

622.691.4(477)

M29

Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

**МАРТИНЮК ОКСАНА ТАРАСІВНА**

УДК 691.4 (477)

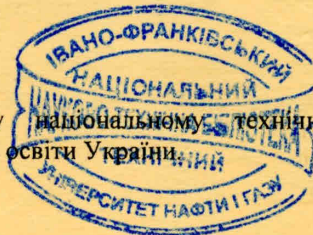
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНСПОРТУ  
СІРКОВОДНЕВИХ ГАЗІВ МАЛИХ РОДОВИЩ УКРАЇНИ

Спеціальність 05.15.13 – Нафтогазопроводи, бази та сховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу  
Дата 19 02 03  
Реєстр. № \_\_\_\_\_



Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор Грудз Володимир Ярославович, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м. Івано-Франківськ.

**Офіційні опоненти:**

Середюк Марія Дмитрівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Бакаєв Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, голова представництва фірми "РОЗЕН Юроп Б.В." в Україні (м. Київ).

**Провідна організація:** ІВТ ВНІПТТрансгаз (м. Київ).

Захист відбудеться 18 березня 2003р. о 10.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, м. Івано-Франківськ, вул Карпатська

З дисе  
Івано-Франків  
адресою: 76019

іотеці  
азу за

Автореферат р

Вчений секрет  
вченої ради Д 2  
кандидат техні

О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Енергетична криза в Україні вимагає використання резервів енергоносіїв, в тому числі розробки малих газових родовищ. В переважній більшості газ малих газових родовищ містить домішки сірководню, який в трубопроводі створює надзвичайно агресивне корозійне середовище, що зумовлює інтенсивну внутрішню корозію трубопроводів і обладнання.

Сірководнева корозія трубопроводів небезпечна тим, що окрім високої інтенсивності корозійного руйнування металу ступінь її впливу можна виявити тільки на основі методів внутрішньотрубного діагностування, які є надзвичайно дорогими у порівнянні з іншими і тому використовуються періодично через значні проміжки часу експлуатації трубопроводу. Окрім цього, поява свищів може призвести до втрати міцності трубопроводу і аварій на газопроводі, які супроводжуються тяжкими наслідками. Глибоке вивчення механізму сірководневої корозії металів і забезпечення їх захисту почалось відносно недавно (приблизно з 70-х років минулого століття). Проте багато актуальних питань, пов'язаних з механізмом внутрішньотрубною сірководневої корозії в газопроводах, залишаються не вивченими. До таких слід віднести вплив параметрів перекачування (тиску і температури), а також кислотності середовища на швидкість процесу корозії.

Окрім того, на даний час відсутні надійні інгібітори корозії, а також інгібіторні внутрішньотрунні покриття, не опрацьована технологія їхнього нанесення на поверхню труб в трасових умовах.

Важливість забезпечення надійного протикорозійного захисту трубопроводів і комплекс невирішених задач цього напрямку визначають актуальність даної дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота носить прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів ДК "Укртрансгаз" НАК "Нафтогаз України". Дослідження сірководневої корозії виконані в рамках теми №1/92 ВО "Уренгойвидобуток" 1992-1995р.р "Розробка, випробування і освоєння технології і технічних засобів фізико-хімічного впливу на газорідний потік в стовбурі свердловини".

**Мета і задачі досліджень.** Метою даної роботи є розробка методів надійного захисту трубопроводів від внутрішньої сірководневої корозії.

Вказана мета реалізується через вирішення наступних задач:

1. Експериментальні дослідження корозійних процесів в сірководневному середовищі при високих тисках в залежності від кислотності.
2. Аналітичні дослідження процесу змішування газів в магістралі при надходженні в неї газу з вмістом сірководню.
3. Вибір інгібіторів корозії і дослідження їхніх захисних властивостей.



4. Розробка способу нанесення інгібіторного покриття на внутрішню поверхню труб.

5. Впровадження вказаної розробки при експлуатації Локачинського родовища.

*Об'єкт дослідження:* процес внутрішньотрубною сірководневої корозії газопроводів.

*Предмет дослідження:* вплив параметрів роботи газопроводу на інтенсивність корозії та розробка методів захисту шляхом нанесення покриття на внутрішню поверхню труб.

*Методи дослідження:* при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися: метод статистичного аналізу експериментальних даних, математичне моделювання досліджуваних процесів, методика раціонального планування експерименту, методи Рунге-Кутта, синус-перетворень Фур'є.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Конкретизовано інформацію про вплив кислотності середовища на корозію трубних сталей, що тривалий час знаходились в експлуатації.

2. Проведено аналітичні дослідження процесу змішування газів в трубопроводі при підкачці газу з вмістом сірководню в магістраль, за результатами яких запропоновано використання лупінга.

3. Доведена доцільність і надійність захисту труб від корозії шляхом нанесення на їхню внутрішню поверхню інгібіторних покриттів ТАРІН і НАФТОХІМ-1.

4. Проведено дослідження захисних властивостей інгібіторних покриттів.

5. Розроблено пристрій і спосіб нанесення інгібіторного покриття на внутрішню поверхню трубопроводу.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано використовувати для захисту внутрішньої поверхні труб від сірководневої корозії покриття на основі інгібіторів ТАРІН та НАФТОХІМ-1 вітчизняного виробництва, розроблено спосіб нанесення покриття на внутрішню поверхню труб в трасових умовах.

Запропоновані методи захисту від внутрішньотрубною сірководневої корозії впроваджено в практику при облаштуванні Локачинського газового родовища.

#### **Особистий внесок здобувача.**

1. Досліджено вплив кислотності середовища на корозію трубних сталей [1,3].

2. Проведено аналітичні дослідження процесу змішування газів в трубопроводі при підкачці сірководневого газу в магістраль, на основі яких

доведена доцільність використання лупінга [1,9].

3. Проведено дослідження захисних властивостей інгібіторних покриттів різних видів [2,4,8].

4. Запропоновано здійснювати захист труб від корозії шляхом нанесення на їхню внутрішню поверхню інгібіторних покриттів ТАРІН і НАФТОХІМ-1[2,4].

5. Розроблено пристрій і спосіб нанесення інгібіторного покриття на внутрішню поверхню трубопроводу великого діаметра [2].

6. Результати аналітичних і експериментальних досліджень впроваджені на Локачинському газовому родовищі [5,7].

7. Пошукач брав безпосередню участь у впровадженні результатів досліджень, одержаних в роботі, при облаштуванні Локачинського газового родовища.

Основні результати роботи отримані автором самостійно.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на:

-науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 1996.);

-конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 1997);

-науково-технічній конференції НГП "Шляхи підвищення підготовки спеціалістів для будівництва та експлуатації систем трубопровідного транспорту " (Івано-Франківськ, 1998);

-координаційній нараді з питань облаштування Локачинського газового родовища в ГПУ Львівгазвидобування (Львів, 2000);

-13-ій міжнародній науково-технічній конференції "Нові методи і технології в нафтовій геології, бурінні, експлуатації нафтобаз і газосховищ" (Краків, 2002).

В повному обсязі результати досліджень доповідались і обговорювались на розширеному засіданні кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтоховищ ІФНТУНГ і науково-технічному семінарі факультету нафтогазопроводів.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 9 друкованих праць, з яких 6 – у фахових виданнях України.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, підсумкових висновків та переліку використаних джерел, що містять 101 найменування. Основний зміст викладено на 149 сторінках машинописного тексту і містить 25 рисунків, 18 таблиць і 3 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтована актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, висвітлене наукове і практичне значення отриманих результатів. Наведена інформація про реалізацію та впровадження результатів роботи, її апробацію, особистий внесок автора і публікації.

*У першому розділі* доведена доцільність експлуатації малих газових родовищ, газ яких використовують переважно на побутові потреби. Наведена докладна характеристика малих газових родовищ України взагалі і Західної України зокрема (Львівської і Івано-Франківської областей) на предмет перспективи їхнього найефективнішого використання. Проаналізовано склад газу з огляду на його корозійну активність. Відзначено, що газові поклади Західної України містять досить високий вміст сірки (до 0,985%), що значно ускладнює їхню розробку, видобуток і транспортування газу з точки зору корозійного захисту обладнання. Окрім того, спалювання такого газу негативно впливає на довкілля. Специфічність хімічного складу малих газових родовищ Західної України поряд з їхніми незначними запасами (до 2,6 млн. м<sup>3</sup>) роблять видобуток газу в цьому регіоні економічно невигідним. З метою ефективного і безпечного використання газу цих родовищ висунута ідея змішування корозійно-активного газу малого родовища з газом, який транспортується магістраллю. Оскільки середньодобові витрати очищеного газу через магістральний газопровід на два порядки перевищують добовий видобуток газу з малого родовища, то цілком зрозуміло, що утворена газова суміш міститиме тільки незначний домішок корозійно-активних компонентів.

В зв'язку з цим проаналізовані праці провідних вчених Яблонського В.С., Нечвала М.В., Середюк М.Д. та ін., які займалися проблемами змішування речовин в трубопроводі. При цьому ретельно вивчалось питання з визначення рівноважної концентрації утвореної газової суміші, а також дозжини зони змішування. Зроблено висновок про необхідність створення нової математичної моделі процесу змішування газів.

Проведено огляд і аналіз літературних джерел, які присвячені дослідженню процесів корозійного руйнування металів взагалі і магістральних трубопроводів зокрема. Підкреслено, що, незважаючи на багаторічні дослідження численних науковців, механізм корозійних процесів вивчено недостатньо. Це зумовлено великою кількістю факторів, які спричиняють корозію і впливають на її інтенсивність. Відзначено, що основними параметрами, які впливають на інтенсивність корозійного руйнування газопроводу, є склад транспортованого газу, його температура і тиск. Розглянуті і проаналізовані існуючі методи захисту магістральних газопроводів від внутрішньої корозії. Докладно вивчено механізм захисту металевих поверхонь

від корозійного руйнування. Оскільки результати досліджень, проведені попередниками, не піддаються поширенню на дану проблему, то для досягнення поставленої в роботі мети були сформульовані вищенаведені задачі.

**В другому розділі** розглянуті емпіричні методи дослідження процесу корозії, проаналізовані їхні переваги і недоліки, наведено перелік лабораторного обладнання і необхідних хімічних реактивів. Записані аналітичні залежності для визначення масової концентрації сірководню і його об'ємної частки в досліджуваному газі, які обчислюють при використанні зазначених методів дослідження. Наведені дані з допустимих розходжень між результатами послідовних дослідів, на основі яких за результат досліду приймають середнє арифметичне двох послідовних обчислень, різниця між якими не перевищує вказаної величини.

Проведені лабораторні дослідження на металевих збірках прямокутного перерізу, виготовлених із трубних сталей, з різною шорсткістю поверхні. Метою дослідження було кількісне визначення впливу температури, тиску, складу агресивного середовища, а також часу контактування з ним на інтенсивність і ступінь корозійного руйнування металу.

Активність корозійного процесу протягом деякого проміжку часу оцінювали за величиною відносної зміни маси збірця.

Результати лабораторних досліджень на збірках прямокутного перерізу наведені на рис. 1.

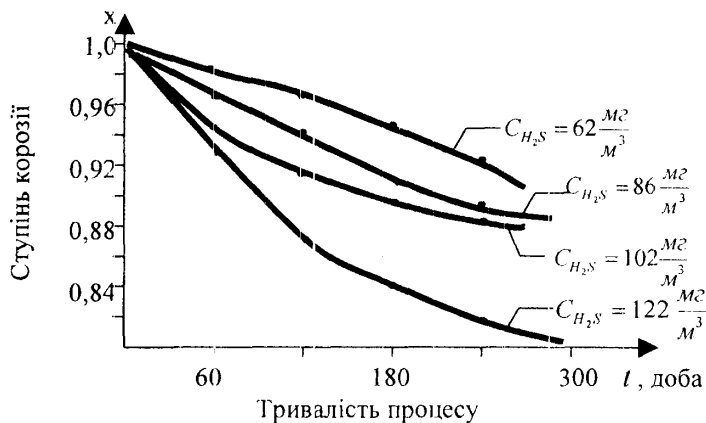


Рис. 1 Залежність ступеня корозії від часу при різних концентраціях сірководню в газі

Ступінь корозії визначалася відношенням маси взірця після вилучення його з агресивного середовища до його початкової маси. Аналіз результатів показує, що із збільшенням тривалості дії агресивного середовища на метал його корозія зростає. При цьому характер зміни ступені корозії в залежності від часу наближається до експоненціального. Встановлено, що швидкість процесу корозії є максимальною в початковий період і з плином часу сповільнюється. Це пояснюється тим, що продукти корозійного руйнування металу, які утворились, до деякої міри захищають взірець від його контакту з агресивним середовищем. Окрім того, агресивне середовище з часом втрачає свою початкову активність через насичення його продуктами корозії.

Підвищення температури і тиску корозійного середовища прискорює процес корозії. При цьому вплив температури є сильнішим за тиск, що пояснюється зростанням кінетики хімічної реакції за рахунок збільшення рухливості молекул середовища. При збільшенні температури агресивного середовища від  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  швидкість корозійного процесу зросла в 1,9 рази, а при зростанні тиску з 4 МПа до 5 МПа – в 1,25 рази.

Проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах з метою визначення допустимої концентрації сірководню в природному газі. Отримані результати підтверджують наведені в літературі значення цього параметру  $[C]=20\text{ мг/м}^3$ . За результатами досліджень встановлена залежність концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  від часу взаємодії корозійного середовища з металом обладнання (рис. 2).

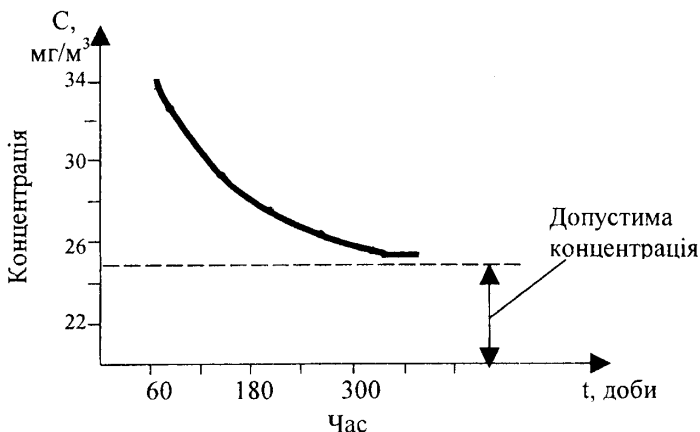


Рис. 2 Визначення допустимої концентрації сірководню в природному газі від тривалості корозійного процесу

З рис. 2 випливає, що довготривала експлуатація устаткування можлива за умов, коли концентрація сірководню в транспортованому газі не перевищуватиме  $25\text{ мг/м}^3$ .



Окремо досліджено вплив кислотності середовища на інтенсивність корозійного руйнування магістральних газопроводів. При цьому проаналізовані процеси катодної і анодної поляризації заліза в буферних розчинах з різними значеннями рН.

За результатами експериментальних досліджень побудовані графічні залежності величини електродного потенціалу і швидкості корозії заліза від показника рН розчину.

З метою прогнозування швидкості корозії трубопроводів методом статистичного аналізу експериментальних даних складена блок-схема оцінки корозійних пошкоджень устаткування і трубопроводів, а також опис параметрів корозійного процесу з їхньою подальшою класифікацією. Проаналізовано кількісно-статистичний розподіл максимальних і мінімальних значень основних параметрів корозійного процесу, виражений у вигляді кумулятивної відносної частоти. Аналіз проведено з використанням вейбуллівського розподілу. Тут же розглянуті інші закони розподілу відповідних даних стосовно корозійного експерименту, а також наведено перелік параметрів, що підпорядковуються цим розподілам. Підкреслено, що при статистичному аналізі екстремальних значень необхідно класифікувати генеральну сукупність так, щоб забезпечити однозначний розподіл. В результаті аналітико-експериментальних досліджень розроблено спосіб прогнозування швидкості корозії, що базується на аналізі показників корозійної активності середовища методами математичної статистики. Цей метод з високим ступенем точності дозволяє прогнозувати корозійну небезпеку при мінімальних матеріальних і часових витратах.

**Третій розділ** присвячено розробці методики аналітичного визначення довжини лупінга і небезпечної зони змішування газів в магістралі з метою її надійного захисту від сірководневої корозії. Проаналізовані результати досліджень провідних вчених цієї галузі – проф. Середюк М.Д., Фролова К.Д., Нечвала М.В. та ін.

Розроблена математична модель процесу змішування газів в газопроводі, в основу якої покладено рівняння руху і нерозривності газового потоку з урахуванням шляхової підкачки газу. Для аналітичного визначення розподілу газодинамічних параметрів потоку в магістральному газопроводі по довжині і в часі сформульована крайова задача. Реалізація моделі здійснюється шляхом використання синус-перетворення Фур'є. Загальний розв'язок задач для масової витрати газів, як функції лінійної координати  $x$  і часу  $t$  має вигляд:

$$M(x, t) = \frac{\pi d^3}{2\lambda \omega} \left\{ \frac{p_n - p_k}{L} - \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^{\infty} [p_{no} - (-1)^n p_{ko} - p_k - (-1)^{n-1}] + \frac{4amL}{F\pi^2 n^2} \sin \frac{\pi nx}{L} \right\} \times$$

$$\times \cos \frac{\pi nx}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 x_1}{L^2 t}} + m \left\{ \begin{array}{l} \frac{L - x_1}{L} \quad \text{при } x < x_1 \\ -\frac{x}{L} \quad \text{при } x > x_1 \end{array} \right\}, \quad (1)$$

де:  $M(x, t)$  – масова витрата як функція лінійної координати і часу;  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $\bar{w}$  – середня усереднена лінійна швидкість газу;  $p_{но}, p_n$  – початковий тиск до і після включення підкачки;  $p_{к}, p_{кв}$  – початковий і кінцевий тиск до і після включення відбору;  $L$  – довжина трубопроводу;  $x_j$  – координата підкачки;  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу;  $m$  – масова витрата підкачки;  $2a$  – коефіцієнт лінеаризації.

На основі одержаної залежності розроблено методику і алгоритмічне забезпечення для розрахунку вмісту сірководню в газовій суміші. Результати проведених обчислень дозволяють провести аналіз впливу різних факторів на розподіл концентрації сірководню в потоці газу в магістральному газопроводі після підкачки. За результатами обчислень, проведених за одержаними аналітичними залежностями з використанням відповідного програмного забезпечення, побудовані графіки залежності концентрації сірководневого газу в магістралі від лінійної координати для різних термогазодинамічних і геометричних її параметрів (рис. 3).

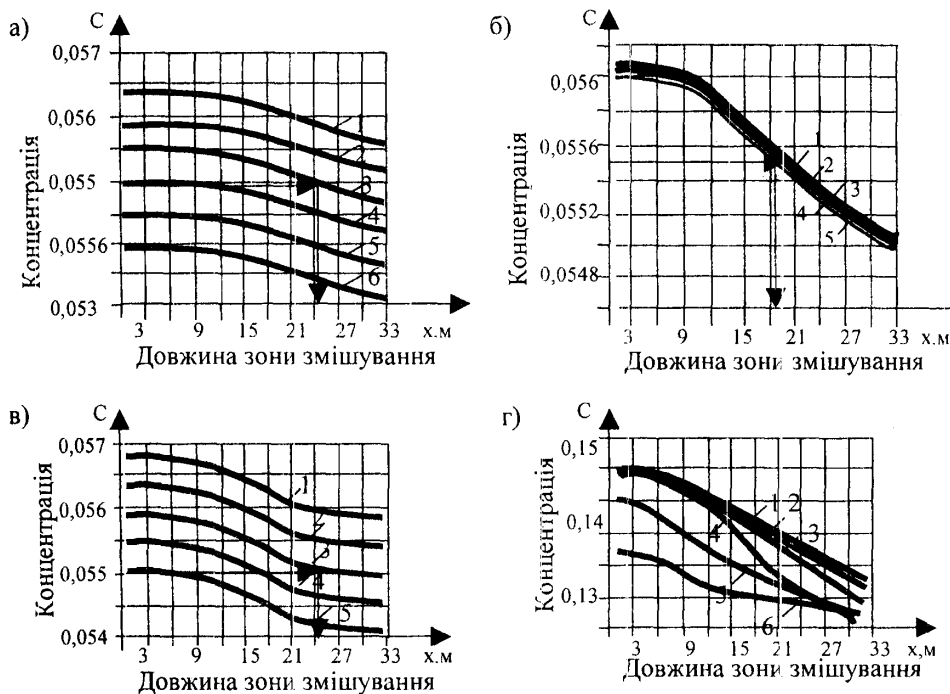


Рис. 3 Графіки залежності концентрації сірководневого газу в магістралі від: а) середньої температури (1- $T=280$  К, 2- $T=290$  К, 3- $T=300$  К, 4-

$T=310$  К, 5- $T=320$  К, 6- $T=330$  К); б) внутрішнього діаметру магістралі (1- $D=700$  мм, 2- $D=800$  мм, 3- $D=1000$  мм, 4- $D=1200$  мм, 5- $D=1400$  мм); в) відносної густини газу (1- $\Delta=0,5$ , 2- $\Delta=0,55$ , 3- $\Delta=0,6$ , 4- $\Delta=0,65$ , 5- $\Delta=0,7$ ); г) віддалі до точки підкачки (1- $L=60$  м, 2- $L=80$  м, 3- $L=100$  м, 4- $L=120$  м, 5- $L=140$  м, 6- $L=150$  м).

Аналіз одержаних графічних залежностей дозволяє оцінити вплив різних факторів на довжину зони змішування, яка підлягає захисту від сірководневої корозії. Встановлено, що в залежності від умов процесу (перш за все, хімічного складу газового потоку і термодинамічних параметрів його транспортування) довжина зони змішування може коливатися в межах від 10 м до 30 м.

З технологічних параметрів режиму найбільший вплив на довжину зони змішування має температура. При збільшенні температури з 280 К до 300 К (тобто в 1,07 рази) довжина зони змішування зменшується в 2,37 рази. З фізичної точки зору це пояснюється тим, що збільшення температури призводить до зростання внутрішньої енергії газу, тобто до збільшення рухливості його молекул, що значно інтенсифікує дифузійні процеси.

Тиск на довжину зони змішування майже не впливає: збільшення тиску в 1,1 рази призводить до збільшення довжини зони змішування в 1,03 рази.

Серед конструктивних параметрів газопроводів вплив на довжину зони змішування має відносна координата точки підкачки і діаметр газопроводу. При переміщенні відносної координати точки підкачки від  $x/L=0,1$  до  $x/L=0,9$  довжина зони змішування зростає в 1,92 рази.

Збільшення внутрішнього діаметра газопроводу зумовлює незначне зростання довжини зони змішування: при зміні діаметра з 700 мм до 1400 мм (тобто в 2 рази) довжина зони змішування збільшується в 1,1 рази.

Досліджено процес змішування газів в складних газотранспортних системах. Доведена доцільність використання лупінга, в якому здійснюється перший етап змішування газового потоку магістралі з газом, який підкачується з малого газового родовища і містить домішки сірководню. Використання лупінга значно зменшує довжину небезпечної зони змішування в магістралі, що полегшує умови її корозійного захисту на цій ділянці.

Розв'язана оптимізаційна задача з визначення довжини лупінга. Вона має бути такою, щоб довжина небезпечної зони змішування газів в магістралі не перевищувала довжину однієї труби. Для реалізації поставлених задач для кожного етапу процесу змішування газів (в лупінгу і в магістралі) використані розроблені математичні моделі. Результатом теоретичних досліджень є графіки зміни концентрації сірководню по довжині зон змішування (рис. 4), які лягли в основу графо-аналітичного методу розрахунку довжини лупінга.

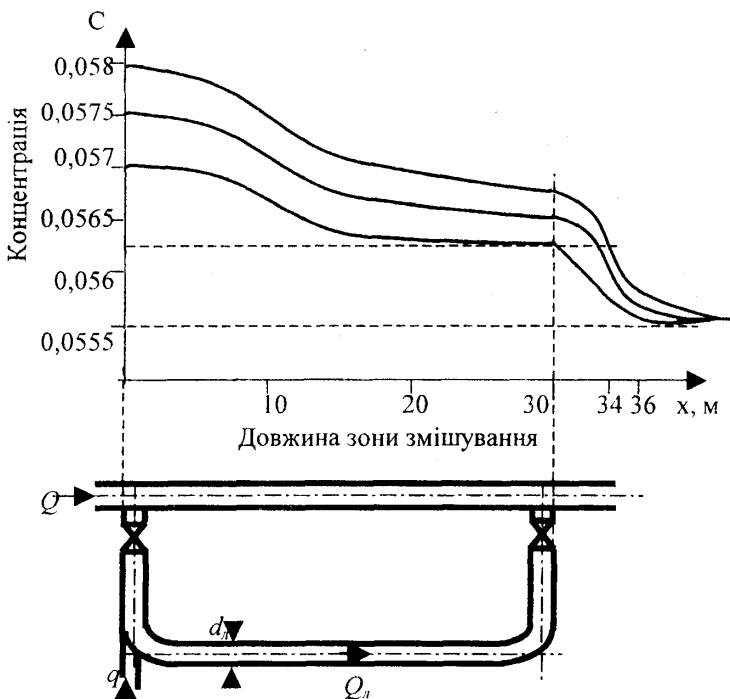


Рис. 4 Зміна концентрації сірководню по довжині зони змішування в лупінгу і магістралі ( $d_w$  – діаметр лупінга;  $Q_w$  – витрата газу по лупінгу;  $q$  – витрата підкачки;  $Q$  – витрата газу по магістралі).

Необхідно зауважити, що запропонований метод і алгоритм графо-аналітичного визначення довжини зони змішування газів в лупінгу є надто громіздким, в зв'язку з чим його можна рекомендувати для розрахунків при виконанні наукових досліджень. Тому нами був розроблений більш простий спосіб визначення раціональної довжини лупінга на основі відповідної математичної моделі. При цьому використано теорію раціонального планування експерименту за рівнями факторів впливу: температури, тиску і відносної густини газу, а також діаметра газопроводу. Обробку результатів досліджень проводили методом найменших квадратів в логарифмічній шкалі із залученням даних попередньо складеного комбінаційного квадрата. У підсумку одержали шукану залежність довжини зони змішування  $L$  (м) від тиску  $p$  (ата), діаметра газопроводу  $D$  (м), температури газового потоку  $T$  (К) і його відносної густини  $\Delta$ :

$$L = 1,8 \cdot 10^8 \cdot P^{0,11} \cdot D^{0,172} \cdot T^{-3,1} \cdot \Delta^{-1,5}, \quad (2)$$

статистичний аналіз якої показав, що коефіцієнт варіації складає 0,57%.

*У четвертому розділі* проаналізовані існуючі типи інгібіторів для захисту металів від корозійного руйнування та розглянуті їх захисні властивості. Доведена доцільність використання вітчизняних інгібіторів корозії НАФТОХІМ-1 і ТАРІН для захисту внутрішньої поверхні магістрального газопроводу від сірководню.

Досліджені фізико-механічні властивості антикорозійних покриттів різних типів. Встановлено, що із збільшенням часу застигання і температури адгезія покриття з основою зростає. Отримана графічна залежність величини адгезії від часу контакту поверхні з інгібітором (від початку змочування ним поверхні до початку його розтирання по ній). Встановлено, що найбільш ефективно час вільного змочування поверхні інгібітором впливає на адгезію в період тільки перших 3 с їхнього контакту. Визначено основні механічні характеристики плівкового інгібіторного покриття – модуль Юнга і коефіцієнт Пуасона.

Запропоновано спосіб і пристрій для нанесення інгібіторного покриття на внутрішню поверхню труб великого діаметра в трасових умовах. Принцип роботи пристрою базується на поєднанні інжекторного всмоктування інгібітора корозії потоком повітря і його розбрискування на внутрішню поверхню стінок трубопроводу через сопла сегнерового колеса. Антикорозійне покриття на внутрішню поверхню труб малого діаметра запропоновано наносити шляхом пропуску по трубопроводу рідинної інгібіторної пробки, яка виштовхується за допомогою еластичного поршня. При розробці зазначеного способу з метою утворення рівномірного захисного покриття з високою адгезією необхідно було задовільнити дві умови:

1. Рідинна інгібіторна пробка, яка проштовхується еластичним поршнем, повинна повністю охоплювати переріз труби.

2. Час вільного змочування рідкою фазою інгібітора поверхні труби повинен бути не меншим 3 с.

З цих двох умов встановлено технологічні параметри, значення яких необхідно визначити. Це об'єм інгібіторної рідинної пробки і швидкість руху еластичного поршня. З цією метою за певних припущень був теоретично досліджений розподіл напору (тиску) по довжині інгібіторної пробки. При цьому розглядали рівняння стаціонарного руху нестискуваної в'язкої рідини у векторній формі, розв'язок якого сдержали з використанням формули Гріна і методу Рунге-Кутта. На основі методу Сімпсона здійснені реалізації математичних моделей, в результаті чого одержана аналітична залежність для визначення розподілу тиску по довжині інгібіторної пробки,

яку проштовхує еластичний поршень у вигляді:

$$p = \frac{2\mu}{D^2} \int_0^L \frac{3u_0 dx}{1 - 3\delta}, \quad (3)$$

де:  $D$ -внутрішній діаметр труби;  $\mu$ -динамічна в'язкість рідини;  $\delta$ -товщина пограничного шару,  $u_0$ -швидкість руху поршня,  $L$ -довжина пробки.

За результатами обчислень, проведених за формулою (3), побудовано графік розподілу тиску по довжині інгібіторної пробки (рис. 5).

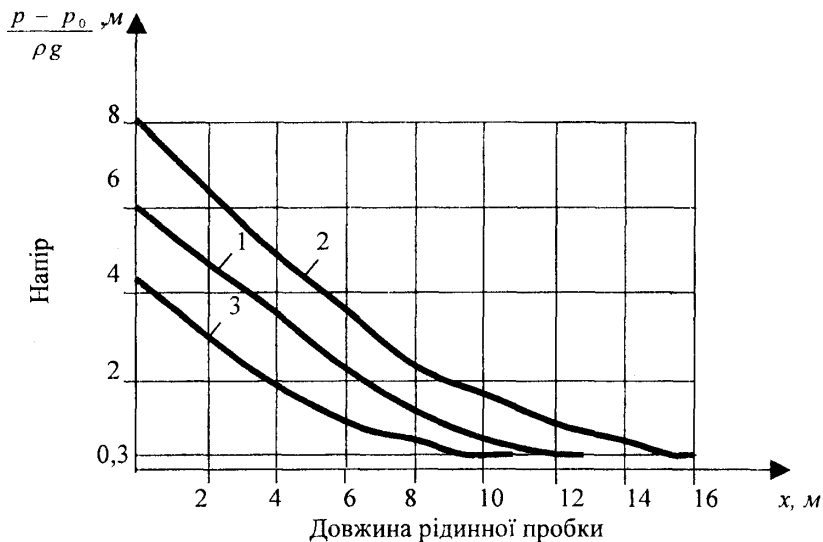


Рис. 5 Розподіл тиску по довжині інгібіторної пробки: 1- $\Delta z=0$  (рівнинна ділянка газопроводу); 2- $\Delta z=+1,5$  м (висхідна ділянка); 3- $\Delta z=-1,5$  м (нисхідна ділянка)

Об'єм рідинної інгібіторної пробки визначають наступним чином. Обчисливши швидкість  $u_0$  руху еластичного поршня, за формулою (3) будують криву зміни напіру і на неї накладають горизонтальну лінію, що відповідає діаметрові труби. Перетин зазначених ліній визначає довжину рідинної пробки, тобто довжину зони, для якої напір буде не меншим за діаметр труби і в якій рідина тектиме повним перерізом.

**П'ятий розділ** присвячено розробці і обґрунтуванню доцільності впровадження альтернативного проекту експлуатації Локачинського газового родовища. Наведена його загальна характеристика: описані продуктивні горизонти, зазначено, якими свердловинами вони експлуатуються, наведено запаси природного газу, його хімічний склад, а також пластові і робочі тиски

і температури окремо по об'єктах. Відзначено, що в зв'язку з незначними запасами газу спорудження комплексу з очистки і підготовки газу цього родовища для подальшого транспортування є вкрай недоцільним.

Для можливості реалізації альтернативного проекту експлуатації Локачинського газового родовища на стадії його проектування проведені відповідні гідравлічні розрахунки, яким передував розрахунок основних фізичних і термодинамічних параметрів газового потоку. Наведено докладний опис обладнання і запірної арматури, що передбачена даним проектом, а також профіль траси, по якій прокладено магістральний газопровід Іванцевичі-Долина. Все це дозволило визначити необхідну довжину і діаметр газопроводу-відводу і кваліфіковано з умов міцності підібрати відповідні труби. Газопровід Іванцевичі-Долина є тринитковим. Обчисленнями встановлено, що після змішування газів всіх трьох ниток після подачі в них газу Локачинського родовища концентрація сірководню на вході КС Кобрин не перевищуватиме допустимого рівня і складе 0,04%.

Альтернативним проектом передбачено захист від сірководневої корозії підвідного газопроводу, в зв'язку з цим проведені відповідні розрахунки з визначення його довжини і діаметра. З урахуванням кута нахилу нисхідної ділянки обчислена швидкість руху системи "еластичний поршень-інгібіторна рідинна пробка". За розробленою методикою визначено розподіл тиску по довжині інгібіторної пробки і її об'єм. Докладно описано проведення антикорозійного захисту в трубах магістрального газопроводу в місці врізання газопроводу-відводу за запропонованою методикою. При цьому визначаються: кутова швидкість труби-коромисла (сегнерового колеса), через сопла якої при її обертанні рідкий інгібітор корозії розпилюється на внутрішню поверхню труби; швидкість поступального руху пристрою і потрібний об'єм інгібіторної рідини.

Реалізація запропонованих підходів і числові значення прогнозованих величин одержали підтвердження при практичному впровадженні запропонованих методів в практику. У всіх випадках розбіжність між прогнозами і фактичними параметрами не перевищує 10%.

## ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі узагальнення результатів аналітичних та експериментальних досліджень вирішена важлива задача захисту від внутрішньої корозії промислових і магістральних газопроводів при освоєнні малих газових родовищ України, що містять сірководневу домішку.

1. На основі результатів експериментальних досліджень впливу тиску і кислотності агресивного середовища встановлені закономірності зміни інтенсивності корозійного процесу в часі. Їхній аналіз показує, що збільшення тиску і кислотності середовища прискорює корозійний процес.

Так, за 120 діб при тиску 4 МПа і водневому показнику  $pH = 6$  (нейтральне середовище) масовий показник корозії склав 0,84. при тиску 6 МПа в аналогічних умовах – 0,71. При зменшенні водневого показника  $pH$  до 4,5 масовий показник корозії склав, відповідно, до 0,77 і 0,63. Отже, при виборі методів захисту трубопроводу від внутрішньої сірководневої корозії необхідно враховувати тиск і кислотність середовища.

2. В результаті теоретичних досліджень процесу змішування газів визначена довжина зони газопроводу, яку необхідно захищати від дії сірководню. Встановлені графічні залежності довжини зони змішування від характеристик газопроводу і параметрів режиму транспортування газу. Довжина зони змішування коливається в межах 8-22 м.

3. Запропоновано ступінчасте змішування газів, яке полягає в тому, що сірководневий газ подається не в магістраль безпосередньо, а в лупінг, довжина якого відповідає довжині зони первинного змішування до рівноважної концентрації газу. Подальше змішування до допустимої концентрації відбувається в магістралі. Встановлено, що довжина зони змішування в магістралі не перевищує 2-4 м, що зумовлює простоту нанесення інгібіторного покриття в трасових умовах.

4. Дослідженнями встановлено, що для захисту магістралі, лупінгу і підвідного газопроводу від сірководневої корозії доцільно наносити на їхню внутрішню поверхню покриття з інгібіторів корозії ТАРІН та НАФТОХІМ-1 вітчизняного виробництва. Проведені експериментальні дослідження показали, що якість покриття залежить від метеорологічних умов його нанесення на поверхню. Так, при температурі 20°C і часі застигання 24 г адгезія плівки при товщині 1,5 мм складає 0,88 МПа, що перевищує адгезію відомих ізоляційних покриттів майже в 5 разів. Визначено також характеристики міцності запропонованого покриття: модуль пружності і коефіцієнт Пуасона, які складають відповідно 3,6 МПа і 0,55 МПа. Встановлено, що при розтиранні нанесеного покриття по стінці труби поршнем на його адгезію і характеристики міцності впливає час ( $\tau$ ) від моменту нанесення до початку розтирання. Найвищі показники нанесеного покриття відмічені при  $\tau \geq 3$  с.

5. Для нанесення покриття на внутрішню поверхню стінок магістралі (тобто труб великого діаметра) розроблено спеціальний пристрій. Нанесення покриття на внутрішню поверхню стінок труб малого діаметра здійснюється протискуванням інгібіторної пробки через трубопровід за допомогою еластичного поршня. При цьому важливою умовою руху системи, від якої залежить якість покриття, є повне загловнення перерізу трубопроводу інгібітором. Це можливо у випадку, якщо напір в кожному перерізі рідинної пробки буде не меншим за діаметр трубопроводу. З метою визначення розподілу напору (тиску) по довжині рідинної пробки створена математична модель, до складу якої входить стаціонарне рівняння руху і рівняння нерозривності, при цьому враховані кориолісові і гравітаційні втрати.



Розроблена математична модель покладена в основу запропонованої технології нанесення інгібіторного покриття на внутрішню поверхню стінок трубопроводу в трасових умовах.

6. Всі розробки і рекомендації, сформульовані в роботі, впроваджені в експлуатацію при розробці Локачинського газового родовища. Результати дослідно-промислових робіт підтверджують основні теоретичні положення досліджень. Економічний ефект від впровадження склав 252, 04 тис.грн. в рік.

**Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано в наступних працях:**

1. Грудз В.Я., Мартинюк О.Т. Моделювання процесів змішування газів в газопроводі.// Нафтова і газова промисловість.-2000.-№5-с.51.

2. Мартинюк О.Т. Захист сталених виробів від корозії в процесі їх виготовлення та зберігання.// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. №36, том 5.-Івано-Франківськ. 1999.-с.56-57.

3. Мартинюк О.Т. Залежність корозії заліза від концентрації водневих іонів. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. №35. -Івано-Франківськ.-1998.-с.226-232.

4. Мартинюк О.Т. Термічна обробка зварних з'єднань трубопроводів. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. №38, том 5. -Івано-Франківськ.-2001.-с.69-73.

5. Мартинюк О.Т. Очистка газу Локачинського родовища від сірководню.// Методи та прилади контролю якості. №7. -Івано-Франківськ.-2001.-с.29-31.

6. А.с. 33752 А F 16L 41/04. Пристрій для безвогневої врізки відводу в діючий трубопровід. / Грудз В.Я., Вржук Л.С., Мартинюк О.Т., Боднарчук В.М. Зареєстровано відповідно до закону України №3687-ХІІ- . У редакції від 1 червня 2000 року № 1771-ІІІ. Бюл.№1. 15.02.2001.

7. Мартинюк О.Т. Особенности транспортирования газа, содержащего сероводород.// XIII MIĘDZYKONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA "Nowe Metody i Technologie w Geologii Naftowej, Wiertnictwie, Eksploatacji Otworowej i Gazownictwie", том II, 2002, (st.79-83

8. Мартинюк Т.А., Мартинюк О.Т. Методи підвищення механічних властивостей зварних з'єднань трубопроводів.// Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу ІФДТУНГ.-Івано-Франківськ, -1996.-с.62.

9. Грудз В.Я. Мартинюк С.Т. Розрахунок параметрів зони змішування газів в газопроводі. // Науково-технічні конференції НГП "Шляхи підвищення підготовки спеціалістів".-Івано-Франківськ, -1998.-с.27.

## АНОТАЦІЯ

**Мартинюк О.Т. Розробка технології транспорту сірководневих газів малих родовищ України. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003.

Робота присвячена питанням економічно і екологічно вигідної експлуатації малих газових родовищ України, в газових сумішах яких містяться домішки корозійно-активних компонентів (сірководню, вуглекислого газу, меркаптанових сполук сірки тощо). В зв'язку з цим проведено широкий комплекс експериментальних досліджень, мета яких полягає у встановленні кількісної картини впливу різних факторів на інтенсивність корозійного руйнування металів магістрального трубопровідного обладнання. Запропоновано корозійно-активний газ малих родовищ закачувати в головну магістраль газопроводу через лупінг, в якому відбувається перший етап змішування газу магістралі з газом малого родовища. В зв'язку з великою витратою газу через магістраль концентрація сірководню в утвореній газовій суміші різко спадає вже по довжині лупінга. Розроблена методика визначення раціональних довжин лупінга і небезпечної зони змішування газового потоку в магістральному газопроводі. Запропоновані способи корозійного захисту внутрішніх поверхонь труб малого (в лупінгу) і великого (в трубі магістрального газопроводу) діаметрів. Проведені експериментальні дослідження з визначення механічних властивостей антикорозійних покриттів різних типів, за результатами яких доведена доцільність використання інгібіторів корозії вітчизняного виробництва. Спроектвані пристрої для нанесення інгібіторного антикорозійного покриття, визначені їхні основні технологічні і геометричні параметри.

Вперше в практику експлуатації Локачинського газосховища впроваджені заходи і рекомендації розроблені в дисертаційній роботі, які показали хороші результати, що отримані шляхом виміру технологічних параметрів процесів та розрахованими для конкретних умов по запропонованих математичних моделях.

*Ключові слова:* сірководнева корозія металів, інгібітори корозії, газова суміш, лупінг, магістральний газопровід.

## АННОТАЦИЯ

**Мартынюк О.Т. Разработка технологии транспорта сероводородсодержащих газов малых месторождений Украины. – Рукопись.**

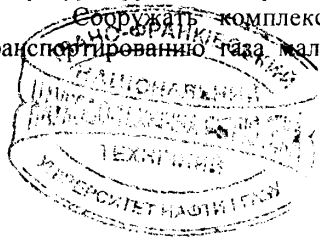
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Ивано-Франковск, 2003.

Работа посвящена вопросам экономически и экологически выгодной эксплуатации малых месторождений Украины, газ которых содержит коррозионно-активные компоненты (сероводород, углекислый газ, меркаптановые соединения серы и др.). В этой связи проведен широкий спектр лабораторных исследований металлов магистрального и газопромыслового оборудования с целью установления влияния отдельных факторов и их совокупности на интенсивность коррозионного разрушения. Рассмотрены различные эмпирические методы исследований процесса коррозии и определения массового и процентного содержания в газовой смеси сероводорода. Получены кривые зависимости степени коррозии металлических образцов, изготовленных из труб, от времени при изменении основных технологических параметров транспортирования газа по магистральному газопроводу (температуры и давления), а также чистоты обработки поверхности образца. Установлено, что наибольшее влияние на степень коррозии оказывает повышенная температура агрессивной среды.

Изучено влияние кислотности среды на интенсивность коррозионных процессов. Построены кривые зависимости электродного потенциала и скорости коррозии железа от показателя pH раствора, а также кривые катодной и анодной поляризации железа в буферных растворах с различными показателями pH среды.

Прогнозирование скорости коррозии предложено проводить методом статистического анализа экспериментальных данных. При этом рассмотрены вейбулловские распределения для минимальных и максимальных величин. Разработана методика прогнозирования сроков выхода из строя магистрального газопроводного оборудования, обусловленного его коррозионным разрушением. При этом подтверждено значение допустимой концентрации сероводорода в природном газе, бездоказательно указанное в литературе другими авторами.

Соборудовать комплекс по очистке и подготовке к дальнейшему транспортированию газа малых месторождений в связи с незначительными



его запасами экономически невыгодно. Поэтому предложено сероводородсодержащий газ малого месторождения смешивать с газовым потоком магистрального трубопровода в лупинге (1-ый этап). В связи с большим расходом газа магистрали концентрация сероводорода при смешивании газов по длине лупинга резко падает. Исследованы процессы смешивания газов в магистральном трубопроводе и разработана методика определения рациональной длины лупинга и опасной зоны смешивания газов в трубе магистрали (2-ой этап). Построены кривые изменения концентрации сероводорода по длине лупинга и опасной зоны магистрального трубопровода. Указанные результаты были получены после реализации математической модели процесса смешивания газов в газопроводе. При моделировании нестационарного процесса в магистральном газопроводе, обусловленного сосредоточенной подкачкой газа, были приняты некоторые допущения.

Исследованы процессы смешивания газов в сложных газотранспортных системах, при этом использована методика рационального планирования эксперимента по трем уровням факторов влияния.

Проанализированы существующие методы защиты трубопроводов от внутренней сероводородной коррозии, отмечены их недостатки и преимущества. Проведены исследования механических свойств ингибиторных антикоррозионных покрытий, по результатам которых предложен конкретный тип ингибитора коррозии отечественного производства. Разработаны методы нанесения защитных покрытий на внутренние поверхности труб малого (для лупинга) и большого (для трубы магистрального газопровода) диаметров. Спроектированы приспособления для нанесения жидкого ингибитора на указанные поверхности и разработаны методики для определения их основных технологических и геометрических параметров.

Разработан альтернативный проект эксплуатации Локачинского газового месторождения, газ которого содержит сероводород. По разработанным методикам определены основные эксплуатационные, технологические и геометрические параметры, а также экономические показатели данного предложения.

Впервые в практике эксплуатации Локачинского месторождения использованы мероприятия и рекомендации, разработанные в диссертационной работе, которые показали хорошую сходимость фактических результатов, полученных путем изменения технических параметров процессов, с прогнозными, рассчитанными для конкретных условий по предлагаемым математическим моделям.

*Ключевые слова:* сероводородная коррозия металлов, ингибиторы коррозии, газовая смесь, лупинг, магистральный газопровод.

## ANNOTATION

Martynyuk O.T. Technology engineering of the hydrogen sulphid gases transport of small fields of Ukraine. - Manuscript.

Thesis on receiving the scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.15.13 – oil and gas pipes, bases and storehouses. - Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas. - Ivano-Frankivsk, 2002.

This work is dedicated to the problems of economically and ecologically favorable operation of small gas fields of Ukraine, in the gas mixtures of which there are corrosion-fissile components (hydrogen sulfide, carbon dioxide, mercaptan combination of sulfur etc.). A broad spectrum of laboratory researches is conducted with the purpose of establishment the influence of the separate factors and their set (combination) on intensity of corrosive destroying of metals of trunk pipeline equipment. It is offered to admix with a gas stream the corrosion active gas of small fields by looping (1-st stage). In connection with a heavy expense of gas of a main (line) the concentration of a hydrogen sulfide at blending gases lengthwise looping slumps. The technique of definition (determination) of rational length looping and dangerous mixing zone of gases in a tube of a main (line) (2 stage) is developed.

The methods of deposition of sheeting on internal surfaces of tubes of small (in looping) and large (in a tube of trunk gas pipeline) diameters are developed. The adaptations for deposition of a fluid inhibitor on the indicated surfaces are designed and the techniques for definition (determination), their basic technological and geometrical parameters are developed.

Keywords: hydrosulphuric corrosion of metals, corrosion inhibitors, gas mixture, looping, trunk pipeline.