

Міністерство освіти і науки України

**Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу**



УДК 622.691.4.004.67

ЯКИМІВ Микола Мирославович

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

м. Івано-Франківськ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: **Грудз Володимир Ярославович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Міністерства освіти і науки України (м. Івано-Франківськ)

Офіційні опоненти:

Банахевич Юрій Володимирович, доктор технічних наук, ПАТ «Укртрансгаз», начальник відділу експлуатації лінійної частини магістральних газопроводів Департаменту транспортування газу (м. Київ).

Костів Василь Васильович, кандидат технічних наук, заступник директора УМГ «Прикарпаттрансгаз» (м. Івано-Франківськ).

Захист відбудеться 22 жовтня 2015 р. о 10 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 11 вересня 2015 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04,
кандидат технічних наук, доцент



Пилипів Л.Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Гідравлічна ефективність газотранспортних систем відображає процес «старіння» магістральних газопроводів з плином часу. Коефіцієнт гідравлічної ефективності загальноприйнято вважати діагностичною характеристикою, яка ставиться у відповідність технічному стану лінійної частини газопроводу, і від її значення на певний момент часу приймається рішення про подальшу експлуатацію газотранспортного об'єкту чи переведення його в сферу обслуговування для проведення відновлювальних заходів. Отже, достовірність значення коефіцієнта гідравлічної ефективності визначає стратегію подальшої експлуатації системи транспортування газу. Неадекватне числове значення коефіцієнта гідравлічної ефективності може призвести до передчасного прийняття рішення про проведення профілактичної очистки газопроводу, що викличе неоправдані витрати, або до експлуатації газопроводу з перевитратою паливного газу. Підвищення коефіцієнта гідравлічної ефективності української газотранспортної системи всього на 1% призведе до збільшення річного обсягу транспортування газу понад 1 млрд. кубометрів. Важливу увагу слід також звернути на часовий тренд коефіцієнта гідравлічної ефективності. Різне падіння його числового значення свідчить про зміну технічного стану лінійної ділянки газопроводу, причину якого слід терміново встановити шляхом додаткового використання спеціальних методів діагностики з метою запобігання виникненню аварійних ситуацій. Тому для сфери експлуатації магістральних газопроводів важливо бути впевненими в достовірності визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності, як діагностичної ознаки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на підвищення надійності експлуатації та ефективності газотранспортного комплексу і окреслених Національною програмою «Концепція розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2009 – 2015 рр.».

Мета і завдання дослідження. Метою проведення досліджень процесів гідравлічної ефективності в газопроводах і газотранспортних системах є підвищення точності і вірогідності прогнозування гідравлічного стану газотранспортної системи з урахуванням всіх видів витрати енергії на транспортування газу.

Дана мета реалізується через розв'язання наступних задач досліджень:

- аналіз перенесення крапельної вологи потоком газу і її відкладення в порожнині газопроводу;
- дослідження гідравлічної ефективності складних газотранспортних систем;
- дослідження впливу втрат внутрішньої енергії газового потоку на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності;

- урахування всіх видів енерговитратна транспорт газу при прогнозуванні коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів і газотранспортних систем.

Об'єктом дослідження є гідравлічна ефективність газопроводів і складних газотранспортних систем ПАТ «Укртрансгаз».

Предметом дослідження є енергетичні характеристики процесу транспортування газу і їх вплив на гідравлічну ефективність.

Методи дослідження: системний аналіз експлуатаційних параметрів ГТС, традиційні методи аналізу показників експлуатації лінійної частини газопроводів, методи побудови математичних моделей та їх реалізації, кореляційно-регресійний аналіз, факторний аналіз, методи програмування, виявлення впливу організаційно-технічних чинників на ефективність експлуатації.

Положення, що захищаються. Вплив дисипативних втрат енергії при транспортуванні газу на закономірності формування рідинних відкладень в газопроводі у взаємозв'язку з гідравлічною ефективністю.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше

- на основі статистичного і регресійного аналізу і аналітичних досліджень показників експлуатації лінійної частини газотранспортних систем показано вплив дисипативних втрат енергії газового потоку на гідравлічну ефективність;
- запропоновано методи визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянок складних газотранспортних систем шляхом зміни технологічної схеми лінійної частини і показано вплив шляхових відборів газу на гідравлічну ефективність;
- на основі аналітичних досліджень процесу перенесення крапельної вологи потоком газу запропоновано методику визначення характеру розподілу високов'язких рідинних відкладень в порожнині газопроводу з адаптацією моделі до реальних умов, а також визначення об'єму відкладень і їх вплив на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності;
- отримано аналітичні залежності для визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів з урахування дисипативних втрат енергії і на їх основі запропоновано корективи до методики визначення гідравлічної ефективності.

Практичне значення отриманих результатів. Встановлені закономірності розподілу високов'язких рідинних відкладень в газопроводі дозволяють встановити взаємозв'язок між об'ємом рідинних відкладень і коефіцієнтом гідравлічної ефективності, що дозволить раціонально планувати процес очистки газопроводу.

На основі досліджень дисипативних втрат енергії при русі газу в трубопроводі внесено корективи і доповнення в методику визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів і ділянок складних газотранспортних систем.

Запропоновані методи і розроблені алгоритми і програми розрахунку використовуються на практиці в УМГ «Прикарпаттрансгаз».

Особистий внесок здобувача. Проведений аналіз енерговитрат на транспортування газу складними газотранспортними системами великої пропускної здатності показав, що неврахування дисипативних втрат енергії призводить до суттєвої похибки у визначенні коефіцієнта гідравлічної ефективності [1,5,6,9].

Встановлено, що для складних ГТС при роботі на непроектних режимах важливе значення на енерговитратність перекачування має розподіл газових потоків між нитками складної газотранспортної системи і наявність шляхових відборів газу [2,3].

Показано, що перенесення крапельної вологи газовим потоком призводить до формування розподілу високов'язких рідинних відкладень на початкових ділянках траси, запропоновано адаптивну модель для їх характеристики і визначення об'єму, встановлено взаємозв'язок з коефіцієнтом гідравлічної ефективності [4,6].

Удосконалено принцип і методику визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів з урахуванням всіх видів енерговитрат на транспортування газу [5,7].

Автор брав безпосередню участь в розробці і впровадженні у виробництво запропонованої методики [2,8].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідались на:

- Сьомій Міжнародній науковій-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 25-28 листопада 2014р.;

- Міжнародному семінарі «Рассохинские чтения», м. Ухта, Республіка Комі, РФ, 6-7 лютого 2014р.;

- XIII Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Майбутнє технічної науки», 23 травня 2014р., м. Н. Новгород, РФ, де доклад дисертанта на тему «Методика визначення гідравлічної ефективності» був відзначений Дипломом I Степені Нижегородським Державним Технічним Університетом ім. Р.Е. Алексеева.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 друкованих праць та 1 в електронному виданні, із них 5 у фахових виданнях, три з яких одноосібні, одна – у виданні, що входить до наукометричних баз.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 4-х розділів, висновків та додатків, які викладені на 107 стор. машинописного тексту і містять 4 табл., 16 рис. Список використаних літературних джерел містить 127 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику роботи, показано актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, планами, вказано мету і задачі досліджень, їх наукову новизну, особистий внесок здобувача і структуру дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу літературних джерел та конкретизації завдань досліджень.

Газотранспортна система України (ГТС) складається з 37,6 тис. км газопроводів різного призначення та продуктивності, 73 компресорних станцій із 110 компресорними цехами, де встановлено 703 газоперекачувальні агрегати загальною потужністю 5,4 тис. МВт, 1607 газорозподільних станцій, 13 підземних сховищ газу загальною місткістю за активним газом понад 32,0 млрд. м³ та об'єкти інфраструктури.

На «вході» ГТС спроможна прийняти до 290 млрд. м³, а на «виході» передати 175 млрд. м³ природного газу, в т.ч. 140 млрд. м³ - до країн Західної та Центральної Європи. На сьогодні близько 29% газопроводів відпрацювали свій амортизаційний термін, майже 60% експлуатуються від 10 до 33 років.

Структура споживання природного газу в Україні наступна: населення та комбубут - 37,5%, електроенергетика - 17,4%, технологічні проблеми газового комплексу - 10,4%, металургія - 12,8%, хімія - 11,3%, інші промислові споживачі - 10,6%.

Магістральний газопровід з погляду газодинамічних процесів, що в ньому відбуваються, є складною системою. Велика протяжність лінійних ділянок призводить до того, що визначення кількості і розподіл по довжині рідини може розглядатися тільки як стохастичний процес. Тому складний процес руху рідкої і газової фази у детермінованій формі, практично не реалізований. В зв'язку з цим, визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу навіть на підставі детермінованих математичних моделей слід розглядати як стохастичний процес, оскільки розрахунки спираються на статистичний початковий матеріал.

Початок дослідженням ефективності роботи газопроводів покладено Ходановичем Е.І., в роботах якого приводиться методика дослідження ефективності. Великий теоретичний матеріал в плані дослідження ефективності представляють роботи Мамаєва В.О., Гужова А.Н., Клапчука О.І., присвячені вивченню руху двофазних потоків в трубах. У експериментальних дослідженнях Гусейнова Ч. А. показано вплив скупчень рідини на гідравлічний опір газопроводу. Дослідження динаміки зміни ефективності в часі, а також розробка методів і засобів її підвищення, приведені в роботах Капцова І.І., Грудза В. Я., Яковлева Є.І., Клімовського Е.М., Шварца М.Е.

Перераховані дослідження підводять теоретичну основу під проблему ефективності роботи газопроводів і методів видалення рідини з внутрішньої порожнини труб. Результати теоретичних досліджень знайшли експериментальне підтвердження в умовах лабораторних і напівпромислових стендів. Проте, в практиці експлуатації реальних газопроводів, не дивлячись на задовільну подібність якісних показників і деяких кількісних співвідношень, є істотні розбіжності з експериментальними. Такі розбіжності

можуть бути пояснені тільки неврахуванням ряду чинників в реальних умовах, які або не піддаються точному визначенню, або не враховуються внаслідок спрощення моделі.

Процес старіння газопроводів неперервний і поступовий, в зв'язку з чим гідравлічна ефективність повинна знижуватися в часі. Це стосується як однопіткових газопроводів, так і складних газотранспортних систем. Причому на початковому етапі експлуатації спостерігається інтенсивне забруднення порожнини газопроводу, в зв'язку з чим гідравлічна ефективність різко падає. В подальшому настає динамічна рівновага між парами вологи і рідкою фазою в порожнині газопроводу, в зв'язку з чим темп падіння гідравлічної ефективності сповільнюється. Тому априорі закон зміни гідравлічної ефективності в часі близький до експоненціального. Однак, на практиці замічено, що гідравлічна ефективність простих газопроводів майже строго підпорядкована цьому закону, а для систем газопроводів спостерігається періодичне зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності в літній період і різке його падіння в зимовий (при загальній тенденції до зменшення в часі експлуатації.)

Відмінність тренда коефіцієнта гідравлічної ефективності для газотранспортних систем пояснюється тим, що у зимовий період завантаження систем зростає, що приводить до перерозподілу рідини між паралельними нитками і до зниження гідравлічної ефективності. Подальше зниження продуктивності в весняний період приводить систему в рівноважний стан. Необхідно відзначити, що, якщо система складається з двох паралельних ниток однакового діаметру, то рідина завжди витісняється в нитку, ефективність якої нижча. Цей висновок, однак, не знайшов підтвердження в період експлуатації систем з повним завантаженням.

На наш погляд періодичне підвищення коефіцієнта гідравлічної ефективності в літній період експлуатації при загальній тенденції його зниження пояснюється неврахуванням в методиці прогнозування і розрахунку втрат внутрішньої енергії газу. В літній період ці втрати зменшуються і темп падіння ефективності уповільнюється. Для простих газопроводів загальна площа теплообміну з довкіллям менше, ніж для газотранспортних систем, тому цей ефект особливо виразний для останніх.

Як показано в літературних джерелах, основним фактором, який сприяє зниженню гідравлічної ефективності, є наявність рідкої фази в порожнині газопроводу. За властивостями скупчення в порожнині газопроводів можуть бути розділені на дві групи: рідкі малов'язкі скупчення, що представлені в основному газовим конденсатом і водою, і високов'язкі застигаючі смолисті скупчення. Максимальна товщина відкладень як функція відстані і часу носить експоненційний характер, причому із збільшенням часу експлуатації газопроводу товщина відкладень зростає, а із збільшенням відстані від КС зменшується.

На основі аналізу літературних джерел з питань гідравлічної ефективності газопроводів і газотранспортних систем встановлено, що, не дивлячись на високий інтерес до проблеми, викликаний питаннями економії енергоресурсів на транспортування газу, ряд питань в літературі висвітлено

не достатньо, що дозволило сформулювати і конкретизувати мету і задачі досліджень.

В другому розділі наведено результати дослідження впливу енерговтрат в потоці газу на гідравлічну ефективність газопроводів і складних систем.

Як відомо, характер руху газу в трубах описується системою диференціальних рівнянь в часткових похідних, до якої входять рівняння руху, нерозривності, енергії. Рівняння енергії потоку газу відображає закон збереження енергії стосовно руху реального газу в трубопроводі. При цьому відношення члена рівняння, який характеризує теплообмін з довкіллям, до члена, що характеризує процес перетворення механічної енергії в теплову, можна розглядати як основну характеристику термогазодинамічного процесу, тому таке відношення може вважатися критерієм подібності процесів дисипації енергії. Методом приведення диференціальних операторів отримано безрозмірне співвідношення

$$\Lambda = \frac{k(T_{ep} - T)W}{p_{cp}c_p T_{cp}}, \quad (1)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі від газу в довкілля; T_{ep}, T - температури ґрунту і газу; W - лінійна швидкість газу; $p_{cp}T_{cp}$ - середні тиск і температура; c_p - ізобарна теплоємність газу.

За результатами натурних вимірювань основних параметрів роботи газопроводу за період 2008-2010 рр. визначені коефіцієнти гідравлічної ефективності газопроводів «Братерство» на ділянці Долина-Россош, «Союз» на ділянці Богородчани-Хуст і Уренгой-Помари-Ужгород на ділянці Богородчани-Голятин. Для тих же моментів часу обчислені значення наведеного вище безрозмірного комплексу Λ . Результати розрахунків приведені у вигляді графіків на рисунку 1.

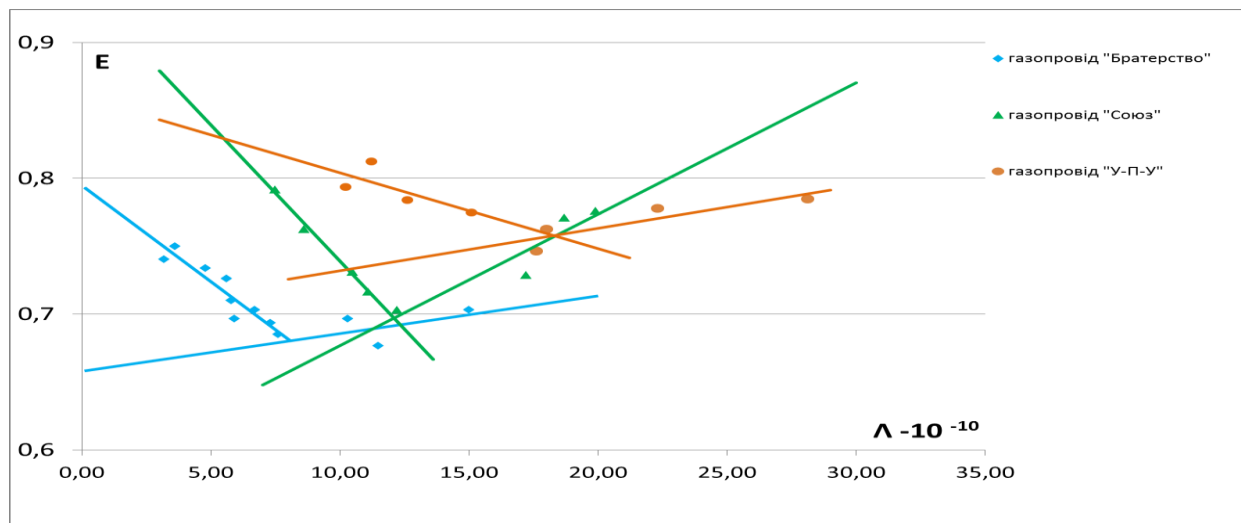


Рисунок 1- Залежність гідравлічної ефективності від критерію Λ

Як і слід було очікувати, із збільшенням параметру Λ величина коефіцієнта ефективності знижується. Це відповідає фізичним уявленням про розсіювання енергії. Проте, починаючи з визначеної величини комплексу Λ , з його збільшенням коефіцієнт гідравлічної ефективності зростає. Цей факт має своє фізичне обґрунтування у тому, що збільшення параметра відбувається за рахунок зростання лінійної швидкості газового потоку або за рахунок зниження середньої температури газу, або через зміну обох параметрів в комплексі. Збільшення лінійної швидкості газового потоку призводить до збільшення гідравлічних втрат в місцевих опорах, утворених пробками скупчень рідини, а отже, до зниження гідравлічної ефективності. Але, як показують досліди, при лінійних швидкостях, які перевищують 6-8 м/с, відбувається «вितिрання» внутрішньої поверхні стінки труби струменем газового потоку від наведеної шорсткості. Тому із збільшенням швидкості понад 8 м/с коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу зростає.

Зниження коефіцієнта ефективності при зростанні параметра Λ , слід розглядати таким чином: із зростанням теплопередачі в навколишнє середовище (із збільшенням ступеня дисипації енергії) гідравлічна ефективність знижується. Очевидно, тепловтрати для різних газопроводів по різному впливають на гідравлічну ефективність, але тенденція зниження ефективності при збільшенні теплових втрат є загальною.

Коефіцієнт гідравлічної ефективності складної газотранспортної системи, що складається з кінцевого числа паралельних ниток із лупінгами і вставками, прийнято визначати відношенням пропускної здатності системи на даний момент експлуатації до її проектної (розрахункової) величини. У цьому плані розрахунки не викликають ніяких ускладнень. Проте в практиці експлуатації газотранспортних систем з метою оптимізації їх обслуговування потрібно визначити коефіцієнти гідравлічної ефективності не всієї системи в цілому, а кожної із паралельних ниток, що входять у систему, або ділянок цих ниток. У цьому плані виникають ускладнення, оскільки витрата газу вимірюється на практиці сумарною по всіх нитках системи, а для визначення коефіцієнтів ефективності кожній із ниток необхідно знати його розподіл між паралельними нитками. Відомо, що в паралельних системах газопроводів витрата між нитками розподіляється обернено пропорційно їх фактичному гідравлічному опору. Отже, для оцінки розподілу витрати між нитками необхідно знати фактичні значення коефіцієнтів гідравлічного опору кожної нитки, що є кінцевою метою визначення ефективності. Таким чином, задача визначення коефіцієнтів гідравлічної ефективності паралельних систем газопроводів є фактично нерозв'язною.

Аналізуючи рівняння стаціонарної течії газу в газопроводі шляхом нескладних перетворень можна одержати залежності, що зв'язують коефіцієнт гідравлічної ефективності системи в цілому з коефіцієнтами гідравлічної ефективності окремих її ділянок. При паралельному і послідовному з'єднанні лінійних ділянок така залежність може бути подана у вигляді

$$E_r = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{L_i}{d_i} \right)^{5.2}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{d_i} \right)^{5.2}}, \quad E_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{d_i^{5.2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{d_i^{5.2}} E_i^2}, \quad (2)$$

де $i = 1 \dots n$ - число паралельних ділянок різного діаметра d_i і довжини L_i ;

Формули (2) є рекурентними і дозволяють визначити коефіцієнт гідравлічної ефективності довільної складної газотранспортної системи в умовах квазістаціонарного режиму, якщо відомі коефіцієнти гідравлічної ефективності кожної з її ділянок. Проте, практично важливою є обернена задача: визначити коефіцієнти гідравлічної ефективності кожної з ділянок, якщо відомий коефіцієнт гідравлічної ефективності системи. Ця задача є невизначеною, оскільки з одного рівняння, що представляє собою комбінацію (2) потрібно визначити скільки невідомих, скільки ділянок має система. Для усунення цієї невизначеності передбачається виконувати технологічні зміни системи транспорту газу шляхом відключення окремих ділянок і в цей період виконувати виміри, необхідні для розрахунків коефіцієнта гідравлічної ефективності системи. Якщо система складається з n лінійних ділянок, то необхідно виконати $n-1$ технологічних переключень. В результаті отримаємо n рівнянь для визначення невідомих значень коефіцієнта гідравлічної ефективності кожної ділянки складної газотранспортної системи.

Очевидно, що коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу з витоком газу E_q до певної міри відрізнятиметься від коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу без витоку газу E , оскільки дані величини отримані на основі різних математичних моделей. Сумісний розв'язок системи рівнянь дає залежність для співвідношення вказаних коефіцієнтів у вигляді

$$\delta = \frac{E_q}{E} = \left(1 - \frac{q}{Q}\right) \sqrt{1 - \frac{l_q}{L}} \quad (3)$$

Таким чином, метою дослідження є встановлення величини δ та її залежності від величини витоку і його координати. На рис. 2 приведено графічні залежності вказаного відношення від величини витоку газу і його розміщення на газопроводі.

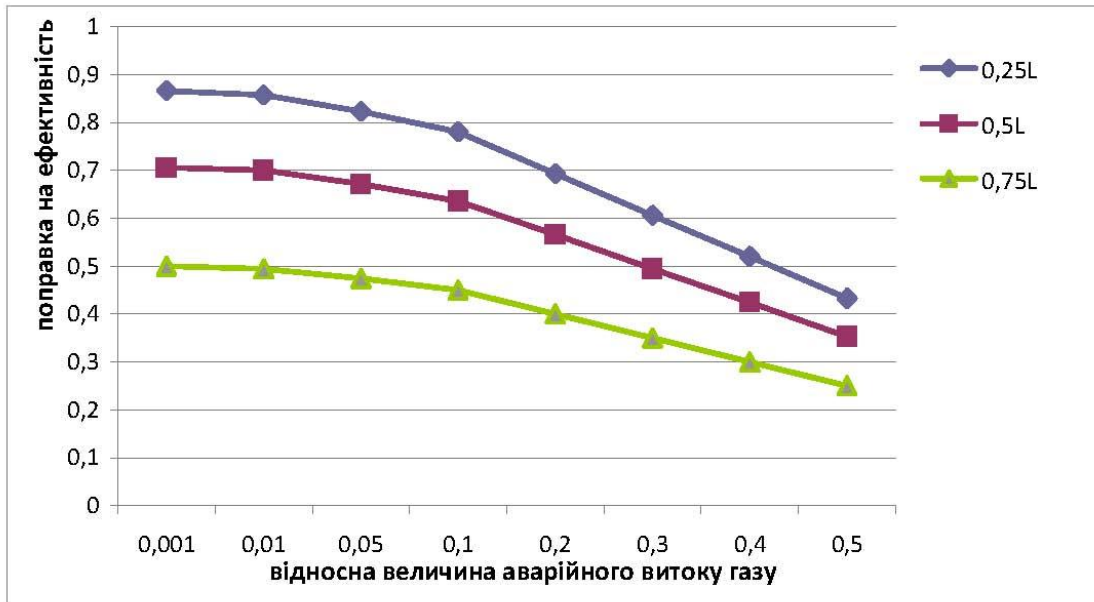


Рисунок 2- Вплив шляхових відборів на коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу

Аналіз графіків показує, що при величині витоку газу, що складає 0,1% від витрати в газопроводі коефіцієнт гідравлічної ефективності знижується на 13,4%. З збільшенням величини витоку газу і його відстані від початку газопроводу вказане відхилення збільшується.

Третій розділ присвячено дослідженням розподілу рідинних відкладень в газопроводах.

Задача про дисперсію крапельної вологи по довжині ділянки газопроводу тісно пов'язана з дослідженнями характеру і кількості відкладень у порожнині газопроводу і їхні властивості.

Рух потоку газу і крапель рідини в горизонтальній трубі розглядається як взаємнопроникаючий рух двох середовищ. Рівняння руху і зберігання маси виписуються окремо для кожного середовища, при цьому враховується їхній динамічний вплив один на одного шляхом введення сил взаємодії. Передбачається, що усереднений рух потоку відбувається паралельно осі труби. В такому разі рівняння матиме вигляд:

$$\begin{aligned} -F_1 \frac{\partial P}{\partial x} - T_1 + W &= 0 \\ -F_2 \frac{\partial P}{\partial x} - T_2 + W &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

де F_1 і F_2 – відповідно частини площ поперечного перетину труби, зайняті газом і краплями рідини; P – тиск, що рахується постійним по перетині; 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.

Усереднена величина швидкості газу по перетині потоку знаходиться 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 газом вмістом у потоці двофазних середовищ позначимо відношення площі, зайнятої краплями рідини до загальної площі перетину через ϕ . З врахуванням цього і виразу для діаметра краплі одержимо для швидкості газового потоку в середині області впливу

$$\phi U = \frac{M}{\rho_1 F} \left[1 + \beta \cdot \phi^{1/2} \left(-\phi^{3/2} \right) \right] \quad (6)$$

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

Перехід до нових змінних ξ і τ дозволив отримати для розподілу крапель вологи $N = N(\tau, \xi)$. Диференціальне рівняння, розв'язок якого в області автомодельності в залежності від параметру $z = \frac{\xi}{\tau}$ шукається графоаналітичним способом, в результаті отримано розподіл відкладень по довжині газопроводу і в часі в залежності від параметра β (рисунок 3).

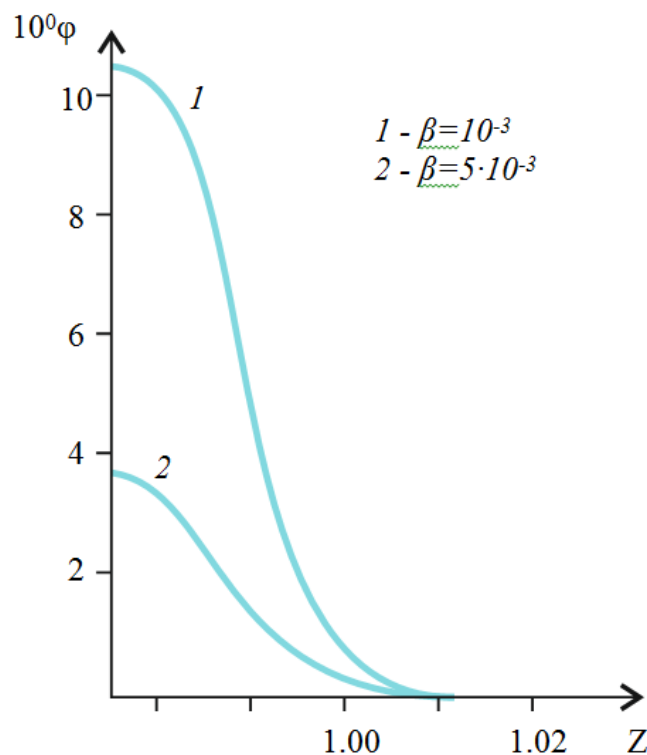


Рисунок 3- Характер розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу в безрозмірній формі

Параметр z в 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 в порожнині газопроводу.

Порівняння тенденцій залежності обсягу рідинних відкладень в газопроводі, отриманих на основі аналітичних залежностей та фактичних даних свідчать про співпадання їх характеру, в зв'язку з чим проведені аналітичні дослідження дозволили створити теоретичні засади процесу відкладання рідинних скупчень в порожнині газопроводу.

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

Товщина відкладень, як функція відстані і часу носить експоненційний характер, причому із збільшенням часу експлуатації газопроводу товщина відкладень зростає, а із збільшенням віддалі від КС зменшується.

Очевидно, що аналітичні і графічні залежності повинні бути ідентичними, оскільки описують один і той ж характер розподілу відкладень по довжині газопроводу і в часі. Характер формування аналітичних залежностей визначається параметром β , а емпіричної залежності – коефіцієнтами моделі, тому між ними повинен існувати взаємозв'язок, для встановлення якого пропонується наступний алгоритм адаптації.

Вважається відомим характер розподілу рідинних скупчень по довжині газопроводу для певного моменту часу t_1 . У відповідності до заданого розподілу товщини відкладень по довжині кожному значенню лінійної координати x_1, x_2, \dots, x_i ставиться у відповідність набір товщин відкладень h_1, h_2, \dots, h_i .

Задаємося довільним значенням величини параметру β_0 і розв'язуємо аналітично поставлену задачу, в результаті отримаємо аналітичний розподіл товщини відкладень по довжині ділянки газопроводу, результатом якого є відповідність значенням координат x_1, x_2, \dots, x_i певних розрахункових товщин відкладень y_1, y_2, \dots, y_i , які в ідеальному випадку повинні бути рівними дослідним значенням товщин відкладень h_1, h_2, \dots, h_i . Однак, внаслідок довільного вибору величини параметра β_0 відхилення між теоретичними і фактичними значеннями мінімізується за методом найменших квадратів.

Для адаптації теоретичних результатів пропонується використати метод конкуруючих варіантів з величини параметру β .

В результаті найбільш точного співпадання теоретичних значень з фактичними отримуємо значення параметра β_a , яке відповідає адаптації теоретичного закону розподілу відкладень до фактичних умов. Вся процедура адаптації може бути проведена для різних моментів часу експлуатації газопроводу, в результаті чого отримуємо залежність параметра β_a від часу.

Адаптивна модель розподілу відкладень по довжині газопроводу і в часі дозволяє отримати реальний закон розподілу, який базується на фізичних уявленнях про процес переносу крапельної рідини потоком газу. Тому розрахований за приведеним алгоритмом адаптивний параметр β_a дає можливість визначити фактичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, а, значить, коефіцієнта гідравлічної ефективності.

Отримані залежності в комплексі з моделлю розподілу товщини відкладень у вигляді розв'язку рівняння та емпіричної моделі дозволяють обчислити об'єм високов'язких відкладень в порожнині газопроводу

$$V = 2 \int_0^L \left(\int_0^{p/4} y(s) ds \right) h(x, t) dx,$$

де L – довжина ділянки газопроводу з високов'язкими рідинними відкладеннями; p – довжина кола внутрішньої поверхні газопроводу.

Розрахунки за приведеною методикою з використанням фактичних даних дозволили визначити об'єми високов'язких відкладень в порожнині газопроводів «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород» та «Братерство» на початкових ділянках траси після компресорних станцій «Богородчани» і «Долина», результати яких приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку об'єму відкладень в газопроводах

Об'єм відкладень, м ³				
Газопровід	За фактом	За теорією	Розбіжність, %	Гідравлічна ефективність
Союз	18,01404	17,958763	0,308	0,878
УПУ	14,56525	14,132431	3,015	0,899
Братерство	29,31981	28,887651	1,485	0,857

Результати розрахунків показують хорошу збіжність, а значення коефіцієнта гідравлічної ефективності, розраховані для початкових ділянок траси газопроводів на основі теоретичних досліджень, свідчать про їх задовільну кореляцію, що підтверджує достовірність результатів.

Четвертий розділ присвячено дослідженням впливу втрат енергії при транспорті газу на гідравлічну ефективність і розробці корективів до методики розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності.

Згідно з законами класичної газової динаміки, температура і тиск є мірами енергії газового потоку. При цьому температура є критерієм внутрішньої енергії газового потоку, а тиск і швидкісний напір - критерієм механічної. Згідно з законами збереження і перетворення енергії, дисипація будь-якого його виду призводить до втрати загальної енергоємності замкнутої системи.

Коефіцієнт ефективності роботи газопроводів вказує на зниження енергоємності замкнутої системи (газового потоку) в результаті перетворення механічної енергії газового потоку в теплову, і подальших тепловтрат в навколишнє середовище.

Таким чином, величина теплопередачі від газового потоку в навколишнє середовище для магістрального газопроводу повинна бути тісно пов'язана з коефіцієнтом ефективності роботи газопроводу. Неврахування характеру і ступеня зміни внутрішньої енергії газу приводить до занижених значень коефіцієнта гідравлічної ефективності і збільшує його дисперсію навколо середнього значення. Отже, характеру та ступеня зміни внутрішньої енергії газу призводить до занижених значень коефіцієнта гідравлічної ефективності та збільшує його дисперсію навколо середнього значення.

Енергетичний баланс газового потоку в газопроводі описується рівнянням енергії, або узагальненим рівнянням Бернуллі, яке для випадку стаціонарної неізотермічної течії газу має вигляд

$$\frac{zRT}{k-1} \frac{dP}{\rho} - \frac{M^2 (zRT)^2}{F^2} \frac{dP}{P^3} + \left(gi - \frac{k_m \pi D}{M} (T - T_{cp}) \right) dx + \frac{\lambda M^2 (zRT)^2}{2F^2 P^2 d} dx = 0, \quad (7)$$

де $i = h/L$ - геометричний нахил ділянки газопроводу внутрішнім діаметром d ; λ - коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу; F - площа поперечного перерізу трубопроводу.

Реалізація представленого диференційного рівняння дозволяє отримати розв'язок у вигляді

$$\frac{\left(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T \right) P_K^2 + \frac{\lambda}{d} \left(\frac{M z R T}{F} \right)^2}{\left(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T \right) P_H^2 + \frac{\lambda}{d} \left(\frac{M z R T}{F} \right)^2} = \exp \left(- \frac{2(k-1)}{zRT} \left(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T \right) \frac{L + \frac{d}{\lambda} \ln \frac{P_x^2}{P_H^2}}{1 + \frac{2(k-1)}{zRT} \left(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T \right) \frac{d}{\lambda}} \right) \quad (8)$$

$$\text{де} \quad \Delta T = T_{cp} - T_{sp}$$

Трансцендентне рівняння (9) пов'язує масову витрату газу по газопроводу з параметрами гідравлічного і температурного режиму, враховуючи всі види втрат енергії на транспортування газу. Запропонований ітераційний спосіб знаходження його розв'язку дозволяє визначити теоретичне значення пропускної здатності газопроводу. Розраховані таким чином значення пропускної здатності складають 81,912 млн. м³/добу для

умов розрахунку без врахування профілю траси і 80.289 млн. м³/добу з врахуванням його впливу. Розрахована за класичною методикою пропускна здатність складає 85,3147 млн. м³/добу. Розбіжність між результатами складає 3,99% в першому випадку і 5,89% в другому.

Результати проведених досліджень покладено в основу методики розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів з врахуванням зміни внутрішньої енергії газового потоку, суть якої полягає в наступному:

1. На діючому магістральному газопроводі в умовах квазістаціонарного руху газу проводять ізохронні вимірювання:
 - тисків газу на початку P_H і в кінці P_K ділянки;
 - температур газу на початку T_H і в кінці T_K ділянки;
 - витрати газу Q ;
 - температура ґрунту в непорушеному тепловому стані, фізичні властивості газу та геометричні характеристики газопроводу вважаються відомими.
2. З метою оцінки міри нестационарності газового потоку визначають критерій нестационарності

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\lambda w \tau},$$

де $\delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{сеп}}}$ – відносна зміна продуктивності на проміжку часу τ ;

$w = \frac{4Q_{\text{сеп}}}{\pi d^2} \cdot \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{ср}}} \cdot \frac{T_{\text{сеп}}}{T_{\text{ст}}}$ – середня по довжині й усереднена в часі швидкість

газу.

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістаціонарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає $N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$. В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним, і похибка в обчисленні коефіцієнта ефективності перевищить 5%, тому результати даної серії вимірювань слід відкинути і перейти до наступної серії.

3. Визначається число Рейнольдса і коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу.
4. Визначається середня температура і середній тиск на ділянці газопроводу та коефіцієнт стисливості газу.
5. З (9) методом ітерацій визначають масову витрату газу і переводять її в пропускну здатність газопроводу при стандартних умовах, вважаючи її значення теоретичним.
6. Визначають коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу

$$E = Q_{\phi} / Q_T$$

За запропонованою методикою проведено розрахунки коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів Братерство і Союз за 12 місяців 2014 року. Результати приведено на рисунку 4.

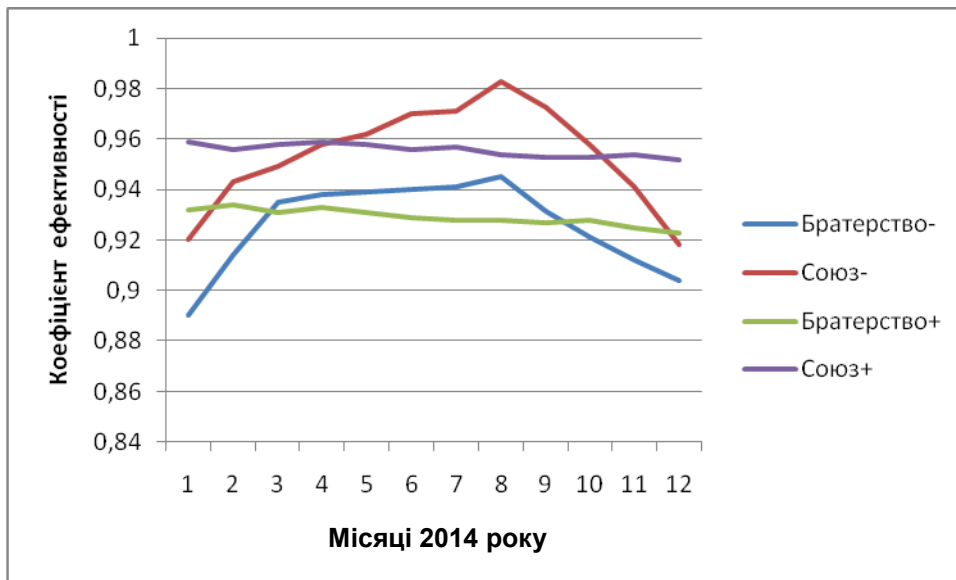


Рисунок 4- Результати розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів Братерство і Союз без врахування зміни внутрішньої енергії (-) та з її врахуванням (+)

На тому ж рисунку приведено результати розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності для вказаних газопроводів за класичною методикою, яка не враховує зміну внутрішньої енергії газу. Як видно з графіків, врахування зміни внутрішньої енергії газового потоку призводить до принципово відмінної тенденції зміни гідравлічної ефективності в часі, що відповідає апріорним уявленням про коефіцієнт ефективності як діагностичну ознаку.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у конкретизації законів руху газу в трубопроводі з врахуванням зміни всіх видів енергії потоку, що дозволило вдосконалити методику прогнозування гідравлічної ефективності газотранспортної системи, а саме;

1. Показано, що дисипативні втрати енергії при транспортуванні газу можна оцінити відносною величиною теплопередачі від газу до навколишнього середовища, і вони можуть мати суттєвий вплив на енергетику газового потоку; їх неврахування в математичних моделях призведе до похибки у визначенні коефіцієнта гідравлічної ефективності на величину до 5%.
2. Запропоновано метод і розроблено алгоритм розрахунку гідравлічної ефективності складних газотранспортних систем та їх окремих ділянок в умовах квазістаціонарної течії газу. Побудовано математичну модель та проведено дослідження впливу шляхових відборів та аварійних витоків газу з газопроводів на коефіцієнт гідравлічної ефективності, показано, що в залежності від величини шляхового відбору чи

аварійного витoku коефіцієнт гідравлічної ефективності може змінитися на величину до 13-15%.

3. Поставлена і розв'язана задача процесу перенесення крапельної вологи потоком газу вздовж осі трубопроводу дозволила отримати аналітичну залежність розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу для початкових ділянок траси, які прилягають до компресорної станції. На основі отриманого аналітичного розв'язку і статистичних та експериментальних даних про розподіл високов'язких рідинних відкладень по довжині газопроводу і в часі створено адаптивну модель, яка дозволяє встановити залежність між характером розподілу відкладень і коефіцієнтом гідравлічної ефективності. Показано на основі фактичних даних по експлуатації газопроводів «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород» та «Братерство» принцип прогнозування розподілу високов'язких відкладень в газопроводах, визначення їх об'єму і кореляцію з коефіцієнтом гідравлічної ефективності.
4. Розв'язана задача теплогідравлічного розрахунку газопроводу дозволила отримати розрахункову формулу і запропонувати методику визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності з урахуванням всіх видів енерговитрат на транспорт газу. Проведений аналіз температурного режиму і теплофізичних властивостей газу дозволить провести підготовку інформації для обчислення коефіцієнта гідравлічної ефективності. Запропонована методика прийнята до впровадження розрахунків коефіцієнта гідравлічної ефективності газопровідних систем УМГ «Прикарпаттрансгаз».

Основний зміст дисертації викладено в наступних наукових публікаціях:

1. Якимів М.М. Адаптивна модель розподілу рідинних скупчень в газопроводі// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2014. – № 10 (217) . – С. 153-157
2. Якимів М.М. Аналітичні дослідження характеру розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу / М.М. Якимів // Нафтогазова галузь України. – 2015. – № 2. – С. 25-28.
3. Грудз В.Я. Енергетичний підхід до питання про гідравлічну ефективність газопроводів / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, М.М. Якимів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С.56-62
4. Грудз В.Я. Гідравлічна ефективність складних газотранспортних систем. /В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, М.М. Якимів // Нафтогазова галузь України. – 2014. – №1. – С. 16-20.
5. Грудз В.Я. Методика прогнозування гідравлічної ефективності газопроводів. / В.Я. Грудз, М.М. Якимів //Прикарпатський вісник НТШ.Число.- 2015.- №3(23) – С. 123-126.
6. Якимів М.М. Оцінка ефективності газопроводів з шляховими відборами та витокami газу / М.М. Якимів// Ефективна економіка. № 5, 2015. [Електронне видання].

7. Якимив Н.М. Оценка гидравлической эффективности газопроводов с путевыми отборами газа на математических моделях/ Н.М. Якимив// «Рассохинские чтения», Материалы международного семинара (6-7 февраля 2014г.) ЧАСТЬ 2.-С. 212-216.
8. Якимів М.М. Методика визначення гідравлічної ефективності/ М.М. Якимів // Сьома Міжнародна науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Збірник матеріалів доповідей, м. Івано-Франківськ, 25-28 листопада 2014р.-С. 179-183.
9. Якимив Н.М. Гидравлическая эффективность сложных газотранспортных систем/ Н.М.Якимив//XIII Международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки», Сборник материалов, 23 мая 2014 г., г. Нижний Новгород, РФ. – С. 236-237.

АНОТАЦІЯ

Якимів М.М. – Вдосконалення методів прогнозування гідравлічної ефективності газотранспортних систем - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2015.

Дисертацію присвячено удосконаленню методики прогнозування коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів і складних газотранспортних систем з урахуванням енерговитрат на транспортування газу. Показано, що зміна внутрішньої енергії газового потоку повинна враховуватися в прогнозних розрахунках на рівні механічної енергії; нехтування дисипативними втратами енергії призведе до спотворення фізичної картини старіння газопроводу. Запропоновано методи визначення коефіцієнтів гідравлічної ефективності ділянок складних газотранспортних систем, дано оцінку впливу шляхових відборів та аварійних витоків з газопроводу на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності. Одержано розрахункові залежності і внесено корективи до методики визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності.

Ключові слова: газотранспортна система, гідравлічна ефективність, енерговитрати, внутрішня енергія, дисипація.

АННОТАЦИЯ

Якимив Н.М. - Совершенствование методов прогнозирования гидравлической эффективности газотранспортных систем - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. - Ивано-Франковск, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию методики прогнозирования коэффициента гидравлической эффективности газопроводов и сложных газотранспортных систем с учетом энергозатрат на транспортировку газа.

Показано, что изменение внутренней энергии газового потока должно учитываться в прогнозных расчетах на уровне механической энергии; пренебрежение диссипативными потерями энергии приведет к искажению физической картины старения газопровода. Предложены методы определения коэффициентов гидравлической эффективности участков сложных газотранспортных систем, дана оценка влияния дорожных отборов и аварийных утечек из газопровода на величину коэффициента гидравлической эффективности. Получены расчетные зависимости и внесены коррективы в методику определения коэффициента гидравлической эффективности.

Ключевые слова: газотранспортная система, гидравлическая эффективность, энергозатраты, внутренняя энергия, диссипация.

ANNOTATION

Mr. Mykola IAKYMIV - The methods of the gas transport systems hydraulic efficiency forecast improving - Manuscript.

The dissertation thesis for the degree of the technical sciences candidate (PhD), specialty 05.15.13 - Pipeline transport, oil and gas storages.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2015.

The thesis is devoted to improving the methods of the hydraulic efficiency coefficient forecasting of the pipelines and complex gas transmission systems taking into consideration energy consumption while transporting.

It is shown that dissipative energy losses in gas transmission might be estimated by the relative magnitude of the heat transfer from the gas to the environment, and they can have a significant impact on energy gas stream; the neglect of them in the mathematical models lead to error in determining the coefficient of by up to 5%.

Suggested the method and developed the complex hydraulic efficiency gas transmission calculation algorithm and their individual sections in terms of quasi-stationary gas flow.

Shown the mathematical model and conducted the study of the impact of the track extraction and emergency gas leaks from the pipelines onto the hydraulic efficiency coefficient, demonstrated that depending on the size of the track extraction or emergency leakage the hydraulic efficiency coefficient rate can vary by up to 13-15%.

Set and resolved the problem of the moisture drops transfer process gas flow along the axis of the pipeline allowed to obtain an analytical dependence of the liquid deposits distribution along the length of the pipeline route for primary sections adjacent to the compressor station.

Based on the analytical interchange, statistical and experimental data regarding the distribution of the high liquid deposits along the length of the pipeline and in time it was created an adaptive model that allows us to establish the relationship between the nature of the sediments distribution and hydraulic efficiency coefficient.

Shown based on the real data on gas pipelines "Soyuz", "Urengoy-Uzhgorod-Pomary" and "Braterstvo" the principle of the high sediment distribution prediction

along the pipelines, determining their volume and correlation with the coefficient of hydraulic efficiency.

Conducted the analysis of energy losses in the gas flow showed that the neglect of the energy dissipation can make significant discrepancies in the results of the hydraulic efficiency coefficient determination and distort its time trend that non adequately reflects the technical condition of the pipeline. Solved the problem of the thermal hydraulic calculation pipeline allowed to get the calculated formula and propose a method of determining the coefficient of hydraulic efficiency with taking into account all kinds of energy while gas transmission.

Conducted analysis of the temperature and the thermal gas properties allow to prepare information for the hydraulic efficiency coefficient calculation.

Keywords: gas transmission system, hydraulic efficiency, energy consumption, internal energy, dissipation.

Підписано до друку 10.09.2015 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,9.
Тираж 100 екз. Замовлення № 28.

Віддруковано в друкарні КП фірми “ЛІК”.
м. Івано-Франківськ, вул. Василянок, 48. Тел. (03422) 4-80-27.

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ІФ № 16 від 06.09.2001 р.