахилу висхідної ділянки в  $10^\circ$  швидкість винесення складає 3,17 м/с, при цьому витрата нафтопроводу дорівнює 8962,4 м<sup>3</sup>/год. Зі збільшенням кута висхідної ділянки до  $20^\circ$  швидкість винесення зростатиме до 3,55 м/с (витрата нафтопроводу 10043,4 м<sup>3</sup>/год). Для діаметра 530×8 мм та кута

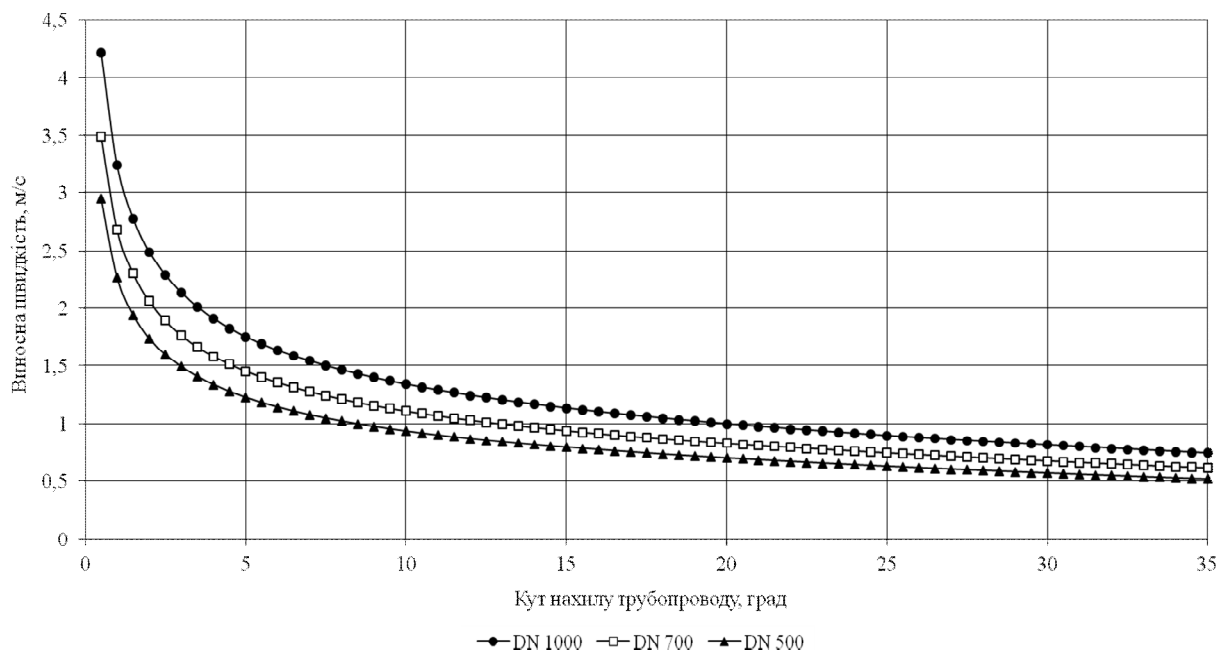


Рисунок 2 – Графічна залежність зміни швидкості виношення від кута нахилу трубопроводу

нахилу в 10° швидкість виношення дорівнює 1,971 м/с (витрата нафтопроводу при цьому 1472 м³/год).

Отже, можна зробити висновок, що згідно з [10] запропонована методика для визначення швидкості виношення води з нафтопроводу, дає значно завищені результати.

Визначення швидкості виношення води з нафтопроводу можливе за методикою, що описана авторами у роботі [11]. Дана методика пропонує визначити швидкість виношення у разі виконання такої умови:

$$Fr > Fr_g, \quad (9)$$

де  $Fr$  – фактичне число Фруда, яке визначається за залежністю

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot d}, \quad (10)$$

$Fr_g$  – характеризує умови, при яких швидкість руху нафти повністю забезпечує виношення скупчення води з нафтопроводу з висхідної ділянки нафтопроводу та визначається за залежністю:

$$Fr_g = k_w^2 \cdot \frac{2 \cdot \sin(\alpha_g)}{\lambda} \cdot \frac{(\rho_g - \rho_n)}{\rho_n}, \quad (11)$$

де  $\alpha_g$  – кут нахилу висхідної ділянки нафтопроводу до горизонту;

$k_w$  – поправочний коефіцієнт, який визначається за залежністю:

$$k_w = 0,1 \cdot \left( \frac{v_n}{v_g} \right)^{0,36} \cdot (\sin(\alpha_g))^{-0,33}. \quad (12)$$

На основі результатів отриманих за даною методикою було побудовано графік залежності фактичного та виносного числа Фруда від швидкості руху нафти в нафтопроводі при кути

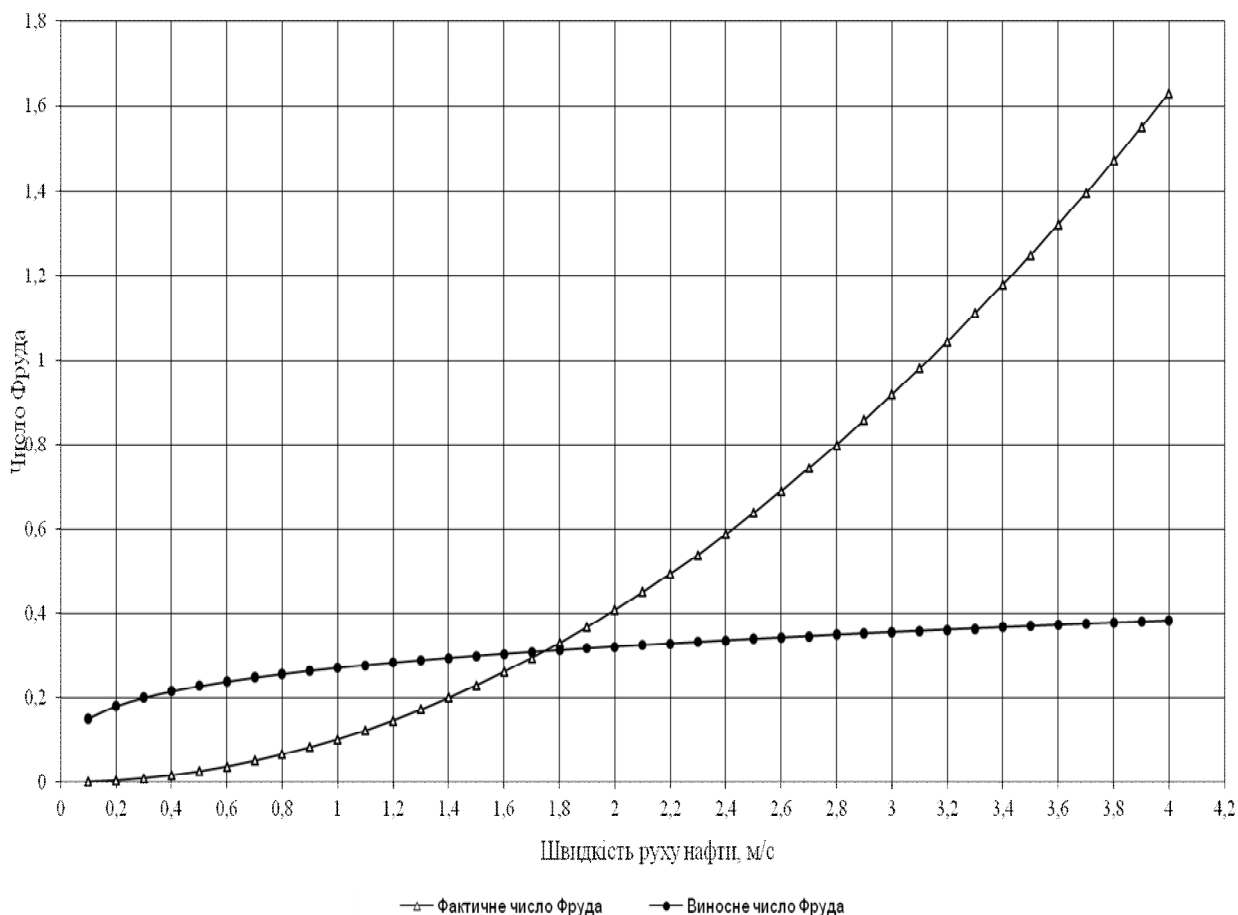
нахилу висхідної ділянки в 0,5° (рисунок 2). Як видно з рисунку 3, умова (9) виконується за швидкості руху 1,8 м/с, що відповідає продуктивності в 5089,4 м³/год. Збільшення кута нахилу висхідної ділянки до 5° призводить до зростання швидкості виношення до 2,8 м/с (витрата нафтопроводу збільшується до 7916,8 м³/год). Зі збільшенням кута нахилу до 40° швидкість виношення зростає до 4,1 м/с (витрата при цьому складає 11592,5 м³/год).

Отже, можна зробити висновок, що для горизонтальної ділянки нафтопроводу діаметром 1020×10 мм повне виношення скупчення води можливе лише за продуктивності 5089,4 м³/год, а у разі зростання кута нахилу висхідної ділянки до 5° і більше повне виношення скупчення води з нафтопроводу не можливе.

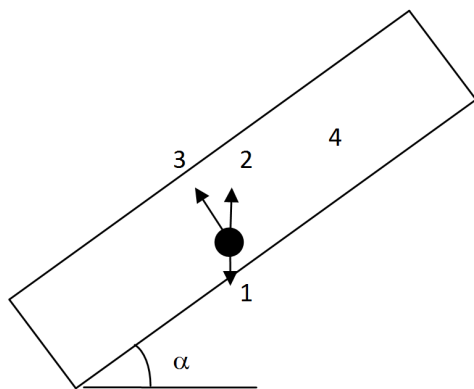
Провівши аналогічні розрахунки для нафтопроводу із зовнішнім діаметром 720 мм, можна зробити висновок, що для трубопроводу діаметром 720 мм з товщиною стінки 8 мм для горизонтальної ділянки нафтопроводу швидкість виношення складає ≈1,5 м/с (витрата при цьому – 2101 м³/год), при збільшенні кута нахилу висхідної ділянки до 10° швидкість виношення зростає до 2,5 м/с за продуктивності до 3503 м³/год.

З метою отримання аналітичного виразу для узагальненого критерію існування водного скупчення, зручного для використання в практиці експлуатації трубопровідних систем, розглянемо систему рівнянь балансу сил для кожної з фаз, зображених на рисунку 4.

Під дією потоку нафти за певних умов скупчення води в нафтопроводі розмиваються, розпадаючись на окремі краплі. Розміри крапель, як довели експерименти, мають діаметр 2-3 мм. У потоці нафти на краплі діють такі сили (рис. 3): сила ваги  $F_v(1)$ , архімедова сила  $F_a(2)$ ,



**Рисунок 3 – Залежності фактичного та виносного числа Фруда від швидкості руху нафти в нафтопроводі діаметром 1020 мм та при куті нахилу в 0,5°**



1 - сила ваги; 2 - архімедові сила; 3 - підйомна сила потоку нафти; 4 - сила винесення потоку

**Рисунок 4 – Розподіл сил, що діють на краплину води в потоці нафти**

сила підймання потоку нафти, обумовлена зменшенням тиску при збільшенні місцевої швидкості по перерізу потоку  $F_n$  (3), сила винесення потоку  $F_3$  (4).

Сила підймання потоку може бути визначена з рівняння Бернуллі

$$\frac{dp}{\rho} + g \cdot dz + d\left(\frac{u^2}{2}\right) = 0. \quad (13)$$

З цього рівняння без врахування архімедової сили (другий член рівняння Бернуллі врахований величиною архімедової сили):

$$dp = -\rho \cdot u du. \quad (14)$$

Розподіл місцевої швидкості по перерізу трубопроводу при турбулентному режимі може бути визначений за залежністю [12]

$$u = \frac{8}{7} \cdot w \cdot \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2\right]^{1/7}, \quad (15)$$

де  $w$  – середня швидкість потоку в трубопроводі;

$a$  - відстань від осі труби;

$R$  - радіус труби.

Похідна від виразу місцевої швидкості

$$du = -\frac{16}{49} \cdot w \cdot \frac{a}{R^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2\right]^{-6/7} \cdot da. \quad (16)$$

Враховуючи залежності (15) і (16) з рівняння (14), одержимо

$$dp = \rho_n \cdot \frac{128}{343} \cdot w^2 \cdot \frac{a}{R^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2\right]^{-5/7} \cdot da. \quad (17)$$

Замінімо диференціали прирощеннями оскільки величина  $da$  достатньо мала і співмірна з розмірами крапель.

$$\Delta p = \rho_n \cdot \frac{128}{343} \cdot w^2 \cdot \frac{a}{R^2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right]^{-5/7} \cdot da. \quad (18)$$

Таким чином, сила підймання, що діє на краплю діаметром  $d_{кр} = da$ , дорівнює

$$F_n = \rho_n \cdot \frac{128}{343} \cdot w^2 \cdot \frac{a}{R^2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right]^{-5/7} \cdot \frac{\pi \cdot d_{кр}^3}{4}. \quad (19)$$

Умова рівноваги краплі, що знаходиться на відстані "а" від осі труби (рисунок 3), в проекції на вісь Y

$$F_{vy} - F_{ay} - F_{ny} = 0. \quad (20)$$

Різниця сили ваги краплі і архімедової сили, яка на неї діє, в проекції на вісь Y

$$F_{vy} - F_{ay} = \frac{\pi \cdot d_{кр}^3}{6} (\rho_{кр} - \rho_n) \cdot g \cos(\alpha). \quad (21)$$

З рівняння рівноваги (20), враховуючи (19) і (21), одержуємо залежність для визначення середньої швидкості продукту для умови, коли краплі води рухаються в потоці на відстані від осі труби від "а" до "R"

$$w = 5 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{(\rho_{кр} - \rho_n) \cdot \cos(\alpha)}{\rho_n \cdot a} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right]^{5/7}}. \quad (22)$$

Умова рівноважного стану краплі в проекції на вісь X

$$F_{ax} - F_{bx} = F_{zx}. \quad (23)$$

Сила винесення потоку  $F_z$  визначається залежністю

$$F = \frac{17.5}{Re^{0.6}} \rho_n \cdot f_{кр} \cdot \frac{u_g^2}{2}, \quad (24)$$

де  $f_{кр}$  - поперечний переріз краплі ( $f_{кр} = \pi \cdot d_{кр}^2 / 4$ );

$$\text{число Рейнольдса } Re = \frac{u_g \cdot d_{кр}}{\nu};$$

$u_g$  - відносна швидкість водяної краплі, м/с;  
 $\nu$  - в'язкість нафтопродукту, м<sup>2</sup>/с.

Підставляючи вирази проекцій сил в (23), отримаємо:

$$(\rho_{кр} - \rho_n) g \frac{\pi \cdot d_{кр}^3}{6} \sin(\alpha) = \frac{17.5}{Re^{0.6}} \rho_n \cdot f_{кр} \cdot \frac{u_g^2}{2}. \quad (25)$$

Із залежності (25) визначаємо відносну швидкість водяної краплі (приймаємо середнє значення діаметра краплі  $d_{кр} = 0,002$  м)

$$u_g = 6.7 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\rho_{кр} - \rho_n}{\rho_n} \sin(\alpha) \right)^{0.71} / \nu^{0.43}. \quad (26)$$

Розрахунку швидкості винесення за розробленою методикою проводились для таких вхідних даних:

густина води  $\rho_{кр} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  
 густина нафти  $\rho_n = 800$  кг/м<sup>3</sup>;  
 радіус труби  $R = 0,5$  м;

координата крапель, що виносяться (відстань від осі труби),  $a = 0,495$  м;

кут нахилу труби  $0^\circ$  ( $\cos(\alpha) = 1$ ).

Згідно із залежністю (22) середня швидкість потоку, при якій краплі рухаються на відстані 5 мм від стінки труби, дорівнює 0,44 м/с. Місцева швидкість продукту (формула 25) дорівнює 0,29 м/с. Відносна швидкість крапель  $u_g$  дорівнює 0, оскільки кут нахилу  $\alpha = 0$  (формула (26)). Таким чином, краплі рухаються зі швидкістю нафти.

Для значення  $a = 0,45$  м (тобто коли краплі підіймаються на висоту 50 мм) відповідна середня швидкість нафти дорівнюватиме 1,03 м/с. Місцева швидкість  $u = 0,93$  м/с.

При зупинці перекачування нафти краплі води осідають зі швидкістю, що залежить від густини і в'язкості нафти, яку можна визначити із залежності (26) за умови  $\sin(\alpha) = 1$ .

Провівши аналогічні розрахунки для наступних умов: нафтопровід діаметром 1020×12 мм, густина нафти – 870 кг/м<sup>3</sup>, густина води – 1000 кг/м<sup>3</sup>, продуктивність нафтопроводу – 2400 м<sup>3</sup>/год, кут нахилу до горизонту – 0°, було отримано відповіді на такі запитання: визначення швидкості винесення руху нафти, перевірка забезпечення заданим режимом роботи нафтопроводу винесення води з нафтопроводу.

На основі отриманих результатів можна зробити наступний висновок: швидкість винесення нафти значно більша, ніж місцева швидкість руху нафти, отже даний режим не забезпечує винесення краплин води потоком нафти за кута нахилу труби 0° та віддалі від осі труби  $a = 0,01$  м. Краплина води буде рухатися вниз до нижньої твірної трубопроводу.

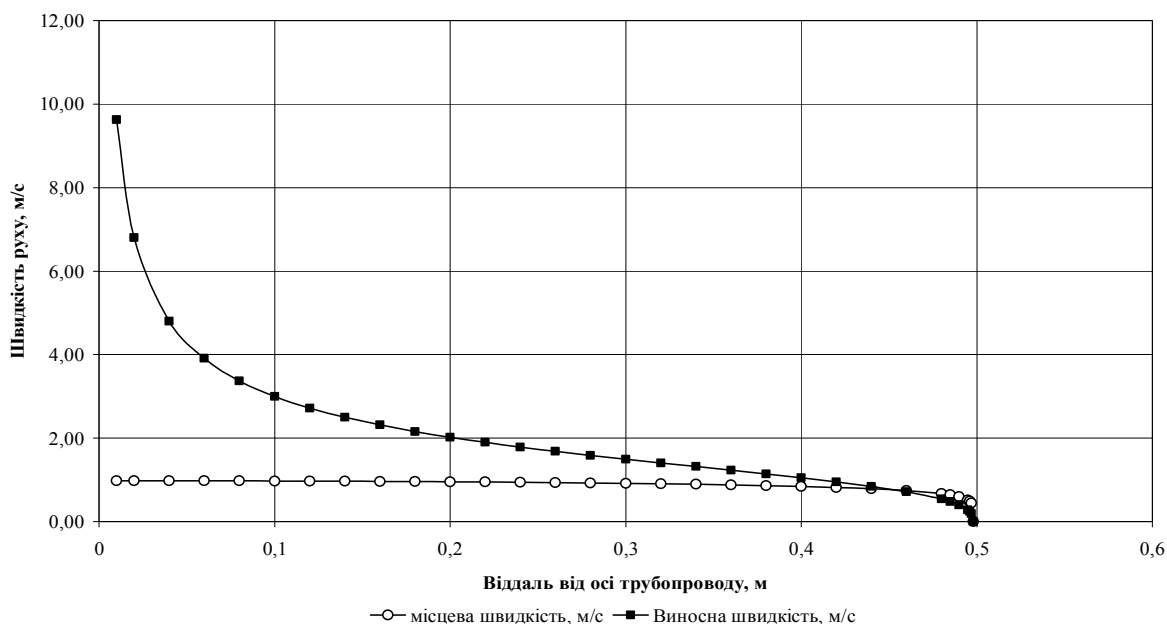
За результати розрахунку побудуємо графік залежності швидкості винесення та місцевої швидкості від віддалі від осі трубопроводу (рисунок 5).

Із рисунка 5 видно, що швидкість винесення та місцева швидкість співпадають лише на відстані від осі трубопроводу приблизно  $a = 0,46$  м, тобто лише біля стінки труби умови винесення води виконуються. А отже, за даного режиму (за продуктивності 2400 м<sup>3</sup>/год та кута нахилу 0°), краплини води будуть рухатися біля стінки трубопроводу.

При збільшенні кута нахилу до 40° умова винесення виконається на віддалі 0,42 м від осі трубопроводу. Отже, за умов даного режиму перекачування нафти краплини води практично на всій ділянці нафтопроводу будуть рухатися біля нижньої твірної трубопроводу.

Основним фактором, який ускладнює моделювання рельєфного трубопроводу, є внутрішньотрубні відкладення, особливо характерні для недовантажених режимів експлуатації. Водні скупчення – одне з поширених внутрішньотрубних утворень висхідних ділянок трубопроводів, динамічно змінюють свої розміри і положення на трасі, впливають на пропускну здатність і динамічні характеристики труби, що зумовлює використання багатопараметричних адаптивних моделей в системах автоматизова-





**Рисунок 5 – Залежність зміни швидкості винесення та місцевої швидкості від віддалі від осі трубопроводу**

ного управління, зокрема для виявлення витоків.

За результатами аналізу методик розрахунку винесення скупчень води з нафтопроводу було зроблено такі висновки.

Методики, наведені в джерелах [10] та [11], дозволяють визначити швидкість винесення за умови повного та одночасного винесення об'ємного скупчення води (залпового винесення). Питання поступового розмивання малих скупчень в даних джерелах не розглядалися. За сучасних умов, коли основним питанням постає винесення малих скупчень води при незначних обсягах транспортування нафти, вважаємо за недоцільне використання даних методик для розрахунку режиму винесення води.

На підставі аналізу експериментальних даних з винесення малих скупчень води з нафтопроводів пропонується залежність (5) для визначення швидкості винесення води. Дана залежність дозволяє визначити швидкість винесення води за умови поступового розмивання малих скупчень води з врахуванням в'язкості, густини нафти та кута нахилу нафтопроводу. Залежність (5) розроблена на підставі аналізу результатів експериментальних даних Касперовичем В. К. [9].

Можливість стрибкоподібної зміни параметрів розшарованого потоку (скупчення), що може призвести до його дроблення і винесення великими утвореннями. Однак, стійка форма скупчень також можлива за наявності таких перешкоджаючих винесенню факторів, як: збільшення кута нахилу осі трубопроводу на прилеглій ділянці; сторонній предмет в порожнині труби або гофр вище за потоком, трубопровідна арматура або інше специфічне обладнання.

В даній праці розглянуто тільки питання винесення водних скупчень, але, провівши детальний аналіз існуючих на підприємствах галузі проблем при перекачуванні нафти і нафтопродуктів магістральними трубопроводами, було зроблено висновок про доцільність розгляду питань, пов'язаних із скупченнями піску. Саме на розгляд даного питання і будуть спрямовані подальші наукові дослідження.

### Література

- 1 Доповідь на 16-му Всесвітньому конгресі з корозії в Пекіні, вересень 2005 року. – [www.16icc2005.com/](http://www.16icc2005.com/)
- 2 "Керівництво для підготовки інспекторів з візуального і вимірювального контролю якості фарбувальних робіт". – Єкатеринбург: ТОВ "ВД" Опірами", 2009-202 с., ISBN 978-5-9901098-1-5 – [www.blastguide.ru / gift](http://www.blastguide.ru/gift)
- 3 "Part Of Bridge On Route I-95 Falls Into River In Greenwich; Killing 3.". New York Times. June 29, 1983. (Англ.)
- 4 Taitel Y., Barnea D., Brill J.P. Stratified Three Phase Flow in Pipes / Int. J. Multiphase flow. – Vol. 21, № 1, 1995. – pp. 53-60.
- 5 Chun M.-H. и Sung C.-K. Onset of Slug-ging Criterion Based on Characteristics and Stability Analyses of Transient One-Dimensional Two-Phase Flow Equations of Two-Fluid Model / Int. Comm. Heat Mass Transfer. – Vol.23, - №4, 1996. – pp. 473-484.
- 6 Scott S.L. Modeling Slug Growth in Pipelines. / PhD Dissertation, The University of Tulsa, 1987.
- 7 Taitel Y., Dukler A.E. A Model of Prediction Flow Regime of Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow / AIChE J., № 22, 1976. – pp. 47-55.



8 Шищенко Р.И. Определение оптимальной скорости движения нефти в коллекторах // Труды АЗНИИ. – 1938. – Вып.1.

9 Касперович В.К. Экспериментальные исследования условий удаления воды и воздуха из нефтепродуктопроводов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1965.

10 Руководство по очистке магистральных нефтепроводов. РД 39-30-295-79. – Уфа: Издательство ВНИИСПТнефть, – 1980 – 44 с.

11 Тугунов П. И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: Учебное пособие для вузов / П. И. Тугунов, В. Ф. Новоселов, А. А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО “Дизайн Полиграф Сервис”, 2002. – 685 с.

12 Френкель Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.01.14*

*Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук Братахом М.І.  
(відділ транспортування газу УкрНДІгаз  
ДК «Укргазвидобування», м. Харків)*