

622.691.24(477.61/62)

H 63

Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

Ніколаєв Олександр Вікторович



(043)  
(477.61/62)

УДК 622.691.24.001.42

H 63

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІДЗЕМНИХ  
СХОВИЩ ГАЗУ В УМОВАХ ДОНЕЦЬКОГО БАСЕЙНУ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

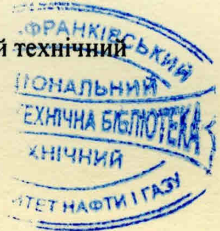
**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2003

Дисертацією є рукопис

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

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Лютак Зіновій Петрович**  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу



**Офіційні опоненти:**  
доктор технічних наук, професор  
**Семенцов Георгій Никифорович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Білий Микола Григорович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

**Провідна установа:** Національний університет "Львівська політехніка"  
(м. Львів)

... "4" липня 2003 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої  
Івано-Франківському національному технічному  
...ська, 15

...квівського  
...но-Франківськ,

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підземні сховища газу (ПСГ), як складова магістрального трубопровідного транспорту, є важливою ланкою паливно-енергетичного комплексу. Визначення технічного стану технологічних вузлів, газопровідної системи та її шлейфів, окремих ділянок є важливою задачею в комплексному підході дослідження залишкового ресурсу роботи системи підземного зберігання газу (СПЗГ), оскільки кількість аварій пов'язаних із трубопровідним транспортом з року в рік збільшується. В умовах Донецького басейну поряд з технологічними чинниками впливу, додаються додаткові чинники, що породжені регіональними особливостями, такими, як гірничі виробітки і шахтні вибухи, які приводять до деформацій ґрунтів і, відповідно, зміни положення фундаментів споруд, відхилення параметрів технологічних об'єктів від проектних. Якщо контроль параметрів цехового обладнання, зокрема компресорних установок газу відбувається через проведення регламентних робіт після певного відпрацювання часу, то найбільшу небезпеку представляють технологічні вузли, трубопроводи, які притерпають від впливу вищевказаних чинників. В даний час є методика контролю і технічної діагностики окремих технологічних об'єктів. Визначення технічного стану окремого технологічного вузла, окремої ділянки трубопроводу не гарантує безаварійної експлуатації СПЗГ в цілому. Технологічні вузли, трубопровідна мережа, надземні і підземні комунікації з'єднані фізично і пов'язані єдиним технологічним процесом. Зміна параметрів однієї частини газопровідної системи СПЗГ може викликати зміну зовсім іншої частини. Застосування загальноприйнятої методології контролю технологічного обладнання з використанням класичних неруйнівних методів контролю недостатньо, так як не дає загальної оцінки технічного стану ПСГ в цілому.

Тому розробка методики і створення пристроїв контролю за технічним станом об'єктів ПСГ у реальному масштабі часу є одним із основних напрямків забезпечення їх експлуатаційної надійності. Це дасть можливість оперативно впливати на негативні процеси, прогнозувати їх і запобігати виникненню аварійних ситуацій з небезпечними наслідками.

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

Дисертаційна робота виконувалась згідно з науково-господарською тематикою науково – дослідного інституту нафтогазових технологій Івано – Франківського національного технічного університету нафти і газу (госпдоговірна тема №129/2000 "Контроль технічного стану технологічного обладнання Краснопопівського ПСГ" згідно договору з Северодонецьким виробничим управлінням підземного зберігання газу Управління магістральних газопроводів "Донбастрансгаз", а також науково-дослідною тематикою "Розробка методів та засобів контролю параметрів технологічних процесів, якості виробів та конструкцій" кафедри "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ).

**Мета і задачі дослідження:**  
методику та пристрій контролю



роботи є розробити  
гану технологічного

обладнання підземного сховища газу для визначення можливості його подальшої експлуатації.

У відповідності до мети роботи були поставлені й вирішені наступні задачі:

- провести аналіз відомих методів і засобів контролю технічного стану технологічного обладнання СПЗГ в умовах Донецького басейну і визначити особливості впливу технологічних і експлуатаційних чинників на зміну їх проектних параметрів;

- розробити метод визначення відносного кута нахилу технологічних об'єктів ПСГ в реальному масштабі часу, що дозволить з більш високою точністю визначати величину, напрямок і динаміку переміщень для ідентифікації небезпечних ділянок газових мереж;

- розробити гідродинамічну систему спостереження за просторовою зміною положення фундаментів технологічних вузлів і газопроводів ПСГ у реальному масштабі часу і оцінити точність системи контролю;

- розробити фізико-математичну модель взаємодії підземного трубопроводу з ґрунтовими масивами при утворенні в них тріщин і відповідно зсувів з ідентифікацією факторів, що дасть можливість визначити їх степінь впливу на зміну положення трубопроводу в активній зоні зсуву;

- отримати аналітичну залежність, яка пов'язує параметри тиску, температури газу при відборі його із ПСГ з відповідним значенням напруження в підземних трубопроводах для визначення реального технічного стану трубопроводів;

- розробити математичну модель визначення координат максимального прогину підземного трубопроводу, що дасть можливість визначити величину і напрямок дії на нього зовнішніх зусиль;

- розвинути метод визначення напружено-деформованого стану (НДС) підземних та надземних трубопроводів через визначення зміни їх геометричних координат з метою моніторингу технічного стану;

- провести лабораторні випробування розробленого методу і гідродинамічної системи спостережень та натурні дослідження технологічних вузлів СПЗГ, зробити аналіз і оцінку їх результатів.

**Об'єкт дослідження** є технологічне обладнання ПСГ.

**Предмет дослідження** є методи та засоби контролю технічного стану технологічного обладнання ПСГ.

**Методи дослідження.** Встановлення взаємозв'язків між параметрами, які характеризують просторову зміну ОК і інформативними сигналами здійснювалось за допомогою теорії коливань. Для встановлення залежностей між параметрами фізичної дії на досліджуваний ОК і допустимими експлуатаційними параметрами використовувались методи технічної механіки. Під час проведення експериментальних досліджень та обробки їх результатів застосовувались методи теоретичної фізики та математики. При розробці технічних засобів використовувались методи системотехніки.

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

- вперше запропоновано системне рішення в структурі пристрою з контролю зміни просторового положення окремого ОК або всієї мережі без

вибору реперної точки, що дає можливість без складних обчислень плоского і просторового кута визначити дані зміни, що важливо на зсувних ділянках, де вибір реперної точки затруднений;

- вперше розроблена фізико-математична модель взаємодії підземного трубопроводу з ґрунтовими масивами при утворенні в них тріщин і відповідно зсувів з ідентифікацією факторів, що дало можливість визначити їх степінь впливу на зміну положення трубопроводу в активній зоні зсуву;

- вперше отримано аналітичну залежність, яка пов'язує параметри тиску, температури газу при відборі його із ПСГ з відповідним значенням напруження в підземних трубопроводах, що дає можливість прогнозувати НДС трубопроводів;

- вперше теоретично обґрунтована математична модель визначення координат максимального прогину підземного трубопроводу, що дає можливість визначити величину і напрямок дії на нього зовнішніх зусиль;

- дістав подальшого розвитку ємнісний метод визначення відносного кута нахилу технологічних об'єктів ПСГ в реальному масштабі часу, що дозволяє з більш високою точністю визначати величину, напрямок і динаміку переміщень;

- дістав подальшого розвитку метод визначення напружено-деформованого стану (НДС) підземних та надземних трубопроводів через визначення зміни їх геометричних координат з метою моніторингу технічного стану.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- у рамках роботи розроблено методику та гідродинамічну систему спостережень дослідження технічного стану підземних газових мереж ПСГ в умовах Донецького басейну, яка дає можливість оцінити реальний технічний стан технологічних вузлів в експлуатаційних умовах, виокремити небезпечні ділянки й локалізувати за ознаками їх технічного стану для прийняття своєчасних рішень;

- результати роботи були використані при контролі технічного стану технологічних вузлів Краснопопівського ПСГ Северодонецького виробничого управління підземного зберігання газу Управління магістральних газопроводів "Донбастрасгаз" Запропонований підхід контролю з використанням натурних досліджень на об'єктах Краснопопівського ПСГ дав нову кількісну оцінку стану об'єкту в цілому, що привело до проведення ремонтно-відновлювальних робіт і заміни окремих шлейфів до газових свердловин, трубопроводів гребінки, які непридатні до подальшої експлуатації ( згідно акту впровадження від 5 лютого 2002 р.);

- розроблена методика і система контролю може бути використана на споріднених об'єктах нафтогазового комплексу;

- експериментальна установка системи, методика контролю використовується в науковому секторі кафедри "Методи і прилади контролю

якості та сертифікації продукції" ІФНТУНГ, а також може бути використана у навчальному процесі.

**Особистий внесок здобувача полягає:**

- в аналізі та обґрунтуванні найбільш важливих чинників впливу на параметри технічного стану технологічного обладнання СПЗГ в умовах Донецького басейну і їх систематизації[5];

- у подальшому розвитку ємнісного методу визначення відносного кута нахилу технологічних об'єктів ПСГ в реальному масштабі часу для визначення величини, напрямку і динаміки їх перемішень[2, 7];

- в отриманні системного рішення в структурі пристрою з контролю зміни просторового положення окремого ОК або всієї мережі без вибору реперної точки і без складних обчислень плоского і просторового кута визначення даних змін і його розробці[1, 3, 8, 9, 11, 12];

- у розробці фізико-математичної моделі взаємодії підземного трубопроводу з ґрунтовими масивами при утворенні в них тріщин і відповідно зсувів з ідентифікацією факторів[4];

- в отриманні аналітичної залежності, яка пов'язує параметри тиску, температури газу при відборі його із ПСГ з відповідним значенням напруження в підземних трубопроводах[6];

- у теоретичному обґрунтуванні математичної моделі визначення координат максимального прогину підземного трубопроводу, що дає можливість визначити величину і напрямок дії на нього зовнішніх зусиль[2];

- у подальшому розвитку методу визначення напружено-деформованого стану (НДС) підземних та надземних трубопроводів через визначення зміни їх геометричних координат з метою моніторингу технічного стану[3];

- у видачі рекомендацій з надійності експлуатації підземних газосховищ на основі узагальнення отриманих результатів натурних досліджень у реальному масштабі часу[1, 4, 7, 10, 11].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи були обговорені на таких конференціях: Третя Українська науково-технічна конференція "Неруйнівний контроль і технічна діагностика", м. Дніпропетровськ (Україна), 1999 р., Науково-технічна конференція, м. Славськ Львівської обл.(Україна), 2000 р., Науково-технічна конференція, смт. Мізунь Івано-Франківської обл. (Україна) 2001 р., Науково-технічна конференція в інституті зварювання ім. Патона НАН України, 2000 р., 2002 р., Міжнародна науково-практична конференція "Нафта і газ України" 2000 р, м. Івано-Франківськ. Спеціалізована науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання", м. Івано-Франківськ, 2002 р, а також на наукових семінарах кафедри "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" ІФНТУНГ, 1999-2002 р. м. Івано-Франківськ.

**Публікації.** Результати роботи опубліковувались у 5 статтях фахових наукових журналів, (2 статті одноособові), у 5 збірниках матеріалів і тез н/т конференцій, двох патентах України.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 93 найменувань та 13

додатків і викладена на 152 сторінках. Робота містить 64 рисунки, 6 таблиць і 13 додатків на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, визначається провідна ідея даного наукового напрямку, практичне значення одержаних результатів, показано зв'язок роботи із науковими планами і темами, формулюється головна мета та задачі досліджень, апробація та реалізація результатів, наведені дані про публікації автора та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проведено аналіз чинників, які впливають на надійність технологічного обладнання ПСГ та зроблено їх систематизацію. Показано, що найбільший вплив на технічний стан ПСГ в умовах Донецького басейну мають деформації ґрунтів, їх зсуви, які викликані сейсмічним впливом від аварійних вибухів газу в шахтах, наявністю порожнин в ґрунтах, як результату гірничих виробіток, геологічні неоднорідності ґрунтів, що приводять до зміни проектного положення технологічних вузлів, зміни напружено-деформованого стану трубопроводів. Показано, що використання окремих методик чи їх послідовності, які застосовуються для контролю подібних об'єктів у нормативних документах, дають можливість визначати окремі параметри технічного стану ПСГ. Однак їх використання не дає можливості визначити динаміку зміни експлуатаційних характеристик технологічних вузлів ПСГ реальному масштабі часу, причини і джерело їх виникнення, що важливо для своєчасного прийняття правильних рішень і попередження аварійних ситуацій. Для такого протяжного об'єкту, як ПСГ, складовими якого є підземні, наземні і надземні споруди пов'язані одним технологічним процесом. Розроблені засоби і технології контролю повинні забезпечувати комплексне обстеження об'єкту контролю в цілому шляхом аналізу дії чинників, їх впливу на технічний стан окремих ділянок, технологічних вузлів, підземних і надземних трубопроводів. При цьому необхідно ідентифікувати найбільш небезпечні ділянки протяжних трубопроводів шляхом визначення їх напружено-деформованого стану через динаміку зміни просторового положення елементів обладнання, споруд і конструкцій, що в конкретних умовах значно підвищує їх якісні показники.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі напружено-деформованого стану підземного трубопроводу при поперечному зсуві ґрунтів, аналізу і оцінці ступеня впливу чинників на технічний стан газової мережі ПСГ. Обґрунтовуючи вплив чинників на зміну експлуатаційних параметрів технологічних вузлів ПСГ приходимо до висновку, що більшість з них спричиняють тріщини в ґрунтах, які приводять до його переміщення, нерівномірного просідання фундаментів разом із технологічними вузлами чи зміщення трубопроводу, який пересувається разом з масивом землі, згинаючись за формою жорсткої нитки під дією навантаження  $q(x)$  і набуває додаткових експлуатаційних напружень (рис. 1). Задача полягає у визначенні розподілу нормальних напружень перерізу трубопроводу по його осі  $Ox$  та проведенні розрахунку на міцність

В результаті проведення вимірювання кута нахилу трубопроводу довжиною  $L$ , ємнісними перетворювачами, встановлюється координата максимального прогину та конфігурація осі трубопроводу, довжина ділянки зсуву ґрунту.

Посередині ділянки прогин трубопроводу є максимальним і рівним  $f$ . Вважаємо, що видовження труб відбувається за рахунок їх розтягу на ділянці  $AB$  та ділянок  $L_0$ , які прилягають до зони зсуву. Таким чином, крім силового тиску ґрунту на трубопровід, в ньому виникає повздовжня розтягуюча сила  $P$ . Отже, в трубах до напружень, зумовлених внутрішнім тиском газу, які враховані в проектних рішеннях, додаються і напруження від згину та розтягу, що є найбільш небезпечними, так як вони набуті в процесі експлуатації. В розрахунковій схемі взаємодії трубопроводу з ґрунтом використовуємо диференційне рівняння згину, яке згідно прийнятих припущень, матиме вигляд:

$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + P(y - w_0) - x \int_0^L \frac{q(x, v_0) d(x)}{2} + \int_0^x q(\zeta, v_0)(x - \zeta) d(\zeta), \quad (1)$$

де  $M_0$  - згинний момент у перерізах  $A-A$  і  $B-B$ ;  $P$  - повздовжнє зусилля в перерізах  $A-A$  і  $B-B$ ;  $w_0$  - прогин трубопроводу;  $q(x, v_0)$ ,  $q(\zeta, v_0)$  - інтенсивність

розподіленого навантаження відповідно в перерізах  $x$ ,  $\zeta$ ;

жорсткість трубопроводу на згин:  $E$  - модуль Юнга матеріалу труби;  $D$ ,  $d$  - зовнішній та внутрішній діаметри трубопроводу;  $x$ ,  $y$  - координати;  $v_0$  - швидкість руху ґрунту відносно трубопроводу.

Величини максимального прогину  $f$  трубопроводу та  $M_0$ ,  $P$ ,  $w_0$ ,  $q$  є невідомими. Визначивши в результаті розв'язку задачі ці параметри, розраховуємо максимальні напруження, які діють в трубопроводі. У результаті зсуву та просідання ґрунту трубопровід змінить своє положення від прямої лінії  $A_1A_3$  довжиною  $L$  на криву з максимальним відхиленням від початкового положення в довільній точці  $A_j$  з координатами  $x_j$  та  $y_j$  (рис. 2).

Задачу встановлення максимального прогину трубопроводу вирішимо через визначення координати максимального прогину  $A_j(x_j, y_j)$  трубопроводу.

Для цього по довжині трубопроводу встановлюється кілька ємнісних первинних перетворювачів на однакових віддалях, наприклад,  $L/2$ .

Після зміни положення трубопроводу, ємнісні первинні перетворювачі в точках контролю  $A_1-A_3$  змінять свій кут нахилу відносно початкового положення на кути  $\alpha_1 - \alpha_3$  і, відповідно, ємність.

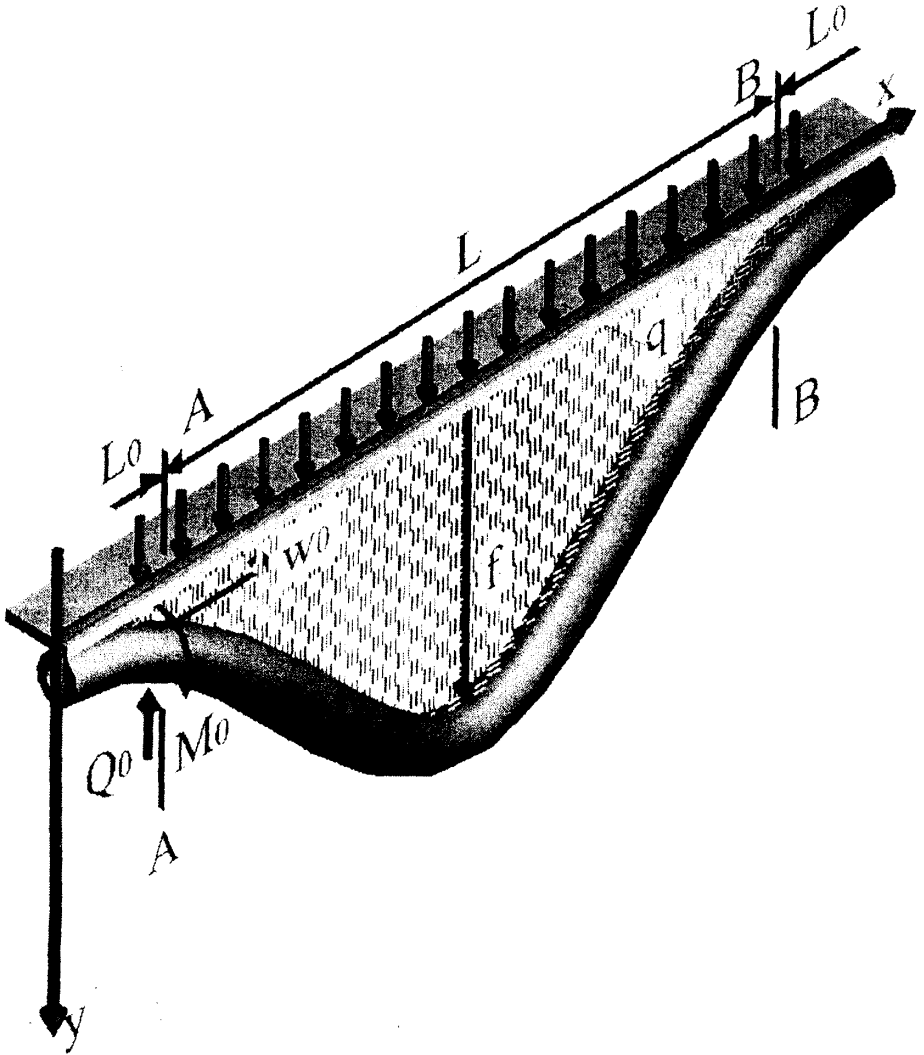
У геометричній інтерпретації, тангенс кута нахилу кривої дорівнює значенню похідної в даній точці, або кутовому коефіцієнту  $k_n$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_n = y'(x_n) = k_n, \quad (2)$$

що дозволяє скористатись методом половинного поділу відрізка для виявлення тієї половини, на якій знаходиться мінімум. Для цього аналізуємо вибрані три точки  $A_1-A_3$ . Якщо в середній точці  $A_2$  кутовий коефіцієнт рівний нулю, то в цій точці є мінімум. В загальному, будемо розглядати випадок коли  $k_2 \neq 0$ . Тоді

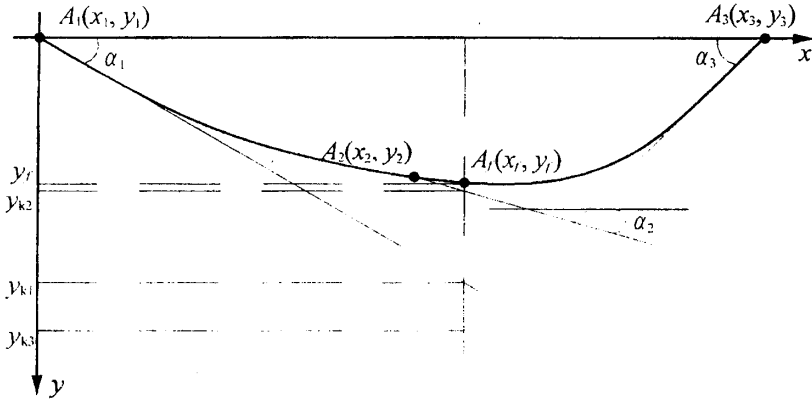


розглядаємо ту половину відрізка  $A_1-A_3$ , де кутові коефіцієнти мають різні знаки, а відрізок з однаковими знаками відкидаємо (наприклад  $A_1-A_2$ , а залишається відрізок  $A_2-A_3$ ).



$Q_0$  – поперечна сила;  $A-A$ ,  $B-B$  – перерізи трубопроводу,  $M_0$  – згинний момент в перерізах  $A-A$  та  $B-B$ ,  $q$  – інтенсивність розподіленого навантаження ґрунту;  $x$ ,  $y$  – координати;  $L_0$  – прилегла ділянка до зони зсуву ґрунту;  $L$  – ділянка зсуву ґрунту;  $w_0$  – прогин трубопроводу;  $f$  – максимальний прогин трубопроводу.

Рис. 1. Схематична модель трубопроводу зовнішнього ґрунту.



$A_1(x_1, y_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2)$ ,  $A_3(x_3, y_3)$  – точки встановлення ємнісних первинних перетворювачів з відповідними координатами;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – кути нахилу трубопроводу в точках контролю;  $A_f$  – точка максимального прогину трубопроводу;  $y_{k1}$ ,  $y_{k2}$ ,  $y_{k3}$ ,  $y_{kf}$  – кутові коефіцієнти дотичних до трубопроводу відповідно в точках контролю та в точці максимального прогину

Рис. 2. Визначення найбільшого прогину

З подібності трикутників (рис. 3) визначимо координату  $x_f$ :

$$x_f = \frac{k_1 \cdot L}{2(k_1 + k_2)} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot L}{2(\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2)} \quad (3)$$

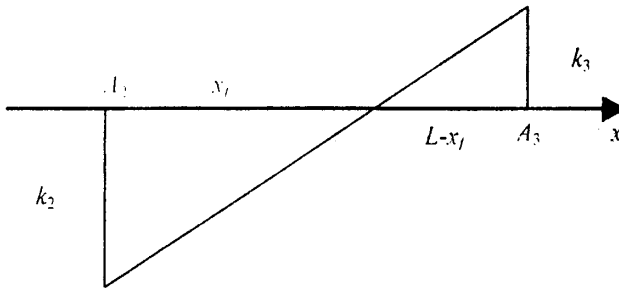


Рис. 3. Подібність трикутників

Для визначення координати  $y_f$  найбільшого прогину будемо параболу через три точки контролю. Для цього з точок  $A_1$  і  $A_3$  проводимо дотичні з відомими кутівими коефіцієнтами, рівняння яких будуть:

$$y_{A1} = k_1 x_{A1} + C_{A1}, \quad y_{A3} = k_3 x_{A3} + C_{A3}, \quad (4)$$

де постійні  $C_{A1}$ , та  $C_{A3}$  знаходяться шляхом підстановки в рівняння(4) координат точок  $A_1(0, 0)$ ,  $A_3(L, 0)$  відповідно.

Визначаємо  $y_{k1}$  та  $y_{k3}$  - точки перетину дотичних із прямою на відстані  $x_j$  шляхом підстановки  $x_j$  у рівняння (4), вибираємо з них більшу за значенням:

$$y_{kj} = \max(y_{k1}, y_{k3}), \quad (5)$$

оскільки вона буде найближчою до шуканої точки  $y_j$ .

Через точки  $A_1(x_1, y_1)$ ,  $A_{12}(x_j, y_{kj})$ ,  $A_3(x_3, y_3)$  проводимо параболу:

$$y_j = ax_{\min}^2 + bx_{\min} + c, \quad (6)$$

де коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  визначаємо за допомогою методу Крамера:

Для визначення решти невідомих змінних вважаємо, що найнебезпечніший період для міцності трубопроводу настає тоді, коли швидкість поперечного руху труби у всіх перерізах рівна нулю, що відповідає рівномірному тиску по всій довжині контакту трубопровід-грунт.

Максимальний прогин трубопроводу визначається із рівняння:

$$f = y_j = \left( \frac{M_0}{P} + \frac{q}{k^2 P} \right) \left[ \frac{1 - ch(k \cdot x_j)}{ch(k \cdot x_j)} \right] + w_0 + \frac{q x_j^2}{4P}, \quad (7)$$

$$\text{де } k^2 = \frac{P}{EI_2}$$

Величину інтенсивності розподіленого навантаження ґрунту на трубопровід:

$$q = \frac{P(y_j - w_0) - M_0 \gamma}{\gamma x_j^2 + \frac{k^2}{4}}, \quad (8)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{1 - ch(k \cdot x_j^2)}{ch(k \cdot x_j^2)}$$

Для визначення невідомих  $w_0$ ,  $M_0$  розглянемо задачу про згин трубопроводу в пружному середовищі, навантаженому на кінці поперечною силою  $Q = q \cdot x_j$  та моментом  $M_0$ .

Одержимо рівняння для знаходження моменту  $M_0$ :

$$M_0 = \frac{\left( \frac{x_j}{P} - \frac{\alpha^2 L}{k_0 D_n} - \frac{1}{kP} th(k \cdot x_j) \right) q}{\frac{4\alpha^3}{k_0 D_n} + \frac{k}{P} th(k \cdot x_j)}, \quad (9)$$

де  $\alpha$  - параметр коефіцієнта нормального опору ґрунту,  $k_0$  - коефіцієнт опору ґрунту.

Значення невідомої повздовжньої сили  $P$  знайдемо через визначення величини видовження ділянки  $L$ .

$$P = \frac{EF(\pi^2 y_f^2 - u_{cr} 4L)}{4L \left( L + \frac{2k_u}{\beta} \operatorname{th}(\beta \cdot L) \right)}, \quad (10)$$

де  $u_{cr}$  – поздовжнє переміщення за рахунок “слабини” ділянки  $L$ ,  $\beta$  - параметр коефіцієнта постелі ґрунту при зсуві,  $k_u$  - коефіцієнт постелі ґрунту при зсуві,  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Таким чином, значення напруження трубопроводу буде рівним:

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{W_m} + \frac{P}{F}, \quad (11)$$

$$W_m = \frac{\pi D^3}{32} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right)$$

де  $W_m$  - осьовий момент опору перерізу труби.

На основі розробленої моделі зроблена оцінка напружень по довжині трубопроводу в залежності від величини його прогину внаслідок дії ґрунтів (рис. 4). побудовані таблиці напружень від значення максимального прогину в визначених точках спостереження. Представлені результати числових експериментів по визначенню моменту та поперечної сили від довжини ділянки зсуву ґрунту та прогину трубопроводу.

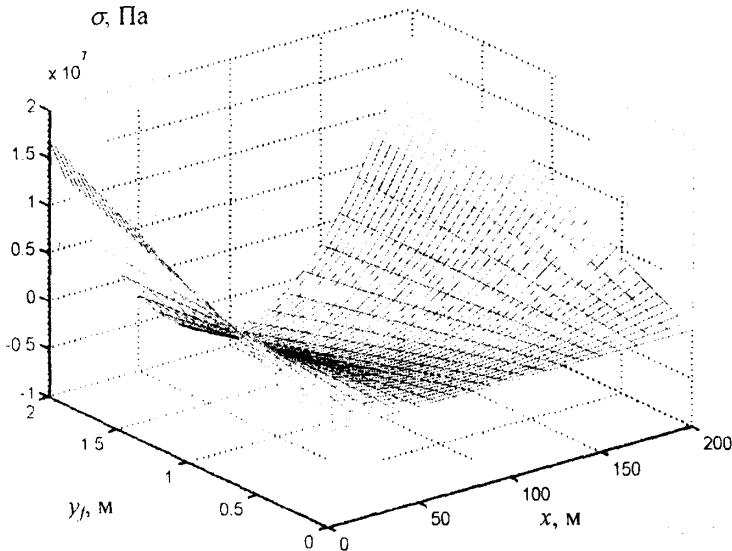


Рис. 4. Розподіл нормального напруження по довжині трубопроводу від значення прогину

У третьому розділі описано гідродинамічна система спостережень (ГДСС), яка розроблена на основі математичних залежностей і служить для вимірювання змішень 30 контрольованих точок об'єкту контролю і використана для спостережень в реальному масштабі часу за зміною положення інженерних споруд, деформацією газопроводів, а також просіданням фундаментів технологічного обладнання з дистанційною передачею даних.

Дана система дає можливість спостерігати:

- за окремим об'єктом системи мережі;
- за всією системою мережі.

На відміну від аналогів даної системи, які дають можливість визначати просторове положення окремого об'єкту контролю тільки через контроль всієї мережі, запропонована система може автономно використовуватися для окремого об'єкту контролю та для всієї мережі.

Перевагою даної вимірювальної системи є те, що вона не потребує визначення просторових змін об'єкту через складні обчислення як простого, так і просторового кута. У даній системі контролю не потрібно вибирати реперну точку, відносно якої знаходиться зміна положення контрольованих об'єктів, що важливо в місцях зсувів ґрунтів. Так як функції реперного перетворювача відіграє кварцовий генератор, а його частота порівнюється із частотою коливальних контурів, складовою яких є ємнісні перетворювачі установлені в точках спостереження.

Відмінністю запропонованої системи є те, що первинні перетворювачі можуть використовуватися для визначення перевищення кута і напрямку цього кута, як з'єднувальні посудини гідроводу, так і їх частина або окремий перетворювач. Система призначена для контролю величин переміщень контрольованих об'єктів у вертикальній площині з визначенням напрямку кута зміни в горизонтальній площині. Дана вимірювальна система представляє собою сукупність первинних перетворювачів і вторинного пристрою, які пов'язані з мікроЕОМ. Мікропроцесорний пристрій побудований на мікроЕОМ серії AT89C55. Первинні перетворювачі в вигляді посудин з електродами, зануреними в рідину, служать елементом коливального контуру як змінна ємність, внаслідок чого змінюється частота коливального контуру. Найбільший вплив на перетворення і чутливість пристрою відіграє вхідна ланка підсилювача сигналу, яка повинна мати великий вхідний опір і малі шуми. Такими характеристиками володіє розроблена схема з використанням транзистора КП350А.

Інформація про зміну параметрів контрольованих об'єктів поступає на диспетчерській пункт з обчислювальним комплексом для обробки і візуалізації результатів контролю в реальному масштабі часу. Розроблено ємнісний первинний перетворювач.

Для збільшення температурного діапазону роботи ємнісного перетворювача в якості рідини використовуємо суміш води та спирту з  $\epsilon_p = 66,3$ .

Рівняння зміненої ємності після нахилу посудини буде рівним:

$$\Delta C = C_{\text{емн.к}} - C_{\text{емн.0}}$$

де  $C_{атм\alpha}$ ,  $C_{атм0}$  – ємності первинного перетворювача відповідно нахиленого та не нахиленого.

Встановлено, що максимальна зміна висоти рідини нахиленої посудини у буде:

$$y' = \frac{\Delta C \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{R}\right)}{\pi \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_n)} \quad (12)$$

де  $d$  – відстань між пластинами конденсатора;  $R$  – радіус електроду;  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність;  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_n$  – діелектричні проникності відповідно рідини та повітря.

Кут нахилу посудини становить:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y'}{d} = \frac{\Delta C \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{R}\right)}{d \pi \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_n)} \quad (13)$$

Таким чином, отримано однозначну залежність між вимірюваною зміною та тангенсом кута нахилу посудини.

Для пластин, що розташовані на протилежній стороні посудини, визначимо аналогічним способом тангенс кута нахилу в залежності від зміни висоти рідини посудини і відповідно зміни ємності:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{y'}{d} = \frac{\Delta C_2 \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{R}\right)}{d \pi \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_n - \varepsilon_p)} \quad (14)$$

Як видно, з рис. 5 ( $\operatorname{tg} \alpha_1 = -\operatorname{tg} \alpha_2$ ), можна визначити подвійний тангенс кута нахилу посудини, що дозволяє збільшити чутливість вимірювань у два рази:  $2\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2$ . Для запропонованих перетворювачів вибираємо робочу частоту сигналу генераторів 3 КГц, а чистота кварцового генератора в реперній точці становить з 10 МГц зі смугою пропускання 0,1 КГц.

Сумарна похибка розробленого пристрою буде рівною:

$$\delta_{\text{сум}} = \delta_{\text{мет}} + \delta_{\text{інст}} = 5,1\% \quad (15)$$

У четвертому розділі описано випробування і градування гідродинамічної системи спостережень на лабораторному стенді для визначення просторового положення трубопроводу шляхом вимірювання ємності та зменшення систематичних складових похибки кожного з вимірювальних каналів обробки інформації. Для цього градуємо шкалу за допомогою порівняння зміни показників пристрою від кута нахилу первинного перетворювача в горизонтальній площині. Для оцінки точності пристрій обробки інформації ГДСС градувався в лабораторних умовах з використанням двох посудин №1, 2, наповнених неелектропровідною рідиною і з'єднаних між собою за допомогою гнучких шлангів. Для імітації згину сталюого трубопроводу в лабораторному

стенді використовувалася пластина довжиною 300 мм, яка закріплена горизонтально і жорстко з обох боків до вертикальної площини.

Після включення генератора кварцової частоти, пристрою обробки інформації ГДСС до первинних перетворювачів на цифровому табло одержимо значення ємності перетворювача, яке відповідатиме значенню зміни кута нахилу імітатора трубопроводу. Градування кожного з вимірювальних каналів пристрою обробки інформації ГДСС здійснюється при заданій частоті кварцового генератора. Отримані результати градування на лабораторному стенді відповідають показникам ємності перетворювача при встановленні посудини на досліджуваній ділянці діючого газопроводу (рис. 5). Це пов'язано з тим, що ємність перетворювача градується в залежності від кута нахилу ділянки трубопроводу, а не від його геометричних розмірів. Тому одержаний результат градування коригуємо використовуючи аналітичні залежності з врахуванням геометричних обмежень у математичній моделі.

Значення електричних параметрів еквівалентної схеми первинного перетворювача будуть: індуктивність  $3 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_1=1$  Ом,  $R_2=0.1$  Ом.

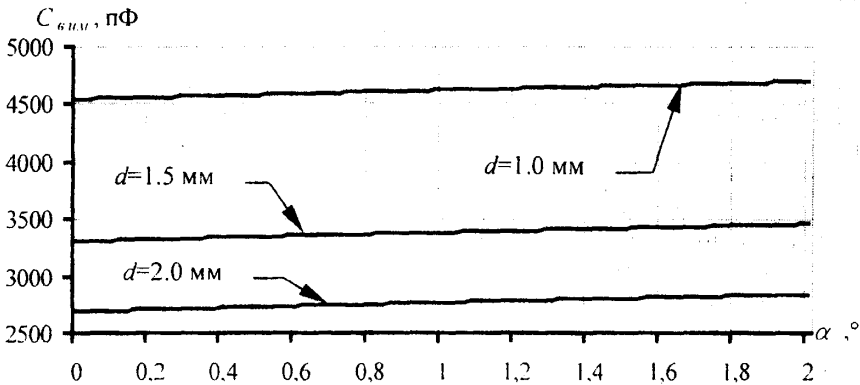


Рис. 5. Залежність вимірної ємності від кута нахилу посудини при різних відстанях між пластинами

У п'ятому розділі описана практична реалізація результатів наукових досліджень в умовах Краснопопівського підземного сховища газу, яка здійснювалася на чотирьох технологічних вузлах протягом трьох років.

Розв'язання практичних задач контролю включає в себе:

- аналіз об'єкту контролю з метою визначення небезпечних ділянок газопроводів і технологічних вузлів;

- практичну реалізацію технології контролю, яка включає вибір конкретних первинних перетворювачів, їх градування, вибір інтервалу і черговості опитування об'єкту контролю;

- підготовка експерименту (підготовка поверхонь технологічних вузлів для установа первинних перетворювачів, їх кріплення)

- проведення експерименту і отримання вихідної інформації при імітуванні;

- обробка інформації і отримання результатів.  
 Результати вимірювання висотних зміщень розробленою системою показано на рис. 6.

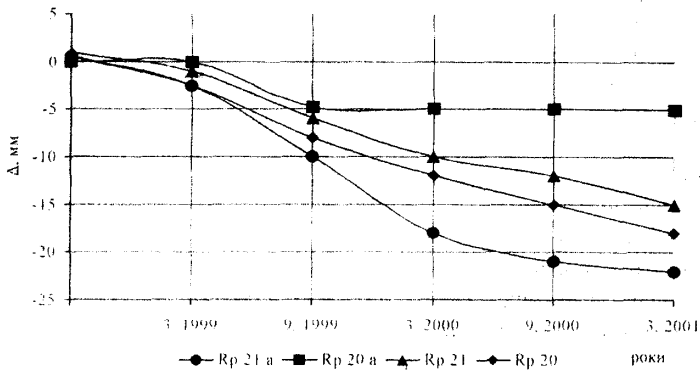


Рис. 6 Вимірювання зміни висотних зміщень реперів розробленою системою

### ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення наукової задачі, яка включає розробку нового методу та пристрою контролю технічного стану технологічного обладнання. Проведений аналіз відомих методів і засобів контролю технічного стану технологічних вузлів і газопровідної мережі підземних сховищ газу, як в науковому, так і в прикладному аспектах. Вказані недоліки цих методів і показано, що з їх використанням можна визначити окремі параметри технологічного обладнання ПСГ, але результати контролю не дають цілісного відображення технічного стану система підземного зберігання газу. В результаті аналізу визначені особливості впливу технологічних і експлуатаційних чинників на зміну проектних параметрів технологічного обладнання ПСГ в умовах Донецького басейну. На основі аналізу сформульовані невирішені задачі.

2. Розроблений метод визначення відносного кута нахилу технологічних об'єктів ПСГ в реальному масштабі часу, що дозволив вперше з більш високою точністю визначати величину, напрямок і динаміку переміщень для ідентифікації небезпечних ділянок газових мереж. У процесі експлуатації технологічні трубопроводи і вузли СПЗГ змінюють своє просторове положення відносно проектного внаслідок деформаційних процесів, дії ґрунтових мас. Оскільки вся система взаємопов'язана технологічним процесом, то вплив зміни параметрів одних вузлів на інші має безпосереднє значення. Тому повна інформація про зміну експлуатаційних параметрів окремих об'єктів, так і всієї системи зберігання газу в реальному масштабі часу дає можливість ідентифікувати чинники впливу і джерела виникнення додаткових навантажень.

3. Розроблена структурна схема конструкція і програмне забезпечення гідродинамічної системи спостережень за просторовою зміною положення фундаментів технологічних вузлів і газопроводів ПСГ у реальному масштабі часу і оцінена її точність, яка реалізує запропоновану методику контролю



технічного стану технологічних вузлів і споруд системи підземного зберігання газу, яка дає можливість без наявності реперної точки вести спостереження, як за окремим об'єктом, так і за всією системою мережі, що має важливе значення в умовах зсувів ґрунтів в місцях спостереження. Порівняльна характеристика роботи гідродинамічної системи спостережень з геодезичними методами дає переваги, які полягають в можливості постійного спостереження за зміною положення трубопроводу, нерівномірним просіданням фундаментів і т.п. в будь-який період часу з одержанням і обробкою результатів, і передачею їх на диспетчерський пункт. Це дає можливість визначати закономірності змін параметрів контролю технічного стану технологічних вузлів і споруд системи підземного зберігання газу в реальному масштабі часу, оперативно впливати в випадку їх зміни і своєчасно приймати попереджувальні рішення. З даної системи отриманий патент державного департаменту інтелектуальної власності України (УКРПАТЕНТ).

4. Розроблена фізико-математична модель взаємодії підземного трубопроводу з ґрунтовими масивами при утворенні в них тріщин і відповідно зсувів з ідентифікацією факторів, дало можливість визначити вперше їх ступінь впливу на зміну положення трубопроводу в активній зоні зсуву. Зокрема, в результаті дії навантажень із-за зсувів ґрунтів виникає розтягуюча сила, яка приводить до збільшення поздовжніх напружень в трубопроводі, які викликані особливостями впливу чинників зумовлених особливостями Донецького басейну.

5. Отримана аналітична залежність, яка пов'язує параметри тиску, температури газу при відборі його із ПСГ з відповідним значенням напруження в підземних трубопроводах для визначення реального технічного стану трубопроводів, що враховує дію, як окремих складових, так і сумарних навантажень, які приводять до додаткових напружень і зміни експлуатаційних параметрів технологічних вузлів.

6. Розроблена математична модель визначення координат максимального прогину підземного трубопроводу дає можливість визначити величину і напрямок дії на нього зовнішніх зусиль. На основі виведених аналітичних співвідношень, які пов'язують первинні параметри контролю отриманих гідродинамічної системою спостережень, з максимальним прогином трубопроводів, вперше дало можливість визначити розподіл деформацій в трубопроводах, їх максимальну величину, що вирішує проблему оцінки допустимих напружень і попередження аварійних ситуацій з тяжкими наслідками.

7. Розвинутий метод визначення НДС підземних та надземних трубопроводів через визначення зміни їх геометричних координат з метою моніторингу технічного стану, так як зміна експлуатаційних параметрів технологічних вузлів досліджувалася в комплексі з системою газопроводів, яка викликана, насамперед, залишковими напруженнями при виготовлення труб, при проведенні зварювально-монтажних робіт, абразивним зносом стінки труби від піску і глиняних включень під час відбору газу зі свердловини на дільниці "свердловина – пункт очищення газу".

8. Випробовування розробленого методу і гідродинамічної системи спостережень в лабораторних умовах і натурних дослідженнях технологічного обладнання на базі Краснопопівського підземного сховища газу Донецького басейну дало можливість визначити технічний стан шлейфів газових свердловин, а також трубопроводів гребінки. В результаті досліджень були визначені окремі ділянки трубопроводів, які не відповідають експлуатаційним нормам, встановлено нерівномірне просідання фундаментів під сепараторами газу, вказані причини тріщин на фасадах технологічних приміщень та проведені ремонтні роботи із заміни трубопроводів гребінки і окремих шлейфів. Результати натурних досліджень технічного стану трубопроводів, які піддалися заміні, підтвердив достовірність отриманих результатів на основі використання розробленої методики і системи контролю. Матеріали дисертаційної роботи можна рекомендувати для впровадження в нафтогазовій промисловості, а також для інших суміжних галузей.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВИКЛАДЕНИЙ В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ**

1. Ніколаєв О. В. Системи контролю технічного стану газової мережі Краснопопівського підземного сховища газу // Методи та прилади контролю якості. – 2002. - № 8. – С. 26-29.
2. Ніколаєв О. В., Лютак З. П. Визначення кута прогину трубопроводів в експлуатаційних умовах ємнісним методом // Методи та прилади контролю якості. – 2002. - № 9. – С. 26-29.
3. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Пристрій для контролю технічного стану газопровідних систем в експлуатаційних умовах // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. - № 37. – Т. 6 – С. 166-170.
4. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Метод визначення напруженого стану магістральних трубопроводних конструкцій // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". - № 1. - 2001. - С. 185-186.
5. Ніколаєв О. В. Визначення експлуатаційних факторів напружено-деформованого стану трубопроводів підземних сховищ газу // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. - № 38. – Т. 8 – С. 181-184.
6. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Метод визначення напруженого стану магістральних трубопроводних конструкцій // Тези доп. на VIII наук.-техн. конф. "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" Збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП, 2001. – С. 380-383.
7. Ніколаєв О. В. Визначення напружень трубопроводів через величину їх максимального прогину // Тези доп. на 3 Міжнарод. наук.-техн. конф. і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання". – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2002. - С. 65-66.

8. Ніколаєв О. В. Розробка апаратного комплексу для контролю технічного стану підземних сховищ газу // Тези доп. на наук.-техн. конф. "Приладобудування 2002: підсумки і перспективи". - Київ, 2002.- С. 126-127.
9. Лютак І. З., Ніколаєв О. В. Прилад для контролю напружено-деформованого стану газопроводів ультразвуковим методом // Тези доп. на 7 Міжнарод. наук.-практ. конф. "Нафта і газ України 2002".- Київ, 2002. – С. 32-33.
10. Лютак І. З., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Аналіз матеріалів п'єзоелемента ультразвукового первинного перетворювача // Тези доп. на наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу університету. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2002.- С. 130-131.
11. Пат. 55634 А. G01C5/04, G01C9/22. Пристрій для визначення відносної зміни висоти і кута нахилу об'єктів / О. В. Ніколаєв, З. П. Лютак, Г. Г. Мельниченко - № 2002021615, Заявл. 27.02.2003 Опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4.
12. Пат. 55616 А. G01B17/02. Пристрій для ультразвукового контролю товщини стінок труб / З. П. Лютак, І. Я. Трошенко, І. Б. Мельник, О. В. Ніколаєв, З. А. Берник - № 2001129246, Заявл. 29.12.2001 Опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4.

## АНОТАЦІЯ

**Ніколаєв О. В. Розробка методики та пристрою контролю параметрів технічного стану технологічних об'єктів підземних сховищ газу в умовах Донецького басейну. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ. 2003.

Робота присвячена питанням контролю технічного стану технологічного обладнання підземних сховищ газу в умовах Донецького басейну. В зв'язку з цим проведено пошук та аналіз відомих методів та технічних засобів, показано їх недоліки та обгрунтовано недоцільність їх використання в умовах Донецького басейну. Для вирішення поставленої задачі було розроблено методику та систему контролю технічного стану емнісним методом. Розроблена система дає можливість контролювати кут прогину трубопроводів та відносне просідання технологічних об'єктів підземного сховища газу. На основі даних розробленої системи запропонована методика дає можливість контролювати величину розподілу напружень в трубопроводах, визначати місце максимальних напружень.

Розроблено емнісний первинний перетворювач в якому враховано особливості його експлуатації в групах до 30 шт. розподілених на значних відстанях. Особливу увагу приділено питанню роботи первинного перетворювача при різних температурах, що мають місце на протязі цілого року.

Проведено метрологічний аналіз розробленої системи та первинного перетворювача.

Проведено лабораторні та натурні дослідження розробленої системи.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ємнісний метод, підземне сховище газу.

## АННОТАЦИЯ

**Николаев А. В. Разработка методики и устройства контроля параметров технического состояния технологических объектов подземных хранилищ газа в условиях Донецкого бассейна. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля та определение состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, 2003.

Работа посвящена вопросам контроля технического состояния технологического оборудования подземных хранилищ газа в условиях Донецкого бассейна. Приведен анализ причин возникновения изменения параметров исследуемых технологических узлов, классифицированы факторы влияния. Показана необходимость разработки новых методов и средств контроля для определения технического состояния технологических объектов подземного хранилища газа. В связи с этим проведено поиск и анализ известных методов и приборов, показано их недостатки и доказано, что они не могут быть использованы в условиях Донецкого бассейна. Для решения поставленной задачи рассмотрены теоретико-экспериментальные предпосылки создания методики контроля.

Была разработана методика и система контролю технического состояния технологического оборудования с применением емкостного метода. Использование предложенной методики контроля технического состояния технологического оборудования дает возможность определить параметры трубопроводов и оборудования в эксплуатационных условиях. На основе предложенной методики разработана система, которая дает возможность контролировать значение распределенных деформаций в трубопроводах, определять местонахождение максимальных напряжений. Разработанная система дает возможность контролировать угол прогиба трубопроводов и относительное проседание технологических объектов подземного хранилища газа в реальном масштабе времени.

Разработан емкостный первичный преобразователь, в котором учтено особенности его эксплуатации в группах до 30 шт. распределенных на значительных расстояниях. Особенное внимание уделено вопросу эксплуатации первичного преобразователя при разных температурах, которые имеют место на протяжении года.

Проведен метрологический анализ разработанной системы и первичного преобразователя.

Проведено лабораторные и натурные исследования разработанной методики и системы. Натурные исследования проводились на протяжении трех лет на технологических узлах Краснопоповского подземного хранилища газа

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, емкостный метод, подземное хранилище газа.

## ABSTRACTS

Nicolayev O. V. Working out method and device for testing parameters of technical state of underground storage facility in conditions of basin of Donets. – Manuscript.

The thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Engineering Sciences by speciality 05.11.13 - Methods and Devices of Testing and Defining Matter Composition. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2003.

The work is devoted questions of technical state testing of underground storage facility in conditions of basin of Donets. In connection with it an analysis and an information retrieval of known methods and devices were performed. Their disadvantages were shown and variance of their involvement in condition of basin of Donets was proved. To solve the problem put by a method and a device was worked out for technical state testing by capacitance method. The worked out device gave an opportunity to test a caving in angle of pipelines and relative surface subsidence of technological objects of underground storage facility. On the given results from the worked out device the proposal method gives the opportunity to test a value of distribution of mode of deformation and to define a place of maximum value.

A capacitance transducer worked out. Conditions of it exploitation in groups till 30 items and its distribution in large distances were took into account. A special attention was devoted to question of exploitation of transducer in different temperatures which happens during whole year.

Metrological analysis of worked out device and transducer were performed.

Laboratory and full scale investigation of worked out device were performed.

Keywords: the mode of deformation, the capacitance method, underground storage facility.