

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТВЕРДИХ ДОМІШОК НА ВТРАТИ ТИСКУ В ТРУБОПРОВОДІ

Г.М. Кривенко, М.П. Возняк, Л.В. Возняк, С.О. Кривенко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,
e-mail: v o z n i a k @ t v n e t . i f . u a

Розглянуто та оцінено сучасний стан промислових трубопроводів, причини виникнення аварій на них. Запропоновано використання твердих домішок певної концентрації та гранулометричного складу для зменшення втрат тиску.

Показано вплив концентрації твердих частинок на зменшення або збільшення коефіцієнта гідравлічного опору, що призводить до зменшення або збільшення втрат тиску під час руху рідини з твердими домішками.

Запропоновано аналітичні залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса за певної концентрації твердих домішок у рідині.

Побудовано графік залежності коефіцієнта гідравлічного опору від концентрації гумової крихти за сталої швидкості потоку.

Проведено розрахунок питомих втрат напору для суміші.

Ключові слова: коефіцієнт гідравлічного опору, гідравлічний нахил, втрати тиску, концентрація, гранулометричний склад.

Рассмотрено современное состояние промышленных трубопроводов и проведена его оценка.

Предложено использование твердых примесей определенной концентрации и гранулометрического состава для уменьшения потерь давления.

Показано влияние концентрации твердых частиц на уменьшение или увеличение коэффициента гидравлического сопротивления, что приводит к уменьшению или увеличению потерь давления при движении жидкости с твердыми примесями.

Предложены аналитические зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при определенной концентрации примесей в жидкости.

Построен график зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от концентрации резиновой крошки при постоянной скорости потока.

Проведен расчет удельных потерь напора для смеси.

Ключевые слова: коэффициент гидравлического сопротивления, гидравлический уклон, потери давления, концентрация, гранулометрический состав.

The modern state of industrial pipelines, reason of origin of failures are considered and evaluated.

The use of hard admixtures of certain concentration and particle-size is offered for pressure losses reduction. Influence of concentration of particulate matters is shown on reduction or increase of friction factor, which results in reduction or increase of pressure losses in the flow of liquid with hard admixtures.

Analytical dependences of friction factor are offered on the number of Reynolds during the concentration of hard admixtures.

The chart of dependence of friction factor is plotted from the concentration of rubber crumb at permanent flow velocity.

The calculation of specific losses of head is conducted for mixture.

Key words: friction factor, hydraulic inclination, pressure losses, concentration, particle-size.

Для забезпечення безпеки складної технічної системи (СТС) висуваються такі основні вимоги:

- створення безаварійних об'єктів;
- організація системи бар'єрів чи перешкод розвитку чинників ураження;
- розроблення заходів, здатних ліквідувати наслідки аварій.

Отже, завдання забезпечення безпеки трубопровідного транспорту повинні враховуватися у нормативних документах у процесі проектування, на стадії будівництва, експлуатації, консервації та ліквідації об'єктів.

Переважає більшість об'єктів трубопровідних систем побудовано й експлуатуються за старими державними та галузевими нормативними документами, що не відповідають сучасному рівню знань та технічним можливостям, тому виникла необхідність широкого застосування засобів комплексної діагностики, що по-

переджують пошкодження трубопровідних систем, засобів адекватної інтерпретації ситуації в умовах, за яких розвиваються аварії. Об'єктивну інформацію про динаміку зміни технічного стану трубопроводу можуть дати лише результати періодичних інспекцій. Наявність такої інформації дасть змогу суттєво підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу як магістральних, так і промислових трубопроводів.

За даними, наведеними в літературних джерелах, на газоконденсатних промислах аварійність трубопроводів на порядок нижча, ніж на нафтових. Щорічно на газопромислових трубопроводах фіксується 1-2 аварії. Найбільшу небезпеку для обслуговуючого персоналу, жителів прилеглих територій та природних комплексів становлять трубопроводи та споруди на промислах, де видобувається газ з високим вмістом сірководню [1].

На нафтових промислах спостерігається масовий передчасний вихід з ладу трубопроводів, заростання перерізів труб продуктами корозії та різке зниження пропускної здатності внаслідок однієї проблеми – корозії.

Корозія також є однією з основних причин виникнення дефектів у тілі труби, які призводять до аварійних ситуацій у випадку підвищення тиску.

Газопромислові трубопроводи є одним з основних елементів в технологічному ланцюзі видобування та підготовки до транспортування газу та газового конденсату. Їх загальна протяжність відповідає протяжності магістральних газопроводів. До газопромислових трубопроводів відносяться трубопроводи об'язування свердловин, газозбірні промислові мережі, технологічні трубопроводи, міжпромислові газоконденсатопроводи, трубопроводи в системах закачування промислових стоків та ін. Враховуючи, що промислові трубопроводи прокладаються на території об'єктів, де безпосередньо присутній персонал, то до них повинні висуватися підвищені вимоги щодо надійності та безпечності.

Причини виникнення аварій на промислових трубопроводах можна умовно поділити на технічні та організаційні.

Більшість аварій, які виникають під час збору та підготовки нафти, пов'язані саме з організаційними причинами, такими, як недотримання технології виробничого процесу та правил пожежної безпеки. Можливі технічні причини – це відхилення від проектів при монтажі установок збору та підготовки нафти.

Виникнення аварій на нафтопромислах обумовлене наявністю в нафтозбірних колекторах пожежо- та вибухонебезпечного продукту під високим тиском. Збільшення в'язкості продукції нафтових свердловин з підвищенням їх обводнювання призводить до необхідності підвищення тиску на початкових ділянках трубопроводів з метою подолання гідравлічних опорів, внаслідок чого можливі розриви трубопроводів.

Відмови трубопроводів призводять до серйозних ускладнень в розробці нафтових родовищ, а саме:

- зростає витрата матеріально-технічних ресурсів;
- погіршується стан навколишнього середовища;
- значно погіршуються умови та безпека роботи обслуговуючого персоналу.

Кількість відмов промислових трубопроводів коливається від 0,15 до 1,15 на один кілометр на рік. В трубопроводах системи збору нафти найбільша кількість пошкоджень припадає на викидні лінії свердловин, з яких видобувається нафта (80–97%). Основна кількість аварій (до 90%) відбувається внаслідок корозії внутрішньої поверхні труб. При цьому 70–85% пошкоджень відбувається по тілі труб. При цьому 72–83 % відмов знаходиться в зоні нижньої твірної труби [1].

Виходячи з актуальності безаварійної експлуатації трубопроводів, більшість яких працюють не один десяток літ, потрібно шукати шляхи зниження тиску на початку трубопроводу, який є одним із основних чинників безпеки. Знижуючи в процесі експлуатації трубопроводу тиск на початку трубопроводу, зменшують ймовірність виникнення аварійної ситуації.

Оскільки одним з основних чинників, що впливають на безаварійну роботу трубопроводу, є підтримання тиску на початку трубопроводу в безпечних межах, то потрібно вирішити, у який спосіб зменшити втрати тиску на даній ділянці.

Тому дана робота присвячена дослідженню впливу твердих частинок на втрати тиску у промислових трубопроводах.

Цим актуальним питанням, що стосуються зменшення втрат тиску за заданої продуктивності, присвячено цілий ряд робіт Ю. П. Коротаєва, Б. Ф. Левицького, В. В. Чернюка, Є. П. Меднікова, Б. З. Тевєровського та ін. [2, 3, 4, 5, 6].

Одним з напрямків вирішення даної проблеми є введення в потік твердих частинок певної концентрації та гранулометричного складу, які, на думку багатьох авторів, можуть впливати на зниження гідравлічних втрат.

Метою даної роботи є дослідження впливу твердих домішок на перепад тиску в трубопроводі, і з'ясувати, чи є можливість використовувати тверді домішки для зменшення перепаду тиску. Для цього використано готові експериментальні дані, де досліджувався вплив твердих частинок при течії рідини на гідравлічні опори, які проводилися у Івано-Франківському інституті нафти і газу [7]. При цьому для проведення експериментів використовувалася гума крихта різної концентрації та гранулометричного складу. Досліджувалося вплив крихти на гідравлічні опори.

Враховуючи, що в дослідженнях об'ємна кількість рідини набагато перевищувала кількість твердих частинок, розрахунки коефіцієнтів гідравлічного опору, чисел Рейнольдса проводилися відносно потоку рідини. Цей підхід, хоча і формальний, але дозволяє найбільш повно установити вплив твердих частинок на течію рідини, а також дає можливість практично використовувати знайдені сумарні коефіцієнти опору у відносно простому рівнянні для рідини. При цьому точність одержаних результатів при розв'язанні практичних задач з використанням рівнянь для рідини збільшується, оскільки використовуються реальні сумарні коефіцієнти опору, знайдені експериментальним шляхом.

Для рідин втрати напору на тертя визначаються за допомогою формули Дарсі

$$h_{\text{тер}} = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного опору;

v – середня швидкість;

l – довжина трубопроводу;

d – внутрішній діаметр;

g – прискорення вільного падіння.

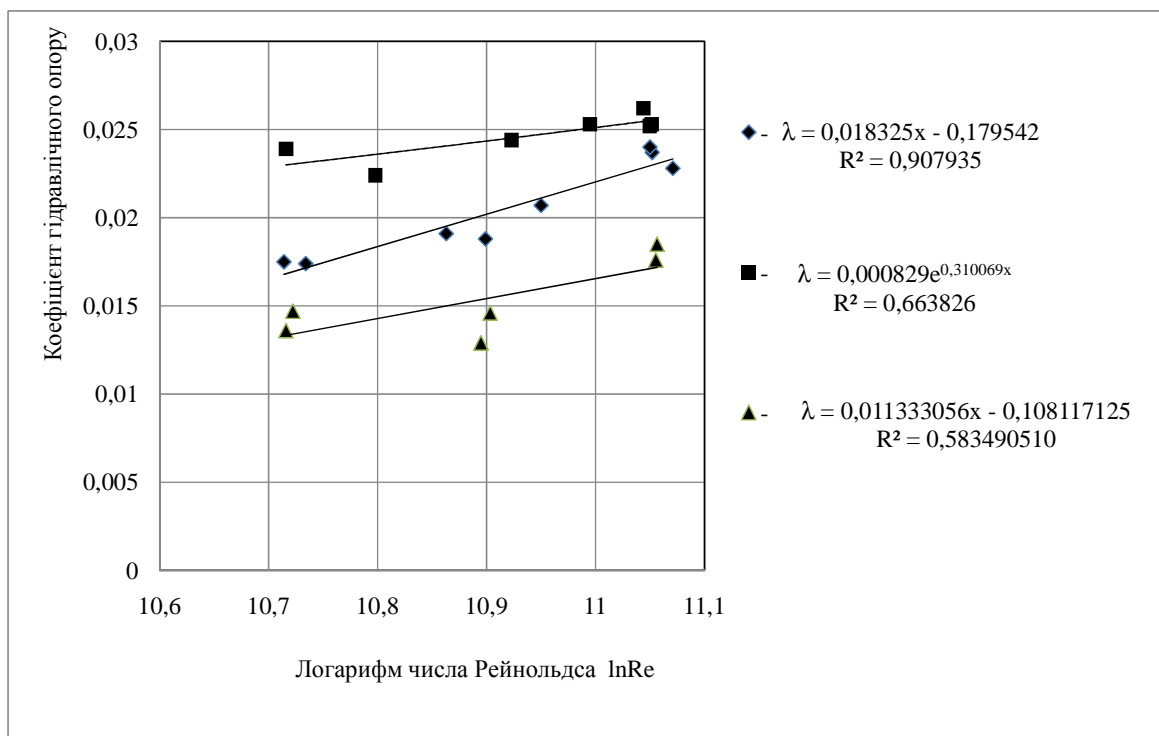


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса за концентрації твердих домішок $c = 0,25\%$

Таким чином, згідно з формулою (1) знаходили коефіцієнти гідравлічного опору для води та сумарні коефіцієнти гідравлічного опору під час руху суміші води з твердими частинками. Оскільки втрати тиску

$$\Delta p = \rho g h_{\text{мер}} \quad (2)$$

визначено за результатами вимірювання тисків на початку та в кінці горизонтального трубопроводу довжиною 15,5 м, то з (2) легко знайти втрати напору. Витрата рідини визначалася за допомогою діафрагмового витратоміра.

Середня швидкість води або потоку з твердими частинками визначалася за формулою

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (3)$$

де S - площа поперечного перерізу трубопроводу.

Число Рейнольдса знаходили відносно потоку рідини

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (4)$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Обробка проведених експериментів дала змогу виявити та оцінити вплив твердих частинок на рух рідини і показати, що нехтування цим впливом може призвести до помилок в розрахунках тисків, необхідних для транспортування вуглеводневих енергоносіїв промисловими трубопроводами.

Побудовані залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для різної концентрації та гранулометричного складу гумової крихти. Порівняння коефіцієнтів гідравлічних опорів при течії води без домішок та з

твердими частинками свідчить, що за певної концентрації крихти та гранулометричного складу спостерігається зниження гідравлічного опору.

У результаті математичної обробки експериментальних даних побудовано графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса (рисунки 1–3), на яких видно, що за концентрації 0,25 %, 0,5 % та 1 % твердих частинок у потоці води є різні значення коефіцієнта гідравлічного опору при русі частинок різної форми при однакових числах Рейнольдса.

Для опису залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса побудовані лінії тренду засобами MS Excel на основі точкової діаграми за фактичними експериментальними даними.

Для визначення достовірності одержаних математичних моделей використано значення похибки апроксимації (R^2). Чим ближче значення (R^2) до одиниці, тим точніше обрана модель.

У роботі наведено математичні моделі, які описують залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса за різних концентрацій домішок та гранулометричного складу. Досліджувалася концентрація домішок у межах 0,25...4 %. Гранулометричний склад гумової крихти наступний:

- до одного міліметра;
- від одного до двох міліметрів;
- від двох до трьох з половиною міліметрів.

У наведених математичних моделях $x = \ln Re$, $y = \lambda$.

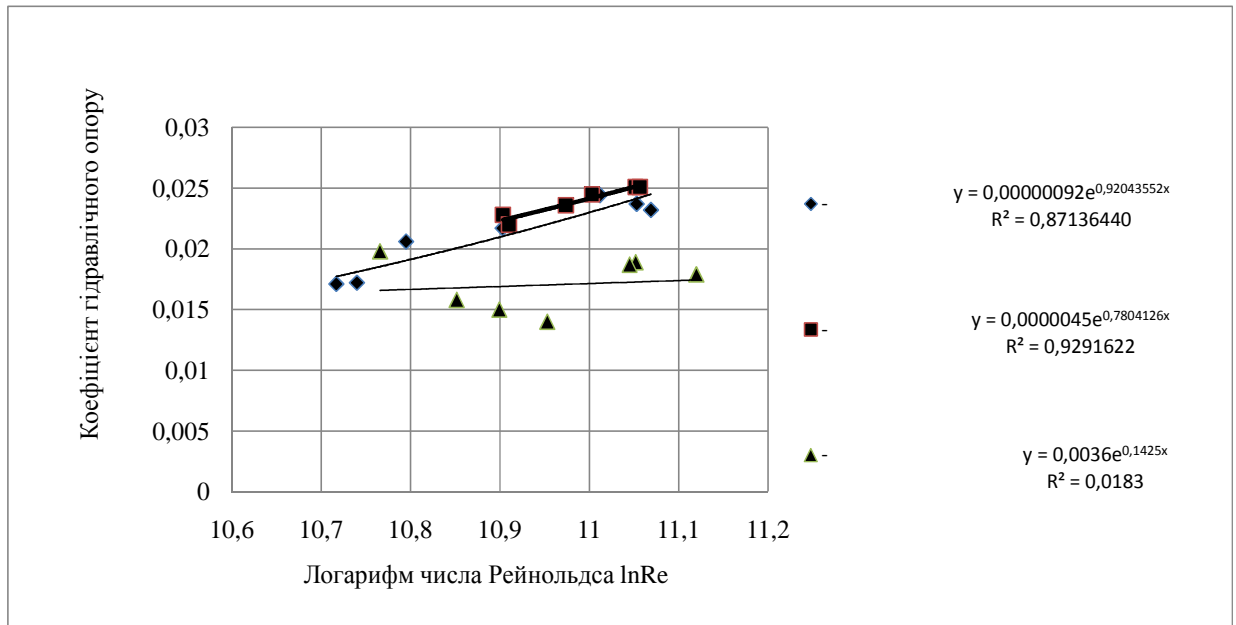


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса за концентрації твердих домішок $c = 0,5 \%$

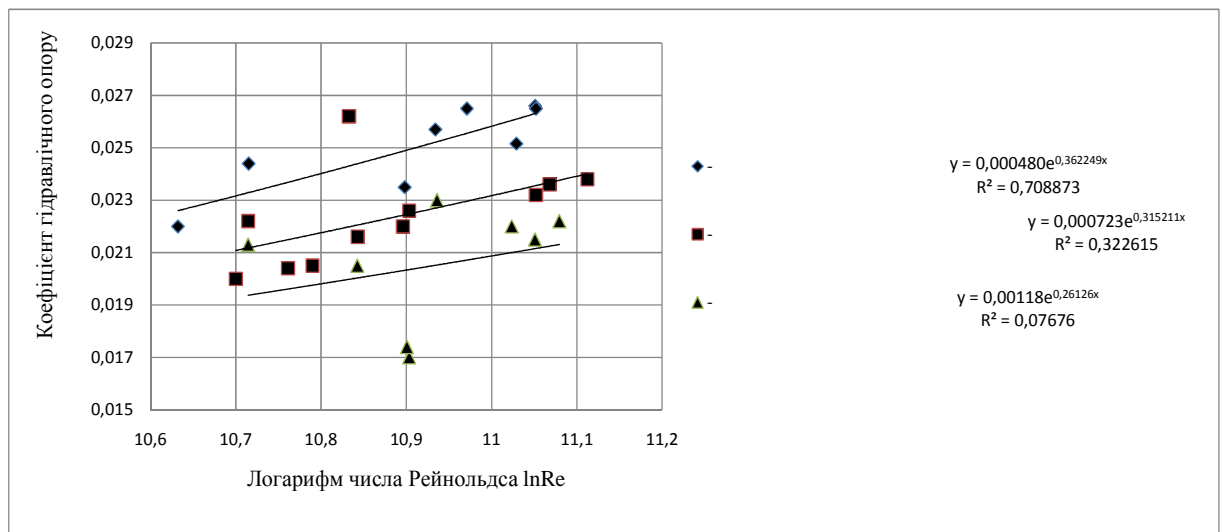


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса за концентрації твердих домішок $c = 1 \%$.

Із аналізу наведених математичних моделей випливає, що за концентрації $c = 0,25 \%$, в залежності від гранулометричного складу гумової крихти, одержано математичні моделі для визначення коефіцієнта гідравлічного опору за відомим числом Рейнольдса лінійні та експонентна з високим ступенем достовірності. А за концентрації твердих частинок $0,5\%$ та 1% для частинок розміром від 2 до 3,5 мм наведено моделі з низьким ступенем достовірності. Для досягнення вищого ступеня достовірності необхідно розглянути різноманітні типи апроксимуючої залежності. Після побудови ліній тренду кожний результат пропонується оцінити шляхом ранжування за кількома критеріями, які характеризують достовірність, відповідність, надійність запропонованої моделі.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що тверді частинки, концентрація яких дорівнює $0,25 \%$ та $0,5 \%$, розміром від 2 до 3,5 мм поздовжньої форми рухаються прямолінійними траєкторіями, при цьому розбивають вихори та зменшують опір. Зі зростанням концентрації твердих частинок до 1% і вище зменшення гідравлічного опору не спостерігається.

Одержані результати підтверджують висновки проведених раніше експериментальних досліджень Ю. П. Коротаєва при течії повітря з невеликою кількістю рідини по вертикальних трубах, що домішки в турбулентному потоці можуть суттєво впливати на його структуру.

Важливою особливістю одержаних результатів досліджень з твердими частинками є те, що вони збігаються з результатами, одержани-

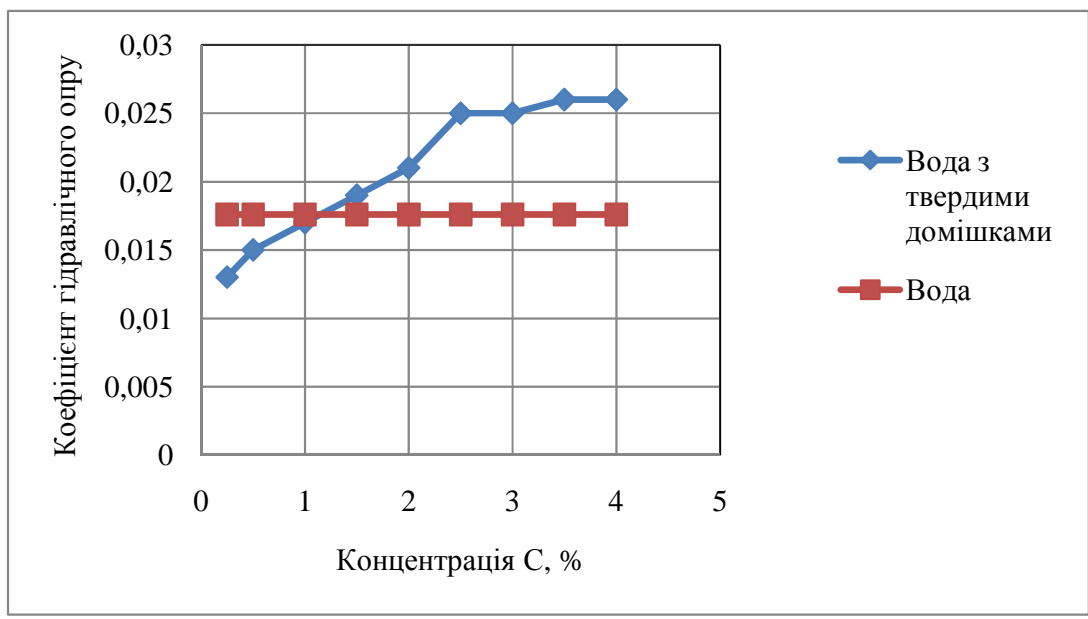


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від концентрації твердих домішок за швидкості 1,5 м/с

ми Ю. П. Коротаєвим для невеликих кількостей рідини, тобто, коли коефіцієнти опору, починаючи з деякого числа Рейнольдса, стають меншими за коефіцієнт опору для повітря.

Одними з перших дослідників цього явища були Томс, Ю. П. Коротаєв. Це явище, відоме також як ефект Томса, викликало великий науковий та практичний інтерес. Запропоновано близько трьох десятків гіпотез, в яких намагаються пояснити ефекти, але загальнопризнаної теорії зниження опору домішками не існує. Це пов'язано із складністю вивчення явища, яке, з позицій гідродинаміки, має ряд аномалій.

Загальним елементом більшості запропонованих теорій є поняття анізотропії в'язкості. Встановлено, що зниження опору викликають частинки подовженої форми. Потрапляючи в рідинний потік, через наявність великого градієнта швидкості у ламінарному підшарі та перешідному підшарі подовжені частинки орієнтуються більшою віссю вздовж потоку. При зсуві у площинах паралельних орієнтації частинок, вплив домішок на в'язкість розчину є мінімальною. Наявність динамічної анізотропії в'язкості призводить до більш інтенсивного гасіння поперечних пульсацій. В турбулентному ядрі, де градієнт швидкості відносно невеликий, динамічна анізотропія в'язкості практично відсутня.

Припускається, що дія домішок на потік призводить ламінізацію пристінних шарів течії, товщина ламінарного підшару збільшується.

Отже, спочатку при збільшенні концентрації опір знижується, відтак – збільшується. Максимальне пониження коефіцієнта гідравлічного опору за розміру частинок від 2 до 3,5 мм спостерігається при концентрації $c = 0,25\%$.

За результатами проведених розрахунків побудовано графік залежності коефіцієнта гідравлічного опору від концентрації гумової

крихти в потоці за сталої швидкості (рис. 4). З аналізу рисунка випливає, що за концентрації $c = 0,25\%$ за швидкості 1,5 м/с відбувається зниження коефіцієнта гідравлічного опору на 26 % порівняно з течією води. Коефіцієнт гідравлічного опору під час руху води за даної швидкості дорівнює 0,0176. Із збільшенням концентрації твердих частинок до $c = 0,5\%$ зниження коефіцієнта гідравлічного опору спостерігається на 15 %. За концентрації $c = 1\%$ коефіцієнти гідравлічного опору води та суміші збігаються. При збільшенні концентрації твердих домішок від $c = 1\%$ і вище коефіцієнт гідравлічного опору зростає.

Як видно із рисунків 5, 6, за швидкості руху 1,5 м/с відбувається найбільше зниження коефіцієнта гідравлічного опору за концентрацій твердих частинок $c = 0,25\%$ та $c = 0,5\%$. Із збільшенням швидкості коефіцієнт гідравлічного опору починає зростати.

З аналізу графіків випливає, що за концентрації $c = 0,25\%$ за швидкості 1,5 м/с коефіцієнт гідравлічного опору суміші складає 0,013, а під час руху води – 0,0176.

Отже, під час руху води з домішками гумової крихти залежність коефіцієнта гідравлічного опору від швидкості має екстремальний характер. Спочатку зі збільшенням швидкості опір знижується, відтак – збільшується.

За концентрації твердих частинок більше 1% спостерігається підвищення коефіцієнта гідравлічного опору за однакових чисел Рейнольдса.

При збільшенні опору залежність питомих втрат напору (гідравлічного нахилу) для гідросуміші можна подати у такому вигляді:

$$i = i_0 + \Delta i, \quad (5)$$

де i_0 – питомі втрати напору однорідної рідини;

Δi – додаткові питомі втрати напору.

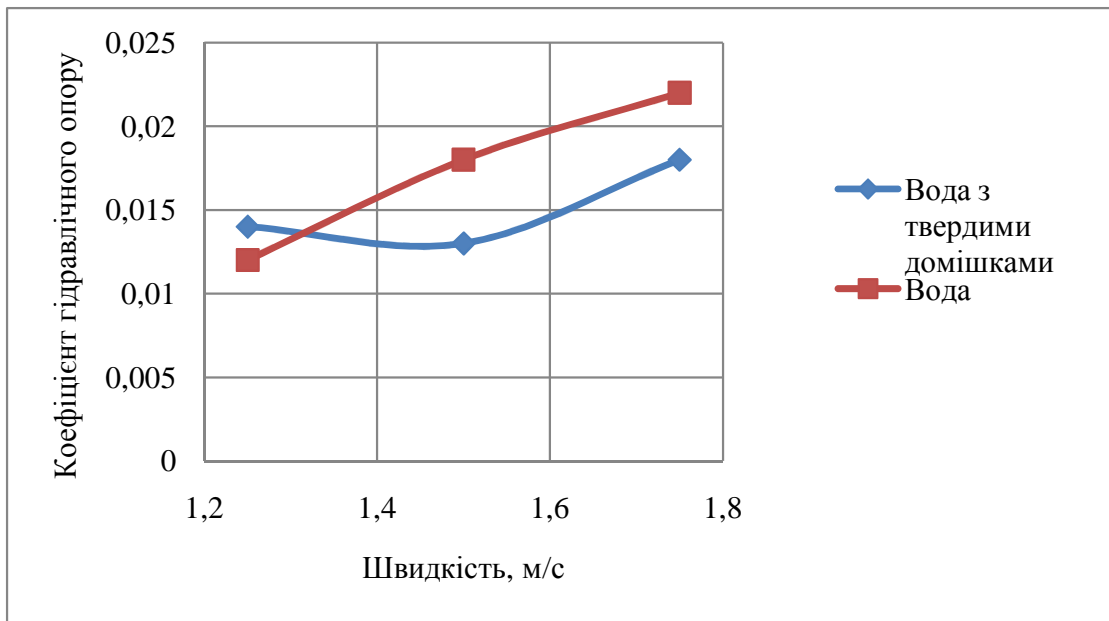


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від швидкості за концентрації гумової крихти $c = 0,25\%$

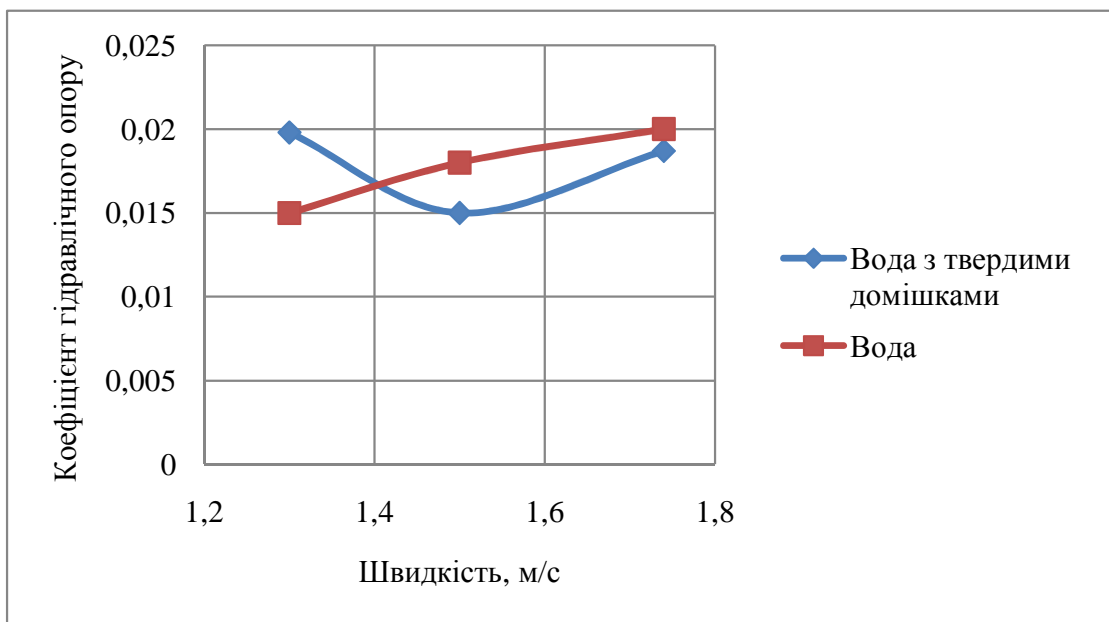


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від швидкості за концентрації гумової крихти $c = 0,5\%$

Розрахуємо, як впливають тверді домішки на втрати тиску. Наприклад, за концентрації твердих домішок $c = 4\%$ втрати тиску складають

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot i \cdot l = 998 \cdot 9,81 \cdot 0,0828 \cdot 15,5 = 12565 \text{ Па},$$

де i – гідравлічний нахил.

Втрати тиску під час руху води дорівнюють 8604 Па.

Отже, під час руху води з гумовою крихтою розміром від 2 до 3,5 мм, концентрація якої $c = 4\%$, втрати тиску зростають на 46% порівняно з рухом води без домішок.

Висновки

З аналізу проведених досліджень випливає, що в залежності від концентрації твердих частинок та їх гранулометричного складу відбувається зниження або підвищення коефіцієнта гідравлічного опору, що призводить до зменшення або збільшення втрат тиску під час руху рідини з твердими домішками.

Завданням наступних досліджень є прогнозування виникнення аварійних ситуацій на промислових трубопроводах з комплексним урахуванням чинників, які впливають на ризики виникнення небезпек.

Література

- 1 Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с.
- 2 Коротаяев Ю. П. Определение забойных давлений газовых скважин с учетом небольшого количества жидкости и твердых примесей / Ю. П. Коротаяев, Л. В. Возняк. – Деп. в УкрНИИНТИ, 6.05.86, №1179.
- 3 Левицкий Б. Ф. Местные сопротивления при многократной перекачке слабоконцентрированных водных растворов полиакриламида / Б. Ф. Левицкий, В. В. Чернюк // В кн. Теплоэнергетические системы и устройства: Вести Львовского политехнического института. – Львов: Вища школа, 1982. – № 160. – С.40 – 45.
- 4 Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. П. Медников. – М.: Наука, 1981. – 176 с.
- 5 Теверовский Б. З. К вопросу движения твердой фазы аэрозоля при высоких значениях числа Рейнольдса / Б. З. Теверовский // Инж.-физ. журн. – 1977. – Т. 33. – № 3. – С.405 – 411.
- 6 Чернюк В. В. Влияние добавок, снижающих турбулентное трение, на местные гидравлические сопротивления: автореферат диссертации / В. В. Чернюк. – Киев, 1985. – 19 с.
- 7 Возняк Л. В. Разработка методики расчета и исследование влияния твердых частиц на работу скважин и промышленных трубопроводов: автореферат диссертации / Л. В. Возняк. – М., 1987. – 22 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
12.09.14*

*Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
Степ'юком М.Д.
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)*