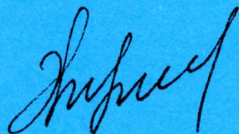


622.691.4(043)

3-33

Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу

**ЗАПУХЛЯК ВАСИЛЬ БОГДАНОВИЧ**



УДК 622.691.4 (10

3-33

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ З  
РЕКОНСТРУКЦІЇ І РЕМОНТУ ТРУБОПРОВОДІВ**

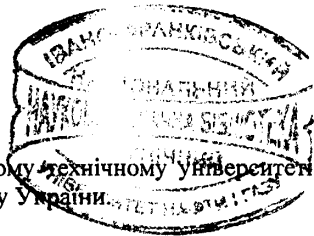
Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

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

м.Івано-Франківськ - 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту 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.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Капцов Іван Іванович,**  
Український науково-дослідний інститут природних газів (УкрНДІгаз), провідний науковий співробітник;

кандидат технічних наук, доцент  
**Костів Василь Васильович,**  
Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз» ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України», заступник директора.

Захист відбудеться 24 лютого 2011 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий "21" січня 2011 р.

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

Л.Д. Пилипів



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Газотранспортний комплекс України на даний час знаходиться на етапі формування єдиної газотранспортної системи, яка включає ряд газотранспортних систем і магістральних газопроводів, з'єднаних перемичками, що утворюють закільцьовану мережу. Створення і розвиток газотранспортної мережі немислимі без приєднання газопроводів-відводів до газотранспортних магістралей. Прогресивними в плані розвитку газотранспортної мережі вважаються методи врізання в діючий газопровід без зупинки перекачування і стравлювання тиску. В такому випадку досягається не тільки значний виграш у часі проведення технологічної операції, але й економія енергоресурсів і зменшення рівня забруднення атмосфери.

Крім того, старіння магістральних газонафтопроводів призводить до зростання частоти відновлювальних та профілактичних ремонтів лінійної частини, які доцільно проводити без зупинки перекачування продукту. Локалізація місця проведення ремонту на лінійній частині вимагає застосування спеціальних механічних пристроїв, що рухаються в потоці продукту до місця дефекту і зупиняється стопорним пристроєм, який врізається в трубопровід під тиском.

З метою проведення реконструкції і розвитку газонафтогазотранспортних систем, а також для проведення ремонтів лінійної частини без зупинки перекачування продукту виникає необхідність у створенні техніки і технології безвогневого врізання в діючі трубопроводи під тиском.

Слід зауважити, що процес врізання в діючий трубопровід під тиском є незвичайно складним і небезпечним. Для його практичної реалізації необхідно створити не тільки якісне обладнання, але й прогресивну технологію. Тому необхідні наукові дослідження в першу чергу теплових процесів в трубопроводі, викликаних зварювальною дугою, а також термопружності трубопровідної сталі, що обумовлює актуальність проблеми.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота носить прикладний характер і виконана в рамках держбюджетної теми «Підвищення ефективності експлуатації трубопровідних систем та оцінка їх реального стану», яка входить до Національної програми *«Нафта і газ України до 2015 року»*

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є встановлення закономірностей формування теплових полів в стінці трубопроводу під тиском та термопружності трубною сталі при реалізації способу безвогневого врізання.

Вказана мета досягається через реалізацію наступних задач:

1. Створення безпечної та надійної техніки і технології безвогневого врізання в діючий трубопровід.
2. Дослідження формування температурного поля в стінці трубопроводу при дії рухомої зварювальної дуги як джерела тепла.
3. Дослідження зміни механічних властивостей трубних сталей при високих температурах.
4. Визначення напружено-деформованого стану стінки труби при дії високої температури і внутрішнього тиску.

## 5. Практична апробація запропонованого методу і технологій.

*Об'єкт дослідження:* лінійна частина магістральних газопроводів і розгалужених мереж.

*Предмет дослідження:* процеси в трубопроводі, що проходять при реалізації безвогневого методу врізання.

*Методи досліджень:* теоретичні методи досліджень нестационарних температурних полів в стінці трубопроводу, викликаних дією рухомого точкового джерела, експериментальні дослідження залежностей механічних властивостей трубних сталей від температури, аналітичні методи оцінки міцності трубних сталей при дії високих температур і внутрішнього тиску, методи апробації результатів досліджень.

**Положення, що виносяться на захист.** Закономірності формування температурного поля в стінці трубопроводу, викликаного коловим рухом зварювальної дуги при реалізації запропонованого методу безвогневого врізання в трубопровід, та вплив температур на фізико-механічні властивості трубної сталі.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що вперше:

одержано закономірності формування температурного поля в стінці трубопроводу при дії точкового джерела тепла, що здійснює рух по колу;

на основі експериментальних досліджень встановлено залежності механічних властивостей трубних сталей від температури;

встановлено закономірності напружено-деформованого стану стінки труби при дії високої температури і внутрішнього тиску;

проведено апробацію запропонованого методу і розробленої технології безвогневого врізання в промислових умовах.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що запропонована нова конструкція і розроблена технологія безвогневого врізання в діючий газонафтопровід під тиском, яка пройшла промислові випробування і характеризується високою надійністю і безпечністю проведення робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Запропоновано нову конструкцію пристрою для безвогневого врізання в діючий трубопровід під тиском [2, 4, 7].

Побудовано математичну модель і проведено аналітичні дослідження формування температурного поля в стінці трубопроводу при дії точкового джерела тепла, що здійснює рух по колу [3, 5, 6].

Проведено експериментальні дослідження, на основі яких встановлено залежності механічних властивостей трубних сталей від температури [1].

Виконано аналітичні дослідження, на основі яких встановлено закономірності напружено-деформованого стану стінки труби при дії високої температури і внутрішнього тиску [1].

Автор брав безпосередню участь у розробці методики безвогневого врізання в діючий газопровід і практичній її реалізації в промислових умовах.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в доповідях і повідомленнях на:

- П'ятій міжнародній науково-технічній конференції "Надійність і безпека магістрального трубопроводного транспорту" (Білорусія, м. Новополоцк, 2006);

- Шостій міжнародній науково-технічній конференції “Надійність і безпека магістрального трубопровідного транспорту” (Білорусія, м. Новополоцьк, 2007);
- Міжнародна науково-технічна конференція “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці” “ІФНТУНГ-40” (м. Івано-Франківськ, 2007);
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених “Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії” (м. Івано-Франківськ, 2008);
- Всеукраїнська науково-практична конференція “Вісник науковця - 2009” (м. Миколаїв, 2009)
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених “Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи” (м. Івано-Франківськ, 2009);
- Науково-практична конференція “Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовки кадрів галузі” (м. Івано-Франківськ, 2010).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідалися на наукових семінарах кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтоховищ та факультету нафтогазопроводів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. (Івано-Франківськ, 2010)

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 7 наукових праць, з них 4 у фахових виданнях ВАК, одна одноосібна.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 112 посилань, та додатків. Текст роботи викладено на 138 сторінках комп’ютерного набору, містить 43 рисунки і 16 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність роботи, висвітлено наукове і практичне значення отриманих результатів. Наведена інформація про апробацію роботи, її впровадження, розкритий особистий внесок автора і вказана кількість публікацій.

**У першому розділі** проведений аналіз методів ремонту і реконструкції діючих газонафтопроводів, техніки і технологій, що застосовуються при цьому, а також конкретизація задач досліджень.

У структурі газопроводів суттєво переважають трубопроводи великого діаметру. Так, газопроводи діаметром 1420 мм складають 15,82 %, діаметром 1020–1220 мм – 23,34 %; 720–820 мм – 14,93 %.

Водночас газотранспортна система (ГТС) має у своєму складі 59,43 % газопроводів з терміном експлуатації від 15 до 50 років, 5,8 тис. км газопроводів відпрацювали свій амортизаційний строк – 33 роки, більше третини газопроводів мають антикорозійне покриття з полімерних плівок холодного нанесення. Це вимагає щорічного виконання значних обсягів капітального ремонту та реконструкції газопроводів.

Серед газотранспортних магістралей України 17,27 % експлуатуються вже понад 33 роки, а 13,66 % до вказаної границі залишилось менше 10 років. Отже,

30,33 % загальної протяжності газопроводів вимагають невідкладних заходів не тільки для підвищення експлуатаційної надійності, але й забезпечення живучості.

Розвинута газотранспортна система України не вимагає на даний час збільшення її пропускної здатності шляхом будівництва нових газових магістралей. Основною проблемою є підвищення надійності існуючих газопроводів шляхом їх оптимального обслуговування та реконструкції. Тому в останні роки об'єктами капітального будівництва в газотранспортному комплексі є переважно розподільчі газопроводи, які характеризуються порівнянно невеликими діаметром та довжиною.

Створення і розвиток такої газотранспортної мережі неможливе без врзання споруджених газопроводів-відводів та міжниткових перемичок в діючі магістралі. Тому розвиток газотранспортної системи вимагає створення досконалих і безпечних технологій врзання в діючі газопроводи під тиском та розробки обладнання для їх реалізації.

Нафтотранспортна система України знаходиться в експлуатації ВАТ "Укртранснафта", включає в себе 18 нафтопроводів діаметром до 1220 мм включно, загальною довжиною нафтопроводів 4569,4 км в одну нитку, 51 нафтоперекачувальну станцію (НПС), 11 резервуарних парків з 80 резервуарами загальною ємністю 1010 тис. куб. метрів, системи електропостачання, захисту від корозії, телемеханіки, технологічного зв'язку, протипожежні споруди. Роботу НПС забезпечують 176 насосних агрегатів, загальною потужністю електродвигунів 356,9 тис. кВт. Існуюча система нафтопроводів знаходиться в експлуатації в середньому від 20 до 42 років, в залежності від терміну вводу в дію її складових. За час експлуатації значна частина магістральних нафтопроводів і технологічного обладнання вичерпала свій ресурс. Вказані терміни експлуатації нафтопроводів та об'єктів нафтотранспортної системи вимагають вкладення значних коштів для підвищення надійності і підтримки їх в технічному справному стані. Підвищення надійності експлуатації і обслуговування об'єктів нафтопроводів для забезпечення нормального безаварійного функціонування нафтопровідної системи досягається за рахунок постійного виконання комплексу робіт, основними з яких є виконання планово-попереджувальних ремонтів обладнання об'єктів магістральних нафтопроводів.

Значний термін експлуатації магістральних газонафтопроводів обумовлює зростання частоти відмов на лінійній частині, що призводить до зростання частоти проведення ремонтів.

Проведення робіт з реконструкції газонафтотранспортних систем і створення єдиної транспортної мережі вимагає врзань в діючі магістральні газонафтопроводи, що знаходяться під тиском. Крім того, проведення ремонтних робіт на трубопроводах без зупинки перекачування продукту вимагає також безогневого врзання в діючий газонафтопровід під тиском. Тому до досконалості і безпечності способів безогневого врзання в діючі газонафтопроводи ставляться особливі вимоги. В зв'язку із сказаним важливою науковою задачею є створення безпечної і надійної системи безогневого врзання в діючий газонафтопровід під тиском.

На даний час розроблено і широко використовується на практиці велика кількість різних конструкцій систем і пристроїв врзання в діючий трубопровід під

тиском, однак неоліком кожної з них є невисока надійність за рахунок складності герметизації ліній підведення енергії до двигуна.

Сама система та обладнання не вирішують технічної задачі безпечного безвогневого врізання в діючий трубопровід. Необхідна технологія врізання, що базується на науково обгрунтованих положеннях, до яких в першу чергу слід віднести задачу створення нестационарного температурного поля в тілі труби під дією зварювальної дуги як джерела тепла. З вказаною задачею нерозривно зв'язана задача термопружності, тобто характеристика напружено-деформованого стану стінки труби під впливом температурного поля та внутрішнього тиску в трубопроводі.

Високі значення температур матеріалу стінки труби призведуть до тимчасової зміни механічних властивостей трубної сталі, від яких в кінцевому рахунку залежить міцність магістрального трубопроводу в процесі проведення безвогневого врізання. Тому важливою науковою задачею є дослідження впливу температури на механічні властивості трубної сталі.

Проведений комплекс наукових досліджень дозволить створити нову техніку і технологію безпечного і надійного проведення процесу безвогневого врізання в діючі газонафтопроводи під тиском.

У другому розділі приведені результати вдосконалення технології врізання в діючий трубопровід та дослідження теплових ефектів в стінці діючого трубопроводу при цьому.

Задача, що ставилась при створенні винаходу – вдосконалення пристрою для безвогневого врізання відводу в діючий трубопровід, з метою уникнення аварійних ситуацій у процесі різання, шляхом створення магнітного поля з зовнішньої сторони циліндричного корпусу навколо ротора, розміщеного на шпинделі, що забезпечить надійну та безперебійну роботу пристрою, при герметичності місця врізання та ріжучого інструменту.

Дана задача вирішується тим, що в пристрої для безвогневого врізання в діючий трубопровід (рис. 1), який містить патрубок з фланцем і засувкою, циліндричний корпус, в якому розміщено шпиндель з кільцевою фрезою, центруючий пристрій та поршень, над яким корпус частково заповнений в'язкою рідиною, виконаний з можливістю переміщення вздовж осі корпусу, який у верхній частині оснащений кришкою для заливу в'язкої рідини, краном для закачування робочого агента, отвором з пробкою, яка з'єднана з поршнем за допомогою троса для випуску в'язкої рідини та робочого агента, а у нижній частині – двома кранами для продувки пристрою інертним газом, згідно з винаходом додатково введено ротор, встановлений на шпинделі, і статор, розміщений з зовнішньої сторони корпусу, ділянка якого в місці розміщення ротора і статора виконана із пластмаси.

Розміщення статора з зовнішньої сторони герметичного циліндричного корпусу дозволяє безперервно подавати до нього струм від джерела живлення, що забезпечує безперебійне обертання ротора, розміщеного в середині корпусу на шпинделі, за рахунок впливу на нього сил магнітного поля, а разом з тим і безперервну роботу пристрою, а також дозволяє керувати процесом врізання із зовні.

Виконання частини герметичного циліндричного корпусу, в місці розміщення ротора і статора, з пластмаси не перешкоджає впливу магнітного поля статора на ротор, тобто не створює своєрідного екрану між ними, при цьому така конструкція забезпечує герметичність місця врізання.

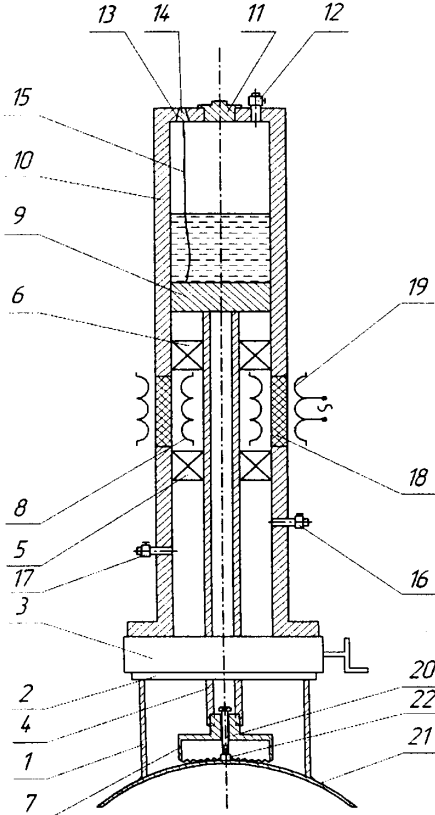


Рис. 1. Пристрій для безогневого врізання відводу в трубопровід

Даний пристрій найбільше підходить для виконання безогневого врізання в трубопроводі будь-якого призначення, оскільки він забезпечує безаварійність проведення робіт при герметичності місця врізання та ріжучого інструменту.

При врізанні виникає необхідність застосування дугового зварювання на діючому газопроводі, що має свої особливості, які вимагають нових технологічних рішень.

Для забезпечення безаварійності зварювальних робіт при врізанні у діючий газопровід слід вирішити такі завдання:

1) збереження несучої здатності трубопроводу, який перебуває під тиском, в процесі приварювання до нього патрубку з фланцем;



2) визначення допустимої довжини зони розігрівання стінки трубопроводу в процесі зварювання в кільцевому напрямі.

Для вирішення цих завдань необхідно встановити закономірності розповсюдження тепла від зварювальної дуги в тілі труби з врахуванням розсіювання тепла. Для цього слід вивести рівняння теплопровідності безмежної тонкої пластинки з рухомим джерелом тепла, що рухається по колу.

Застосовуючи оперативний метод для нестационарних задач теплопровідності тонких пластинок в комплексі з методом усереднення температури по товщині пластинки, використано систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \Delta \Delta T - \left[ \frac{\partial T}{\partial \tau} - \alpha_+(T - t_+^c) - \alpha_-(T^* - t_-^c) \right] &= -w, \\ \Delta \Delta T^* - C \frac{\partial T^*}{\partial \tau} - 3 \left[ \left( \alpha_+ + \frac{4}{R} \right) T^* - \alpha_+ t_-^c - \alpha_-(T - t_+^c) \right] &= -w^*, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\Lambda = 2\lambda\delta$ ,  $C = 2C_V\delta$ ,  $R = \frac{2\delta}{\lambda}$ ,  $\alpha_{\pm} = \alpha^+ \pm \alpha^-$ ,  $t_{\pm}^c = 0,5(t_+^c \pm t_-^c)$ ;

$\lambda$ ,  $C_V$  – коефіцієнти теплопровідності і теплоємності матеріалу пластинки;

$\Delta$  – оператор Лапласа;  $T$  і  $T^*$  – інтегральні характеристики температури пластинки;  $t$  – температурне поле пластинки.

Задача при однорідних граничних умовах розв'язувалася методом інтегральних перетворень, і в результаті отримано результат в полярних координатах

$$\begin{aligned} T = \sum_{n=0}^{\infty} \{ &a \cos n(\varphi - \omega\tau) \int_0^{\infty} \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\ &- n\omega \sin n(\varphi - \omega\tau) \int_0^{\infty} \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\ &- e^{-a\kappa^2\tau} [a \cos n\varphi \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp - \\ &- n\omega \sin n\varphi \int_0^{\infty} \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp] \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результати реалізації математичної моделі для умов реального процесу врізання патрубку в діючий газопровід при заданій інтенсивності зварювальної дуги, як рухомого теплового джерела і відомих інтенсивностях внутрішнього і зовнішнього теплообміну у вигляді графіків приведено на рис. 2 та 3.

Аналіз одержаних графічних залежностей показує, що нагрівання трубопроводу рухомим джерелом тепла відбувається локально в околі діючого джерела. Нагрівання трубопроводу до температури до 200 °C займає значну площу поверхні труби в межах від 449 см<sup>2</sup> до 668 см<sup>2</sup> в залежності від параметрів процесу. Однак, такий нагрів особливої небезпеки для міцності трубопроводу не представляє. Більш суттєвий вплив на механічні характеристики сталі представляє збільшення температури понад 200 °C. Тому для оцінки міри впливу рухомого джерела тепла на механічні характеристики трубної сталі як функції-відгуку вибрано максимальну температуру нагріву трубопроводу  $T_{max}$  та площу поверхні трубопроводу  $\omega$ , на якій температура перевищує 200 °C.

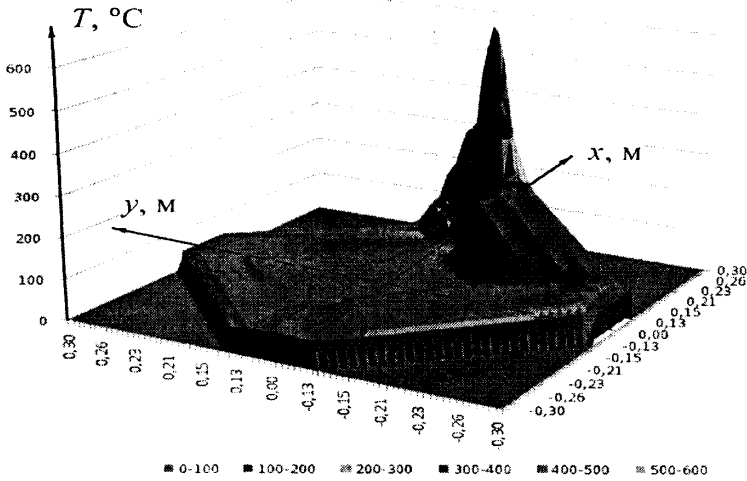


Рис. 2. Розподіл температури в стінці трубопроводу під час приварювання патрубка-відводу в момент часу 600 с

На основі математичного моделювання нестационарного процесу розповсюдження тепла в стінці труби при коловому русі джерела тепла з постійною швидкістю встановлено, що при збільшенні швидкості руху зварювальної дуги в 5 разів величина максимальної відносної температури складе  $\bar{T} = 0,795$ , а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , становить  $\bar{\omega} = 0,897$ . Збільшення швидкості руху зварювальної дуги в 10 разів призводить до зменшення відносної максимальної температури до величини  $\bar{T} = 0,621$ , а відносної площі поверхні, на якій температура перевищує  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  – до  $\bar{\omega} = 0,788$ . Зменшення теплової інтенсивності зварювальної дуги, що рухається по колу з сталою швидкістю, як теплового джерела на 80%, призводить до зниження максимальної відносної температури до  $\bar{T} = 0,815$ , а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при цьому становить  $\bar{\omega} = 0,917$ . При зниженні інтенсивності теплового джерела на 50% спостерігається зменшення максимальної відносної температури до  $\bar{T} = 0,815$ , а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зменшується при цьому до  $\bar{\omega} = 0,8017$ . Отже, в реальних умовах зварювання швидкість руху теплового джерела по колу в більшій мірі впливає на максимальну температуру процесу і відносну площу поверхні, на якій температура перевищує  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , які є критеріями безпеки процесу.

Крім того, аналіз впливу положення джерела тепла показує, що температура стінки труби суттєво відрізняється від початкової при значеннях радіуса від  $r = 0,23\text{ м}$  до  $r = 0,29\text{ м}$ , тобто на відстані (3-4) см від периметру патрубка, що

приварюється. В зазначеній області температура міняється від 150 до 630 °С, в залежності від положення дуги.

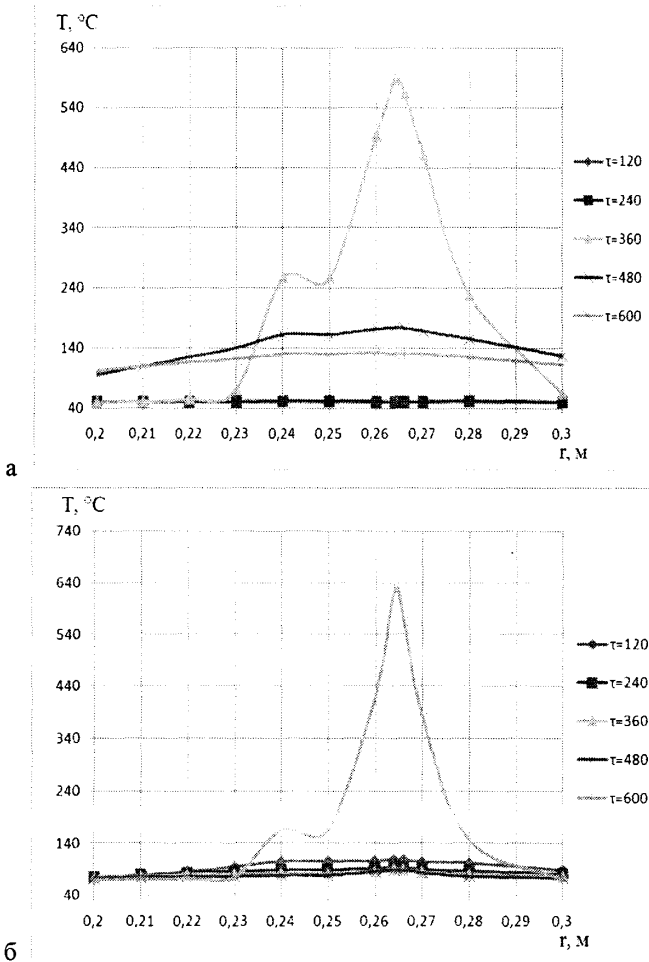


Рис. 3. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубок від радіусу  $r$  для різних значень часу  $\tau$  при куті повороту  $\varphi=210^{\circ}$ (а) і  $\varphi=360^{\circ}$ (б)

Оскільки, механічні властивості сталей суттєво змінюються при нагріванні їх до температури вище 200 $^{\circ}\text{C}$ , то можна стверджувати, що визначення властивостей трубних сталей дослідним шляхом достатньо проводити в діапазоні температур (100-800) $^{\circ}\text{C}$ .

**Третій розділ** присвячений експериментальним дослідженням механічних властивостей трубних сталей при високих температурах.

Дослідження проводились на експериментальному стенді АИМА-ТС 1, призначеному для випробовування міцнісних властивостей металів та сталей на розрив. Мікропроцесорна система управління машиною і реєстрації силових і температурних параметрів випробування проводить обробку результатів випробувань, передачу на комп'ютер із спеціальним програмним забезпеченням всієї отриманої інформації і забезпечує:

- збір і обробку сигналів датчиків положення системи важеля, переміщення активного утримувача, з виведенням отриманої інформації про результати випробування на рідкокристалічний сенсорний дисплей;
- вибір режимів випробування в діалоговому режимі;
- управління процесом випробування за вибраним режимом;
- скидання інформації на носій (флеш-пам'ять).

Під час проведення досліджень були використані взірці циліндричної форми довжиною  $l_0 = 100$  мм і діаметром  $d = 10$  мм (рис. 4), які були виготовлені із трубної сталі 14Г2АФ та 17ГС.

Метою проведення досліджень було встановлення залежності механічних властивостей трубних сталей (межі пропорційності, модуля пружності, тимчасового опору) від температури.

Взірець, що знаходиться в нагрівальному пристрої і нагрітий до заданої температури, після встановленого часу витримки піддають випробуванню.

Тривалість нагрівання взірця до температури випробування і час витримки при цій температурі вказується в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

Проведення випробувань проводилось на машині АИМА-ТС 1 для різних значень температури. Результати випробувань і всі необхідні заміри на розірваному взірцеві фіксувались у протоколі, і на основі одержаних даних, було проведено розрахунок межі текучості, тимчасового опору та модуля пружності трубних сталей 14Г2АФ і 17ГС для різних значень температури в діапазоні ((20-900)°С) та побудовано відповідні залежності, які показано на рис. 5 та 6.



Рис. 4. Циліндричний взірець після випробування

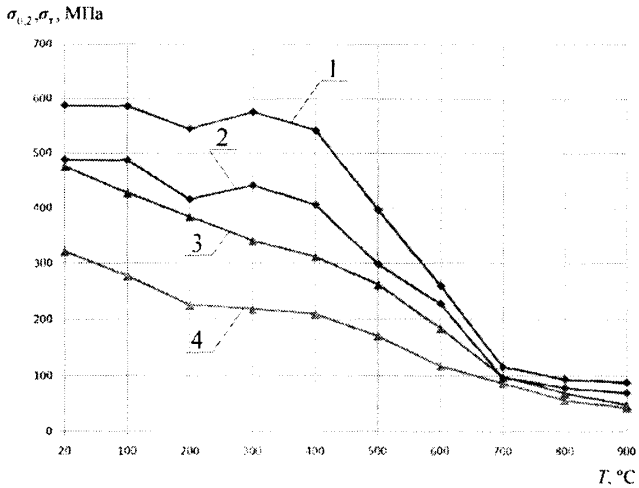


Рис. 5. Залежність межі текучості та тимчасового опору від температури:  
1,2 – відповідно, тимчасовий опір сталі 14Г2АФ та 17ГС;  
3,4 – відповідно, межа текучості для сталі 14Г2АФ та 17ГС.

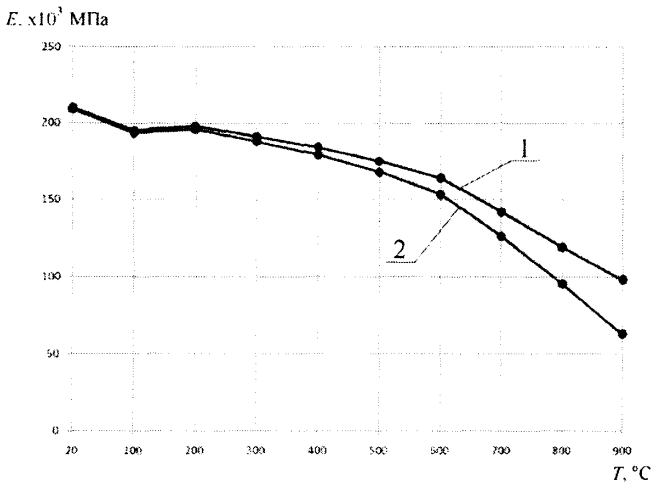


Рис. 6. Залежність модуля пружності від температури:  
1 – для сталі 14Г2АФ; 2 – для сталі 17ГС

Тимчасовий опір для сталі 14Г2АФ в діапазоні зміни температур (20-200)°С змінюється незначно на величину 7,1%. Для сталі 17ГС зміна тимчасового опору в цьому діапазоні температур більш суттєва і складає 11,7%. В подальшому діа-

пазоні зміни температур (200-400)°С зменшення тимчасового опору для сталі 14Г2АФ складає 5,9%, а для сталі 17ГС – 8,1%. Таким чином, в діапазоні зміни температур (20-400)°С зменшення величини тимчасового опору несуттєве для обидвох марок сталі.

Межа плинності для сталі 14Г2АФ в діапазоні зміни температур (20-200)°С змінюється на величину 17,1%, а в подальшому діапазоні зміни температур (200-400)°С ця величина складає 8,4%. Для сталі 17ГС зміна межі плинності в діапазоні температур (20-400)°С більш суттєва і складає 14,8%.

В подальшому діапазоні зміни температур (400-600)°С зменшення тимчасового опору для сталі 14Г2Ф складає 34,5%, а для сталі 17ГС – 23,7%. Межа плинності у вказаному діапазоні температур змінюється для сталі 14Г2АФ на 30,0%, а для сталі 17ГС – на 34,8%. Таким чином, в діапазоні зміни температур (400-600)°С зменшення величини тимчасового опору і межі плинності суттєве для обидвох марок сталі.

В діапазоні зміни температур (600-900)°С зменшення тимчасового опору для сталі 14Г2АФ складає 24,5%, а для сталі 17ГС – 18,8%. Межа плинності у вказаному діапазоні температур змінюється для сталі 14Г2АФ на 21,0%, а для сталі 17ГС – на 14,8%. Таким чином, в діапазоні зміни температур (600-900)°С зменшення величини тимчасового опору і межі плинності дещо сповільнюється в порівнянні з попереднім діапазоном.

Залежність модуля пружності від температури має більш складний характер. Спочатку в діапазоні температур (20-200)°С спостерігається незначне зростання модуля пружності для сталі 14Г2АФ на величину 1,5%, а для сталі 17ГС – на величину 0,5%, яке пояснюється виникненням в матеріалі додаткових стискаючих напружень при нагріванні. В подальшому при зростанні температури темп зменшення модуля пружності постійно зростає. Так, в діапазоні температур (200-400)°С зменшення модуля пружності для сталі 14Г2АФ складає 3,6%, а для сталі 17ГС – 4,7%, в діапазоні температур (400-600)°С зменшення модуля пружності для сталі 14Г2АФ складає 6,3%, а для сталі 17ГС – 8,9%, в діапазоні температур (600-900)°С зменшення модуля пружності для сталі 14Г2АФ складає 30,9%, а для сталі 17ГС – 50,6%.

З приведених залежностей встановлено, що в діапазоні зміни температур (20-450)°С межа плинності сталей практично не змінюється, а в подальшому починає різко зменшуватися і при температурі 900 °С складає близько (20-30)% від початкового значення. Модуль пружності в діапазоні температур (0-259)°С зростає на величину до 15 %, а в подальшому зменшується і при температурі 900°С складає близько (10-20)% початкового значення.

**Четвертий розділ** присвячений встановленню умов використання запропонованої технології врізання в діючий трубопровід на практиці, зокрема визначенню допустимого тиску в трубопроводі при реалізації способу безвогневого врізання.

Місцеве нагрівання трубопроводу здійснюється зварювальною дугою як джерелом тепла у ході проведення ремонтних робіт на лінійній частині. При цьому знижуються всі механічні властивості трубною сталі, що може призвести до

втрати пружності матеріалу. Якщо ремонтні роботи проводити без припинення перекачування продукту, то, з одного боку, рух продукту в трубопроводі приведе до охолодження стінки труби і зменшить температуру нагрівання, а з іншого – виникає небезпека руйнування трубопроводу від дії внутрішнього тиску. Тому проведення вогневих робіт на діючому трубопроводі завжди передбачає зниження внутрішнього тиску. За даними досліджень ІЕЗ ім. Патона величина тиску в трубопроводі під час проведення зварювальних робіт не повинна перевищувати 1,5 МПа незалежно від товщини стінки труби і марки сталі.

Об'єднуючи результати розподілу температур по поверхні труби і залежності механічних характеристик сталі від температури, можна побудувати розподіл механічних характеристик (модуля пружності і межі плинності) по поверхні труби. Такі залежності зображені на рисунку 7.

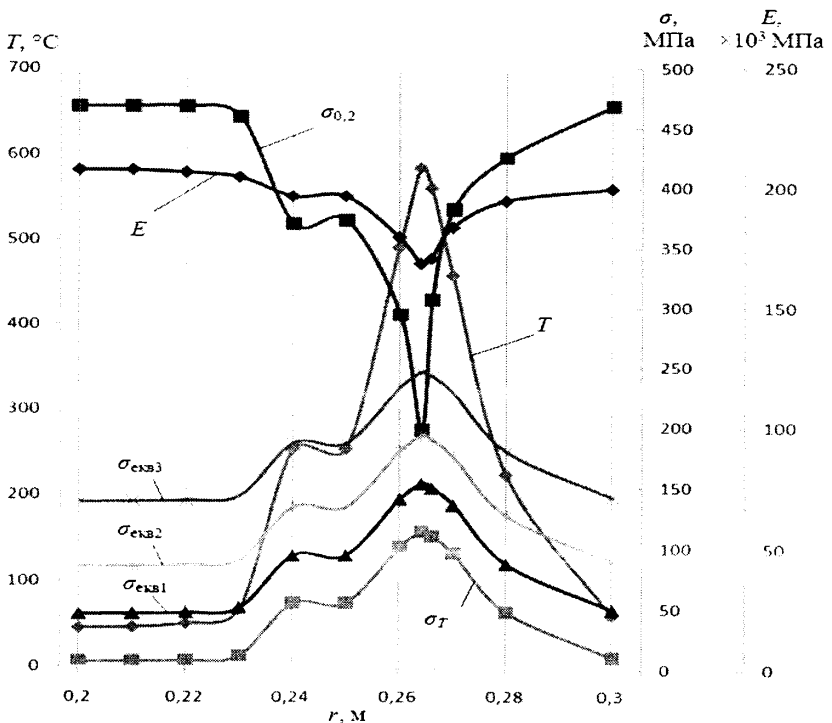


Рис. 7. Розподіл напружень в стінці труби та залежність механічних властивостей сталі 14Г2АФ від температури:

$\sigma_{\text{екв}1}$  – сумарні еквівалентні напруження в стінці труби при  $p = 1,5$  МПа;  $\sigma_{\text{екв}2}$  – те ж при  $p = 3$  МПа;  $\sigma_{\text{екв}3}$  – те ж при  $p = 5$  МПа

Використовуючи залежність модуля пружності по поверхні труби від температури, можна знайти стискаючі температурні напруження в стінці, а також напруження від внутрішнього тиску в трубопроводі, які не залежать від температурного впливу. Еквівалентні напруження від дії внутрішнього тиску і температурного поля можуть бути визначені шляхом сумування.

Таким чином, можна побудувати розподіл еквівалентних напружень в стінці трубопроводу по поверхні труби в залежності від внутрішнього тиску.

Якщо екстремальні еквівалентні напруження в стінці труби не перевищуватимуть межі плинності трубною сталі за максимальної температури, то матеріал працюватиме в межах пружності і руйнування не відбудеться. Таким чином, можна вибрати критичний тиск в трубопроводі, перевищення якого призведе до плинності трубною сталі і можливої при цьому аварії.

На рис. 7 зображені криві розподілу еквівалентних напружень в стінці труби із сталі 14Г2АФ і зміну напружень межі плинності цієї сталі від температури. Аналіз графіків свідчить, що, враховуючи запас міцності, можна прийняти допустимий тиск в газопроводі не вище 3 МПа.

Розробку техніки та технології для реалізації запропонованого методу виконання врізання в діючий газопровід проводилось на основі розробленої комплексної галузевої методики "Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання".

Впровадження запропонованого методу безогневого врізання здійснено при підключенні відводу діаметром 108 мм до ГРС "Вознесенівка Друга" до перемички діаметром 529 мм між газопроводами Шебелинка-Дніпропетровськ-Кривий Ріг-Ізмаїл (ШДКРІ) та Роздільна-Ізмаїл (РІ)

17 вересня 2008 року о 9 год. 20 хв. розпочалися роботи безпосередньо з проведення безогневого врізання в діючий газопровід з приварення патрубку діаметром 108x8 мм і довжиною 150 мм, підготовка якого була проведена попередньо.

Перед початком проведення процесу безогневого врізання в діючий газопровід під тиском було проведено тестові випробування пристрою, котрі полягали у перевірці режиму роботи насоса-дозатора, який вłączався в роботу і при створенні розрахункового тиску на поршень 0,115 МПа переключався на роботу по байпасній лінії, та перевірку електродвигуна фрези на холостому ході. Розрахунковий тиск на поршень вибирався з умови створення номінального паспортного навантаження на фрезу в 0,85 кН. Після досягнення вказаного тиску відкривався клапан байпасної лінії, і насос-дозатор працював по замкнутому контуру. Загальна перевірка працездатності системи склала 14 хв. і закінчилася о 13 год. 03 хв.

Безпосередньо по закінченні тестування системи почалося врізання в діючий газопровід під тиском 3,0 МПа. На протязі двох хвилин піднімався тиск в циліндрі до розрахункової величини 0,115 МПа при працюючому електродвигуні фрези, що призводило до поступового зростання осьового навантаження на фрезу. О 13 год. 28 хв. тиск в циліндрі різко впав, що було свідченням закінчення процесу фрезування отвору в стінці трубопроводу. Майже миттєво відкрився клапан для стравлювання масла з циліндра в атмосферу, і відбулося автоматичне відключення.



чення насоса-дозатора. Процес випорожнення циліндра тривав близько хвилини, після чого відбулося закриття крану, стравлення тиску з системи і початок її демонтажу, який закінчився о 14 год. 44 хв.

Таким чином, після практичного застосування даного пристрою, можна зробити висновок, що винахід себе повністю виправдав і може бути застосований на діючих газопроводах з метою безпечного та безперебійного проведення врізання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у встановленні закономірностей формування теплових полів в стінці трубопроводу від дії зварювальної дуги як рухомого джерела тепла і встановлення термопружності трубної сталі при цьому, що дозволило розробити нову техніку і технологію безвогневого врізання в діючий трубопровід під тиском, а саме:

1. Встановлено на основі аналітичних досліджень на створеній математичній моделі формування нестационарного температурного поля в стінці трубопроводу, обумовленого коловим рухом зварювальної дуги як джерела тепла, що миттєві значення температур трубної сталі можуть перевищувати 600°C. Тривалість нагріву з наступним охолодженням і стабілізацією температури залежить від характеристик руху продукту в трубопроводі і коливається в межах (650–340) с.

2. На основі експериментальних досліджень побудовано залежності механічних характеристик трубних сталей 14Г2АФ та 17ГС від температури в діапазоні зміни температур (20–900)°С. Встановлено, що в діапазоні зміни температур (20–450)°С межа плинності сталей практично не змінюється, а в подальшому починає різко зменшуватися і при температурі 900°C складає близько (20-30)% від початкового значення. Модуль пружності в діапазоні температур (0–259)°С зростає на величину до 15 %, а в подальшому зменшується і при температурі 900°C складає близько (10-20)% початкового значення.

3. На основі аналізу напружено-деформованого стану стінки труби при дії температурних напружень і внутрішнього тиску в трубопроводі встановлено, що в залежності від товщини стінки труби і марки сталі пластичні деформації спостерігаються при внутрішньому тиску в діапазоні (3,5-4,5) МПа, що може призвести до порушення міцності трубопроводу.

4. На основі результатів проведених досліджень розроблено нову конструкцію пристрою для проведення робіт з безвогневого врізання в діючий трубопровід під тиском та технологію реалізації процесу врізання.

5. Результати досліджень, розроблена техніка і технологія пройшли промислову апробацію при проведенні безвогневого врізання патрубків-відводу в газопровід-перемичку між газопроводами Шебелинка-Дніпропетровськ-Кривий Ріг-Ізмаїл (ШДКРІ) та Роздільна-Ізмаїл (РІ) і показали високу ефективність способу. Результати виконаних розробок ввійшли в комплексну галузеву методику «Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання».

### Основний зміст роботи опубліковано в наступних працях:

1. Грудз В.Я. Дослідження термопружності трубних сталей при місцевому нагріванні трубопроводу / В.Я. Грудз, В.Б. Запухляк // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – №3(25). – С. 102-105.
2. Запухляк В.Б. Методи безвогневого врізання в діючі трубопроводи / В.Б. Запухляк, Т.П. Шиян, М.Д. Степ'юк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1(34). – С. 14-19.
3. Запухляк В.Б. Теоретичні дослідження температурних процесів під час приварювання патрубку до діючого трубопроводу / В.Б. Запухляк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №3(36). – С. 53-55.
4. Пат. 81332 А Україна, МПК F 16 L 41/00. Пристрій для безвогневого врізання відводу в діючий трубопровід / Грудз В.Я., Запухляк В.Б., Клов А.К. ; заявник і власник патенту ІФНТУНГ. – № а 2006 00802 ; заявл. 30.01.06 ; опубл. 25.12.07, Бюл. № 21. – 4 с.
5. Спосіб безвогневої врізки в діючі газопроводи : матеріали Всеукр. наук. – практ. конф. (Миколаїв, 2 квіт. 2009 р.). – Миколаїв : НУК ім. адмірала Макарова, 2009. – 288 с. – ISBN 978-966-321-099-5.
6. Математичне моделювання нестационарного процесу розповсюдження тепла в стінці трубопроводу викликаного рухомим джерелом : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених "Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії", Івано-Франківськ, 16-20 верес. 2008р. – Івано-Франківськ, 2008. – 46 с.
7. Проблемы безопасности врезки в действующий трубопровод : Материалы V международной научно-технической конференции "Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта", Новополоцк, 07-09 июня 2006 р. – Новополоцк, 2006. – 300 с. – ISBN 985-418-231-2.

### АНОТАЦІЯ

**Запухляк В.Б.** – Удосконалення техніки і технології проведення робіт з реконструкції і ремонту трубопроводів. - 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, 2011.

Дисертацію присвячено удосконаленню технічних засобів і технологій проведення безвогневого врізання в діючий газонафтопровід під тиском на етапах реконструкції та ремонту. Досліджено і проаналізовано процес формування температурного поля від колового руху зварювальної дуги як джерела тепла в стінці діючого трубопроводу. Проведені експериментальні дослідження залежності механічних характеристик трубних сталей від температури. На основі проведених

теоретичних і експериментальних досліджень розроблені рекомендації з удосконалення безогневого методу врзання в діючий трубопровід під тиском. Результати промислових випробувань підтверджують високу ефективність проведених досліджень і розробок. Створено і затверджено галузеву методику «Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання»

Ключові слова: трубопровід, врзання, температурне поле, механічні властивості трубних сталей, допустимий тиск.

## АННОТАЦИЯ

**Запухляк В.Б.** – Усовершенствование техники и технологии проведения работ по реконструкции и ремонту трубопроводов. - 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, 2011.

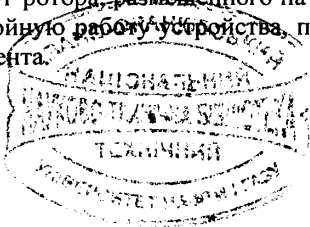
В диссертационной работе проведен анализ методов ремонта и реконструкции действующих газонефтепроводов, техники и технологий, которые применяются при этом.

Анализ существующих методов и устройств для ремонта газонефтепроводов без остановки перекачивания показывает, что в каждом случае для проведения локализации участка трубопровода с целью проведения ремонтных работ без остановки транспортировки продукта возникает необходимость врезки в действующий трубопровод под давлением.

На сегодня существует большое количество способов и технологий безогневой врезки в действующий трубопровод, суть которых сводится к предыдущему привариванию патрубка-отвода к действующей магистрали со следующим монтажом на нем технологического оборудования для фрезерного вырезания отверстия в стенке магистрального трубопровода во внутренней полости приваренного патрубка. Но приведенные способы и технологии не гарантируют полную безопасность и бесперебойность проведения фрезеровки отверстия в стенке магистрального трубопровода.

Диссертация посвящена усовершенствованию технических средств и технологий проведения безогневой врезки в действующий газонефтепровод под давлением на этапах реконструкции и ремонта.

Усовершенствовано устройство для безогневой врезки отвода в действующий трубопровод, с целью избегания аварийных ситуаций в процессе резания, путем создания магнитного поля с внешней стороны цилиндрического корпуса вокруг ротора, размещенного на шпинделе, который обеспечит надежную и бесперебойную работу устройства, при герметичности места врезки и режущего инструмента.



Исследован и проанализирован процесс формирования температурного поля от кругового движения сварочной дуги, как источника тепла в стенке действующего трубопровода.

Результаты реализации математической модели для условий реального процесса врезки патрубка в действующий газопровод при заданной интенсивности сварочной дуги, как подвижного теплового источника и известных интенсивностях внутреннего и внешнего теплообмена было подано в виде графиков. Анализ полученных графических зависимостей показывает, что нагревание трубопровода подвижным источником тепла происходит локально вблизи действующего источника. Было установлено, что определение свойств трубных сталей опытным путем достаточно проводить в диапазоне температур (100-800)°С.

Проведены экспериментальные исследования зависимости механических характеристик трубных сталей (предела пропорциональности, модуля упругости, временного сопротивления) от температуры.

Объединяя результаты распределения температур по поверхности трубы и зависимости механических характеристик стали от температуры, было построено распределение механических характеристик (модуля упругости и предела текучести) по поверхности трубы. Используя зависимость модуля упругости по поверхности трубы от температуры, были найдены сжимающие температурные напряжения в стенке, а также напряжение от внутреннего давления в трубопроводе. Эквивалентные напряжения от действия внутреннего давления и температурного поля были определены путем суммирования.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации из усовершенствования безогневого метода врезки в действующий трубопровод под давлением, а именно: установлены условия использования предложенной технологии врезки в действующий трубопровод на практике, определено допустимое давление в трубопроводе при реализации способа безогневой врезки.

Результаты промышленных испытаний подтверждают высокую эффективность проведенных исследований и разработок. Создана и утверждена отраслевая методика «Типовые расчеты показателей надежности систем газонефтеснабжения»

Ключевые слова: трубопровод, врезка, температурное поле, механические свойства трубных сталей, допустимое давление.

#### ANNOTATION

**Zapukhliak V.B.** – Improvement of Technique and Technology of Operation on Reconstruction and Pipeline Maintenance. – Manuscript.

The thesis has been written to get the scientific degree of the candidate of technical sciences major in 05.15.13 – Pipeline Transport, Oil-and-Gas Storages.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2011.

The thesis is devoted to the improvement of technical means and technologies of hot tapping into a running oil and gas pipeline under the pressure at the stages of reconstruction and maintenance. It is developed and analyzed the process of forming of temperature field from a circular motion of welding arc as a heat source in the wall of running pipeline. It is conducted the experimental research of mechanical characteristic dependence of pipe steel on temperature. On the basis of the conducted theoretical and experimental researches, the recommendation on the improvement of hot tapping into a running pipeline under the pressure is made. Industrial testing results confirm high effectiveness of the conducted research and developments. It is developed and approved an industrial strategy, named "Typical Calculations of the Reliability Index of Oil and Gas Supply Systems".

Key words: pipeline, hot tapping, temperature field, mechanical characteristic of pipe steel, allowable pressure.