

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

На правах рукопису

ЗАПУХЛЯК ВАСИЛЬ БОГДАНОВИЧ

УДК 622.691.4

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

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

*Всі примірники дисертації ідентичні
за змістом.
Вчений секретар спеціалізованої вченої
ради Д.С.ОСГ.04*

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук,
професор Грудз В.Я.

d 384

Івано-Франківськ – 2010

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ І КОНКРЕТИЗАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Тенденції розвитку газонафтотранспортної системи України	10
1.2 Сучасні методи ремонту газонафтопроводів	14
1.3 Методи врізання в трубопровід під тиском	24
1.4 Формування завдань досліджень	40
2 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВРІЗАННЯ В ДІЮЧИЙ ТРУБОПРОВІД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЕФЕКТІВ ПРИ ЦЬОМУ	42
2.1 Новий метод безвогневого врізання в трубопровід під тиском	43
2.2 Математичне моделювання розповсюдження тепла в тілі труби при приварюванні відводу	46
2.3 Реалізація математичної моделі	53
2.4 Результати розрахунків та їх аналіз	63
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	77
3.1 Експериментальний стенд і вимірювальна техніка	78
3.2 Методика проведення експериментів і обробки їх результатів	82
3.3 Результати досліджень та їх аналіз	98
4 УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗВОГНЕВОГО ВРІЗАННЯ В ДІЮЧИЙ ТРУБОПРОВІД НА ПРАКТИЦІ	103
4.1 Визначення допустимого тиску в трубопроводі при реалізації безвогневого врізання	103
4.2 Розробка техніки і технології для практичної	

	3
реалізації запропонованого методу	107
4.3 Результати реалізації запропонованого методу безвогневого врізання на газопроводах УМГ «Прикарпаттрансгаз»	121
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
ДОДАТКИ	139

ВСТУП

Україна, завдяки своєму географічному положенню, є основним транзитером нафти та газу до країн Європи. Трубопровідний транспорт України на сьогоднішній день є одним з найрозвинутіших в світі і забезпечує постачання енергоресурсів як споживачам України так і виконання контрактних зобов'язань з їх транзиту в країни Європи. В той же час технічний стан та ефективність функціонування трубопровідної системи, основні потужності якої було створено у 70–80-х роках минулого століття, не відповідають сучасним вимогам. Тому для забезпечення надійного її функціонування необхідно на відповідному рівні проводити обслуговування лінійної частини магістральних трубопроводів та своєчасно виконувати її ремонт.

На певних етапах проведення обслуговування і ремонту трубопровідних систем виникає необхідність застосування безвогневого врізання в діючі трубопроводи, зокрема: при необхідності під'єднання камер прийому та пуску очисних поршнів та під час ремонту трубопроводу із повною заміною тіла труби без зупинки транспортування продукту. Також безвогневе врізання ефективно застосовується з метою під'єднання трубопроводів-відводів під час розвитку трубопровідних систем.

Одним із прогресивних напрямків удосконалення обслуговування та ремонту трубопроводів є розробка методів врізання, які б забезпечували високу ефективність та екологічність проведення робіт. Однак успішне їх застосування неможливе без теоретичного та експериментального дослідження процесу приварювання патрубків-відводів до діючого трубопроводу.

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 вигравш 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 газонафтотранспортних 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 надзвичайно 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 трубної 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 [12].

Побудовано математичну модель і проведено аналітичні дослідження формування температурного поля в стінці трубопроводу при дії точкового джерела тепла, що здійснює рух по колу [6, 9, 15, 16].

Проведено експериментальні дослідження на основі яких встановлено залежності механічних властивостей трубних сталей від температури [4].

Виконано аналітичні дослідження, на основі яких встановлено закономірності напружено-деформованого стану стінки труби при дії високої температури і внутрішнього тиску [4].

Автор брав безпосередню участь у розробці методики безвогневого врізання в діючий газопровід і практичній її реалізації в промислових умовах [8].

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

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

- Шостій міжнародній науково-технічній конференції “Надійність і безпека магістрального трубопровідного транспорту” (Білорусія, м. Новополоцк, 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 газонафтосхових 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 посилання, та додатків. Текст роботи викладено на 138 сторінках комп’ютерного набору, містить 43 рисунки і 16 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ І КОНКРЕТИЗАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розвиток систем транспортування і розподілу нафти і газу у поєднанні з диверсифікацією джерел постачання вуглеводневої сировини в Україні вимагає постійної зміни конфігурації газонафтотранспортних комплексів. Забезпечення споживачів газом та нафтопродуктами немислиме без розвинутої трубопровідної системи, яка створюється і постійно видозмінюється методом нарощування. До діючих газотранспортних магістралей приєднуються газопроводи-відводи, призначені для подачі газу споживачам, в подальшому споруджуються газопроводи-відводи від відводів, що призводить в кінцевому рахунку до утворення розвинутої газотранспортної мережі.

Створення і розвиток газотранспортної мережі немислимі без приєднання газопроводів-відводів до газотранспортних магістралей. Тому експлуатація і розвиток газотранспортних мереж вимагають постійного приєднання шляхових відборів до існуючих трубопроводів.

На даний час розроблена велика кількість способів приєднання газопроводу-відводу до діючої магістралі. Однак ні один з них не можна вважати абсолютно досконалим і надійним. Найбільш прогресивними слід вважати безвогнєві методи врізання в діючий трубопровід під тиском, які не вимагають стравлювання газу з діючої магістралі в атмосферу, забезпечуючи економічність та екологічну чистоту способу. Однак, врізання в трубопровід під тиском є потенційно небезпечним процесом, тому вимагає досконалості технічних і технологічних рішень. В зв'язку із сказаним, розробка техніки і технології врізання газопроводів-відводів в магістраль під тиском є актуальною науково-технічною задачею, яка вимагає проведення наукових досліджень поведінки металу трубопроводів, що знаходяться під тиском, при дії високотемпературних полів, створюваних зварювальною дугою, та захисту середовища від можливих проявів вибухонебезпеки.

1.1. Тенденції розвитку газонафтотранспортної системи України

Газотранспортна система України включає понад 34 тис. км магістральних газопроводів і за протяжністю займає друге місце на планеті.

Пропускна здатність системи на вході — 278, а на виході — 178 млрд м³, зокрема 140 млрд. м³ до країн Центральної та Західної Європи і Туреччини. Ми маємо найбільші в Європі підземні газосховища активним об'ємом понад 32 млрд. м³, а встановлена потужність компресорних станцій сягає 5,4 млн. кВт. Резерв пропускної здатності вітчизняної газотранспортної системи — 20 млрд. м³, вона спроможна задовольнити на найближчу перспективу потреби країн Західної Європи у газі без будівництва обхідних газогонів. Стан української ГТС можна характеризувати як цілком надійний. Регулярно виконуються роботи щодо моніторингу лінійної частини газогонів із застосуванням сучасних технологій, відновлюються, за необхідності, її ділянки, ремонтується компресорне обладнання та замінюється на новіше.

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 % (рис. 1.1) [1, 10].

Водночас 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, більш 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 % газопроводів від загальної їх протяжності вимагають невідкладних заходів не тільки для підвищення експлуатаційної надійності, але й забезпечення живучості. [14]

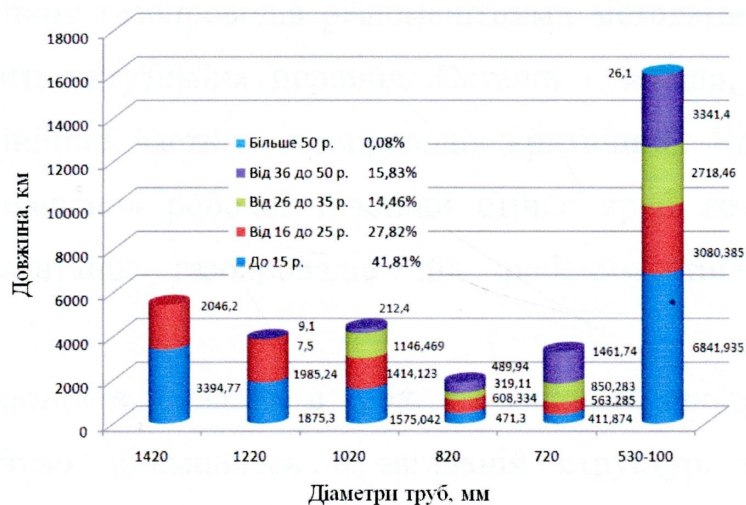


Рис. 1.1. Структура ГТС та термін експлуатації газопроводів відповідно за діаметрами і довжиною

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. Тенденції розвитку газотранспортної системи України подано в таблиці 1.1 [10, 14].

Таблиця 1.1.

Збільшення протяжності (в % від теперішнього стану) газотранспортної системи України по діаметрах труб (в мм)

Період	Ду1000-1400	Ду500-800	Ду200-400	Ду<200
1970-1980	58	6	16	21
1980-1990	19	68	9	4
1990-2000	15	24	37	23
2000-2005	8	2	38	52

Слід відзначити, що експлуатаційними службами проводяться роботи з діагностування стану газопроводів різноманітними методами, в тому числі з застосуванням інтелектуальних поршнів. Останні показали, що на окремих ділянках стан лінійної частини газопроводів критичний. Корозійні процеси призвели до зменшення робочої товщини стінки труб до такої міри, що подальша експлуатація газопроводів під робочим тиском є життєво небезпечною.

Аналіз показників, поданих в табл. 1.1 свідчить про те, що в останні десятиріччя суттєво збільшилась в загальній структурі газотранспортної системи частка газопроводів малого діаметру. Це є свідченням розвитку газотранспортного комплексу як єдиної мережі, яка характеризується широкою системою розподільчих газопроводів, за кільцьованих перемичками, що суттєво підвищує надійність поставок газу споживачам при виникненні аварійних ситуацій.

Створення і розвиток такої газотранспортної мережі немислимі без врізання споруджених газопроводів-відводів та міжниткових перемичок в діючі магістралі. Тому розвиток газотранспортної системи вимагає створення досконалих і безпечних технологій врізання 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, систем електропостачання, захисту від корозії, телемеханіки, технологічного зв'язку, протипожежні споруди. Роботу НПС забезпечують 176 насосних агрегатів, загальною потужністю електродвигунів 356,9 тис. кВт. Всі нафтопроводи Товариства знаходяться в технічно справному стані, паспортизовані, експлуатуються згідно діючих норм і правил, що забезпечує виконання контрактів на послуги з транспортування нафти транзитом та її поставки на

нафтопереробні заводи України. 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, неодноразово підлягала поточному та капітальному ремонтам і застаріла морально. 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.

Станом на 01.01.2008 р. загальна протяжність нафтопродуктопроводів складала 4470 км в однопіткєвому обчисленні і 4053 км по трасі. Трубопровідні системи характеризуються високим рівнем розгалуженості, доля простих і складних відводів в загальній протяжності складає 33%. Всі магістралі виконані в однопіткєвому виконанні, 27 % відводів збудовані в двопіткєвому виконанні. Максимальний діаметр вітчизняних нафтопродуктопродуктів складає 400 мм, більшість відводів має діаметр 100 мм і 150 мм. Перекачування нафтопродуктів здійснюють 18 перекачувальних станцій.

До нафтопродуктопроводів підключено 82 споживачі нафтопродуктів, в тому числі: 78 нафтобаз і роздавальних блоків (РБ); 2 теплоелектроцентралі, 1 нафтогавань, 1 хімічний комбінат. Темпи зростання протяжності будівництва вітчизняних нафтопродуктопроводів характеризує табл. 1.2 [10, 14].

Із табл. 1.2 випливає, що найбільші темпи розвитку системи нафтопродуктопроводів мали місце протягом 1986-1990 років. З 1991 року темпи будівництва нафтопродуктопроводів різко зменшились (майже в 5 разів) у порівнянні з попереднім періодом.

Динаміка розвитку нафтотранспортної системи України також підкреслює необхідність створення техніки і технології для безпечного врізання в діючі нафтопроводи під тиском.

Таблиця 1.2.

Темпи зростання протяжності нафтопродуктопроводів

Період	Протяжність, км	Середньорічне збільшення протяжності, км
1970 – 1980	1065	106
1981 – 1990	3277	221
1990 – 2008	3383	52

1.2. Сучасні методи ремонту газонафтопроводів

Регламентация методів ремонту газопроводів прийнятих у світовій практиці [111], складена вченими інституту Бателля і Едісонівського зварювального інституту (США) на основі аналізу норм і практики США, Канади, Англії та інших європейських країн. До основних методів ремонту, які застосовуються за межами нашої держави (табл. 1.3) відносяться:

- а) шліфування або наплавлення приповерхневих дефектів глибиною до 10-12% від товщини стінки;
- б) механічні зажими для усунення наскрізних дефектів;
- в) сталеві півмуфти і накладки у випадку, коли небезпека аварії невелика;
- г) зміцнюючі муфти типу А і герметичні муфти типу Б ;

Таблиця 1.3.

Основні методи ремонту, які застосовуються у світовій практиці

Дефекти	Шліфування	Наплавлення	Муфта типу А	Муфта типу Б	Муфта з композитного матеріалу	Механічний зажим	Стальні півмуфти і накладки
1	2	3	4	5	6	7	8
Мала площа дефекту, малий діаметр	так	так	так	так	так	так	так
Велика площа дефекту, великий діаметр	ні	ні	так	так	установка декількох муфт	установка декількох муфт	ні
Дефект на плавному згині	так	так	спецконфігурація	спецконфігурація	так	так	так
Дефект на різкому згині	так	так	спецконфігурація	спецконфігурація	спецконфігурація	ні	ні
Тіч, одиничний випадок	ні	ні	ні	так+спецтехнологія	ні	так+спецтехнологія	ні
Зовнішня корозія	так	так	так	так	так	так	так
Поверхневий пітінг < 0,8 δ	так	так	так	так	так	так	так
Глибокий пітінг > 0,8 δ	ні	ні	ні	так	ні	так	ні

Продовж. табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Внутрішній дефект, включаючи корозію	ні	ні	при відповідних умовах	так	при відповідних умовах	так	ні
Ум'ятини	ні	ні	з наповнювачем	так	з наповнювачем	так	ні
Поверхні тріщини або подряпини < 0,4 δ	так+ контроль	так+ зачистка	так	так	див. примітку	так	так
Глибокі тріщини або подряпини > 0,4 δ	ні	ні	ні	так	ні	так	ні
Дефект в поздовжньому шві труби або поблизу нього	ні	ні	ні	так+ спец-муфта	ні	так+ спец-муфта	ні
Стрес-корозія	так+ контроль	так+ зачистка	так	так	див. примітку	так	ні
Гофри або вм'ятини	ні	ні	ні	спецконфігурація	ні	ні	ні
Дефекти попереднього ремонту	ні	так+ зачистка і контроль	ні	так	ні	так	ні
Дефекти кільцевих швів	так+ контроль	так+ контроль	ні	так	ні	при відповідних умовах	ні
Примітка. Застосування муфт з композитних матеріалів для цих дефектів може бути можливим і вивчається							

д) муфти з високоміцної стрічки композитного матеріалу на основі скловолокна, які намотуються з натягом на місце дефекту труби – метод фірми Clock Spring [57, 112].

Аналіз технологічних прийомів ремонту наскрізних дефектів газопроводу дозволяє виділити два перспективні методи: ремонт без зупинки транспортування газу і ремонт з відключенням ділянки газопроводу, що ремонтується, від основної нитки. Важливою умовою успішної реалізації цих варіантів є розробка надійних перекриваючих пристроїв, які б дозволили перекрити трубопровід в потрібному перерізі за відносно короткий проміжок часу і витримали б високий тиск, не менший ніж тиск транспортування.

На основі аналізу патентних та літературних матеріалів проведена систематизація існуючих перекриваючих пристроїв. На рис. 1.2 наведена класифікація перекриваючих пристроїв.



Рис. 1.2. Класифікація перекриваючих пристроїв

Стаціонарні перекриваючі пристрої (крани), витримуючи значні тиски, дозволяють локалізувати пошкоджену ділянку певної довжини, зменшуючи кількість газу, який стравлюється, і тривалість аварійно-відновлювальних робіт. Їхньою перевагою є постійна готовність до дії і швидкодія. Однак для

максимального скорочення обсягу газу, що стравлюється, і термінів аварійно-відновлювальних робіт, а відповідно і простою трубопроводу, потрібно щоб локалізовані ділянки були мінімальної довжини, що зумовлює необхідність в великій кількості перекриваючих пристроїв такого типу. Враховуючи цю обставину, вартість кранів на практиці досягає значної величини (до 10% від загальних капіталовкладень). До того ж деякі крани не застосовуються жодного разу за весь термін експлуатації. Таким чином, область застосування пристроїв такого типу обмежена міркуваннями економічного характеру.

Мобільні перекриваючі пристрої дозволяють локалізувати пошкоджену ділянку газопроводу будь-якої довжини в безпосередній близькості від місця аварії, що дозволяє максимально скоротити обсяг газу, який стравлюється, і час простою газопроводу.

Перекриваючі пристрої, які монтуються ззовні трубопроводу, можуть бути застосовані на трубопроводах будь-якої конструкції у випадку розривів і інших пошкоджень. Вони доставляються до місця аварії і після розкопування трубопроводу монтуються по обидві сторони від пошкодженої ділянки. Недоліком даних пристроїв є те що перекриваючі пристрої низького тиску встановлюються після зупинки перекачування, а перекриваючі пристрої високого тиску дозволяють усунути пошкодження без зупинки транспортування але вимагають будівництво лупінга або байпаса що вимагає значних капіталовкладень.

Перекриваючі пристрої “поточного” типу монтуються в середині трубопроводу, переміщуються до місця аварії трубопроводом в потоці перекачуваного продукту і зупиняються в місці перекриття по сигналу на час ремонту. Такі пристрої поділяються на пристрої, які локалізують тіч в газопроводі, перекриваючи порожнину трубопроводу повністю та зупиняють транспортування газу, або частково, перепускаючи потік крізь корпус і дозволяють проведення ремонтних робіт без зупинки перекачування та пристрої які локалізують дефектну ділянку і дозволяють вирізати котушку без стравлювання газу з газопроводу.

Розглянемо конструкції перекриваючих пристроїв, їх специфічні особливості застосування, а також найбільш оригінальні технічні рішення, які використовуються у випадку ремонту наскрізних дефектів трубопроводу.

У праці [50] описана конструкція пристрою для перекриття трубопроводу при ремонті (рис. 1.3), який містить пружну еластичну тороїдальну камеру 6, виконану з плоскою перегородкою 7 і жорстким каркасом 2. Каркас і камера обладнані вушками, крізь які проходить трос. Еластична тороїдальна камера 6, яка наповнюється стиснутим газом, забезпечує герметичність установки пристрою в трубопроводі 5 і стійкість проти зсуву за рахунок щільного прилягання поверхні камери до стінки трубопроводу 5. Перегородка в середній частині камери, як і сама камера, виконані з еластичного газонепроникного матеріалу. Жорсткий каркас 2 застосовують для розміщення пристрою перпендикулярно осі трубопроводу 5 і створення додаткового опору зсуву шляхом установки його в розпір. Монтажний отвір 3 може бути виконаний за допомогою пристрою для безвогневого врізання в трубопровід.

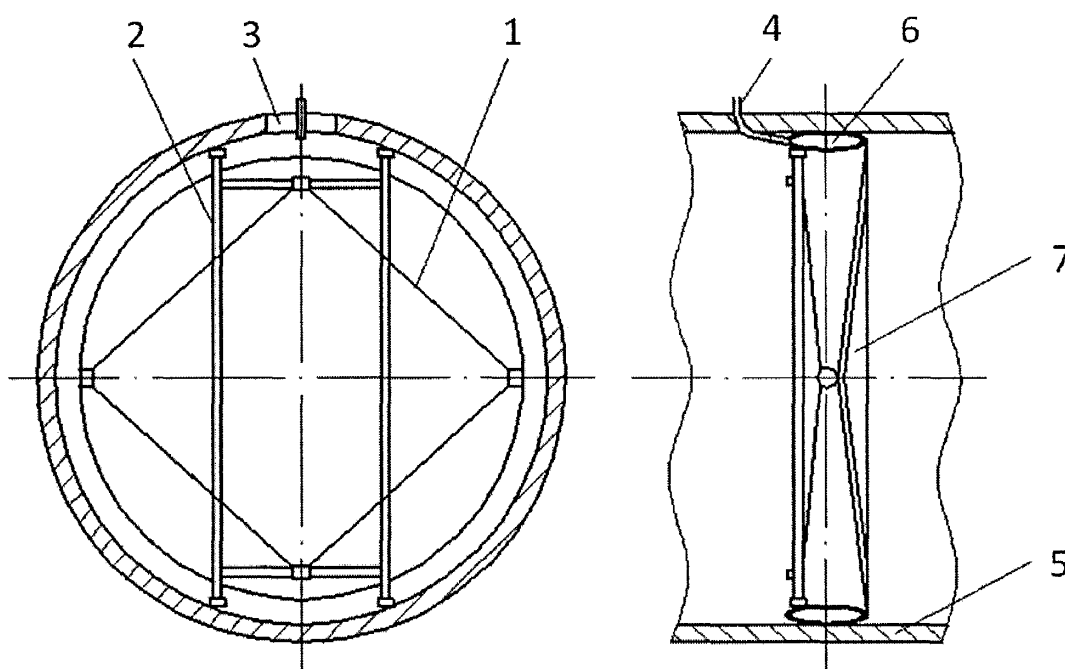


Рис. 1.3. Пристрій для перекриття трубопроводу:

- 1 – трос; 2 – жорсткий каркас; 3 – монтажний отвір; 4 – шланг;
5 – трубопровід; 6 – еластична тороїдальна камера; 7 – плоска перегородка.

Відома конструкція перекриваючого пристрою, у якій в якості запірного елемента застосовується еластична оболонка [66]. Особливістю цього пристрою є те, що після вирізання отвору в стінці труби (методом безвогневого врізання) туди вводиться еластична камера, яка, при нагнітанні в неї стиснутого повітря, роздувається і перекриває прохідний переріз трубопроводу. З кожної сторони ділянки трубопроводу, яка перекривається, може встановлюватися по два подібних пристрої. У цьому випадку внутрішня пара пристроїв застосовується безпосередньо для перекриття трубопроводу, а зовнішня пара пристроїв з'єднується, після підготовки отвору в стінках трубопроводу, байпасною лінією з метою продовження перекачування газу трубопроводом. Еластична оболонка може заповнюватися речовиною, здатною за певних умов спінюватися, розбухати або тверднути, збільшуючись в обсязі [67], або заморожуватися при охолодженні [24].

Загальною ознакою, пристроїв для локалізації місця течі в трубопроводі є те, що вони переміщуються в середині трубопроводу в потоці перекачуваного продукту, зупиняються в місці пошкодження, фіксуються на стінках труби і герметизують пошкодження, зупиняючи витікання газу та дозволяють проведення ремонтних робіт.

Типовим представником таких пристроїв є описаний в [25] пристрій для перекриття течі в трубопроводі.

Пристрій для перекриття трубопроводу (рис. 1.4) призначений для локалізації наскрізних дефектів газопроводів та нафтопроводів без зупинки транспортування продукту [26].

Попередньо в трубопровід 4 з двох сторін від місця течі під тиском врізають по два патрубки 14, 15 і 16, 17 з засувками 18, 19 і 20, 21. Кожна пара патрубків з'єднується в єдину свічу з засувками 22 і 23. Патрубки 15 і 16 розміщують таким чином, щоб в момент фіксації пристрою в трубопроводі 4 вони розміщувались між рухомими манжетами 3 і поршнями 10, при крайньому правому їх положенні.

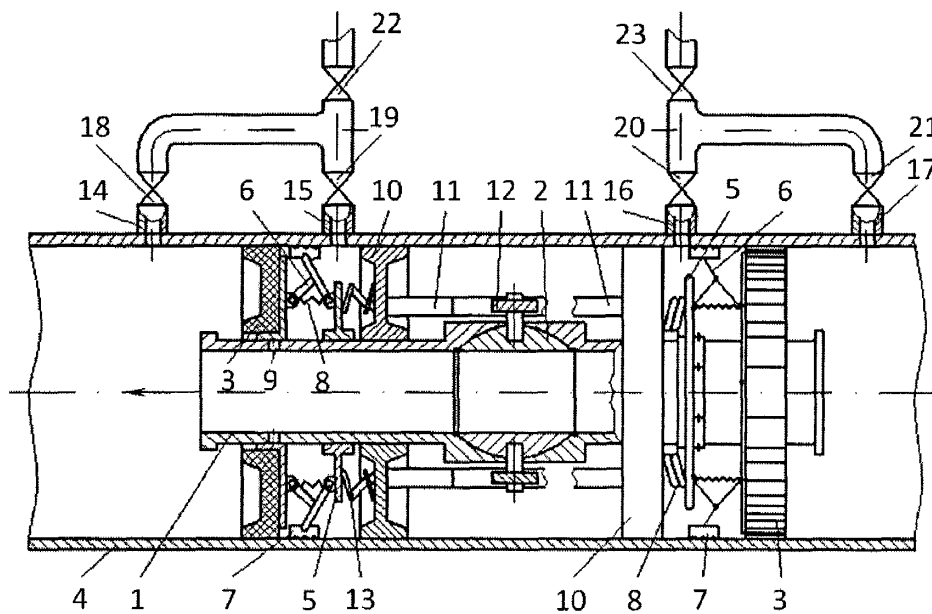


Рис. 1.4. Пристрій для перекриття трубопроводу:

1 - циліндричний корпус; 2 - запірний орган; 3 - манжета; 4 - трубопровід;
 5 - кільцевий упор; 6 - шарнірний важіль; 7 - фіксатор; 8 - пружина; 9 - наскрізні
 отвори; 10 - поршні; 11 - рейчатий шток; 12 - зубчате колесо; 13 - пружини;
 14, 15, 16, 17 - патрубки; 18, 19, 20, 21, 22, 23 – засувки.

Локалізація наскрізних дефектів здійснюється наступним чином. Пристрій через камеру запуску вводиться в потік продукту, який транспортується і доставляється на місце ремонту. У процесі переміщення пристрою трубопроводом манжети 3 під дією пружини 8 віджаті від упорів 5 в крайнє положення і продукт через отвори 9 поступає в порожнину між манжетами. В момент перетину передньою по ходу манжетою отвору патрубка 15 відкриваються засувки 19, 20, 22 і 23 (засувки 18 і 21 закриті). Оскільки діаметр отворів 9 на порядок менший діаметрів патрунків 15 і 16, то з порожнини між манжетами продукт скидається в атмосферу і тиск у вказаній порожнині різко падає. За рахунок цього манжети під тиском продукту в трубопроводі, долаючи зусилля пружин 8, переміщуються в сторону упори 5, перекриваючи отвори 9. Одночасно фіксатори 7, переміщуючись в радіальному напрямку прилягають до внутрішньої поверхні трубопроводу 4. Після фіксації

пристрою і надійної герметизації на ділянці між манжетами, не зупиняючи перекачування (транспортування продукту здійснюється через наскрізний канал корпусу), здійснюється необхідний ремонт. Після завершення ремонту (усунення витоку і заміни дефектної ділянки) закривають засувки 22 і 23 та відкривають засувки 18 і 21, вирівнюючи тиск на манжети, які під зусиллям пружин переміщуються в початкове положення, виводячи фіксатори 7 з зачеплення з трубою. Одночасно закриваються засувки 18, 19, 20 та 21 і пристрій в потоці транспортованого продукту переміщується до камери прийому. У разі необхідності прискорення доставки пристрою на місце ремонту, пристрій виконують з запірним органом 2, який має поршневі приводи. В цьому випадку поршні 10 приводу з допомогою пружин 13 з'єднуються з упорами 5. Пристрій вводять в трубопровід з відкритим запірним органом 2. Однак під тиском продукту, який поступає через отвори 9, поршні 10, долаючи зусилля пружин 13, переміщуються назустріч один одному, забезпечуючи закриття запірного органу. В момент фіксації пристрою на місці ремонту і різкого падіння тиску в порожнині між манжетами 3 і поршнями 10, пружини 13 відводять поршні 10 в сторону упорів, забезпечуючи відкриття запірного органу 2 і можливість проведення ремонту без відключення дефектної ділянки. В цьому випадку довжина ділянки, яка підлягає заміні, повинна бути обмежена відстанями між поршнями 10.

З метою проведення планових ремонтних робіт було запропоновано пристрій для перекриття дефектної ділянки діючого трубопроводу (рис. 1.5), який дозволяє локалізувати дефектну ділянку трубопроводу і провести її заміну без стравлювання газу з газопроводу [27]. Локалізація дефектної ділянки здійснюється в наступному порядку. Попередньо визначається довжина дефектної ділянки L , яка підлягає заміні. Визначають потрібну довжину роз'ємної тяги 5, місце установалення фіксатора 15 та пустотілих трубок 16.

Пристрій вводять в трубопровід 17 через камеру запуску. У потоці перекачуваного середовища пристрій транспортують до дефектної ділянки. В момент удару упори 10 в фіксатор 15 пристрій зупиняється, клапан 8

відкривається і робоче середовище з циліндрів 1 надходить у порожнини ущільнень 3, притискає їх до стінки трубопроводу 17 і герметично перекриває його.

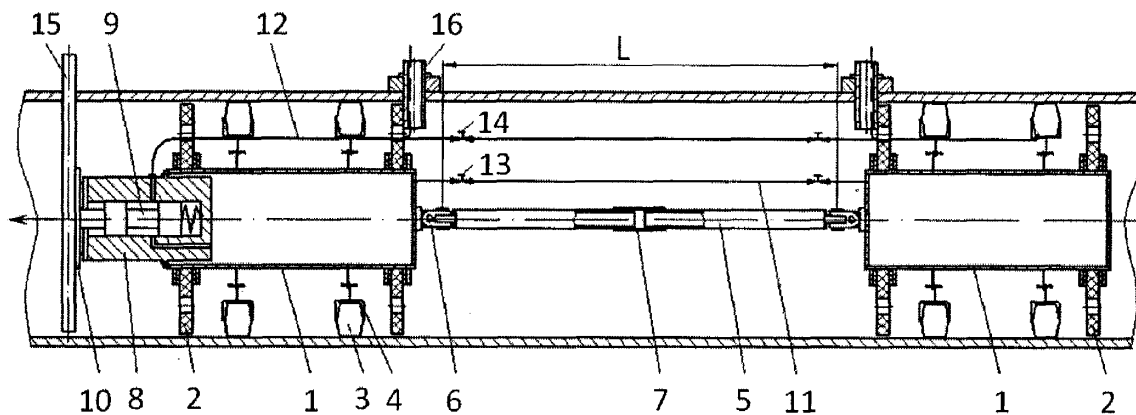


Рис. 1.5. Пристрій для перекриття дефектної ділянки діючого трубопроводу:
 1 – циліндричний корпус; 2 – направляючий диск; 3 – розжимний кільцевий ущільнювач; 4 – ступиця; 5 – тяга; 6 – шарнір; 7 – муфта;
 8 – підпружинений клапан; 9 – шток; 10 – упор; 11, 12 – гнучкі трубопроводи;
 13, 14 – крани; 15 – фіксатор; 16 – трубка; 17 – трубопровід.

Через трубки 16 викачують транспортоване середовище, яке знаходиться у відсіченій частині трубопроводу і після її дегазації видаляють дефектну ділянку L, шляхом вирізання по кінцях і вздовж твірної. Тоді від'єднують тягу 5 від циліндрів 1 і демонтують ділянку гнучких трубопроводів 12 між запірними кранами 13 і 14. Кінці трубопроводів 12 з запірними кранами 13 і 14 через трубки 16 виводять назовні. Трубки 16 одночасно є упорами направляючих дисків 2 і виключають після знімання тяги 5 зміщення циліндрів 1 під тиском середовища, що знаходиться в трубопроводі 17. На місце вирізаної дефектної ділянки L установлюють трубу, яку за допомогою зварювання стикують з кінцями трубопроводу 17. Після випробування нової ділянки тиск в ущільнювачах 3 скидають шляхом відкривання запірних кранів 14, які знову вводяться в трубопровід 17.

З трубопроводу 17 витягають трубки 16 і фіксатор 15 та заварюють раніше вирізані для них "вікна". Після відновлення перекачування продукту частини пристрою переміщуються в потоці середовища, що транспортується.

Довжина дефектної ділянки, яку може локалізувати пристрій, є невеликою так як довжина тяг 5 обмежується радіусом повороту криволінійних ділянок трубопроводу.

Аналіз існуючих методів і пристроїв для ремонту газонафтопроводів без зупинки перекачки показує, що в кожному випадку для проведення локалізації ділянки трубопроводу з метою проведення ремонтних робіт без зупинки транспортування продукту виникає необхідність врізання в діючий трубопровід під тиском.

1.3. Методи врізання в трубопровід під тиском

В процесі експлуатації часто доводиться виконувати врізання для підключення нових ліній до діючого трубопроводу, влаштування камер прийому і пуску різних пристроїв, обвідних ліній, підключення лупінгів. Врізання — це процес трудомісткий і пожежонебезпечний. Безвогневі (холодні) способи врізання, що застосовуються в даний час, дозволяють зменшити ступінь пожежонебезпеки, скорочують об'єм і час проведення робіт, які здійснюються без зупинки перекачування нафти або газу і практично без втрат продукту, що транспортується.

Розглянемо методи врізання, які використовуються в даний час для під'єднання відводів до діючих трубопроводів.

Для врізання відводів в магістральні нафто- і нафтопродуктопроводи сконструйований пристрій, що дозволяє проводити роботи без зупинки перекачування при робочому тиску в трубопроводі до 2,5 МПа. [42, 50]

Установка для врізання відводів в діючі трубопроводи складається з електродвигуна 16, редуктора 4, торцевої фрези 3 і корпуса 14 (рис. 1.6).

Черв'ячне колесо редуктора розрізане по середній площині на дві частини. Нижня половина 13 черв'ячного колеса утворює з шпинделем 8 пари "гвинт – гайка", а верхня половина 12 посаджена вільно на маточину нижньої половини і має кулачки, що взаємодіють з кулачковою муфтою 11, яка разом з шпинделем утворює рухоме шпонкове з'єднання. За допомогою механізму перемикачання 5 кулачкова муфта з'єднується то з кулачками верхньої половини 12 черв'ячного колеса, то з кулачками напівмуфти 6, жорстко закріпленої на редукторі 4. В результаті цього здійснюється відповідно робоча і прискорена подача ріжучого інструменту.

На редукторі для захисту шпинделя 8 закріплений кожух 10 з кінцевим вимикачем 9, що служить для відключення електродвигуна при досягненні ріжучим інструментом крайнього положення, і кулачком 7, який контролює подачу ріжучого інструменту.

В якості ріжучого інструменту застосовується торцева кільцева фреза 3, закріплена разом з свердлом 15 на кінці шпинделя 8. Установка оснащена змінними корпусами 14 і фрезами для вирізки отворів різного діаметру. Всі корпуси мають патрубок 1 з фланцем 2. Через патрубок здійснюється подача охолоджуючої рідини. До нього кріпиться насос, за допомогою якого проводиться опресовування корпусу установки, засувки і привареного до діючого трубопроводу патрубка.

Роботу з врізання відводу здійснюють таким чином. У місці врізання до трубопроводу приварюють патрубок, діаметр якого рівний діаметру відводу.

При проведенні зварювальних робіт тиск в трубопроводі, по якому перекачується продукт, не повинен перевищувати 1,5 МПа. Після закінчення зварювальних робіт його можна збільшити до робочого. До привареного патрубку з фланцем кріплять засувку, під якою встановлюють тимчасову опору. До фланця засувки кріплять установку. Перед фрезеруванням отвору всю порожнину від трубопроводу до установки заповнюють емульсією для охолодження і змащування ріжучого інструменту і за допомогою насоса опресовують корпус установки, засувки і приварений до трубопроводу

патрубок (тиск рівний 1,5 робочого тиску в трубопроводі). Тиск опресовування утримують протягом 5 хв. Підтікання в місцях з'єднання і мокріння зварних швів не допускаються.

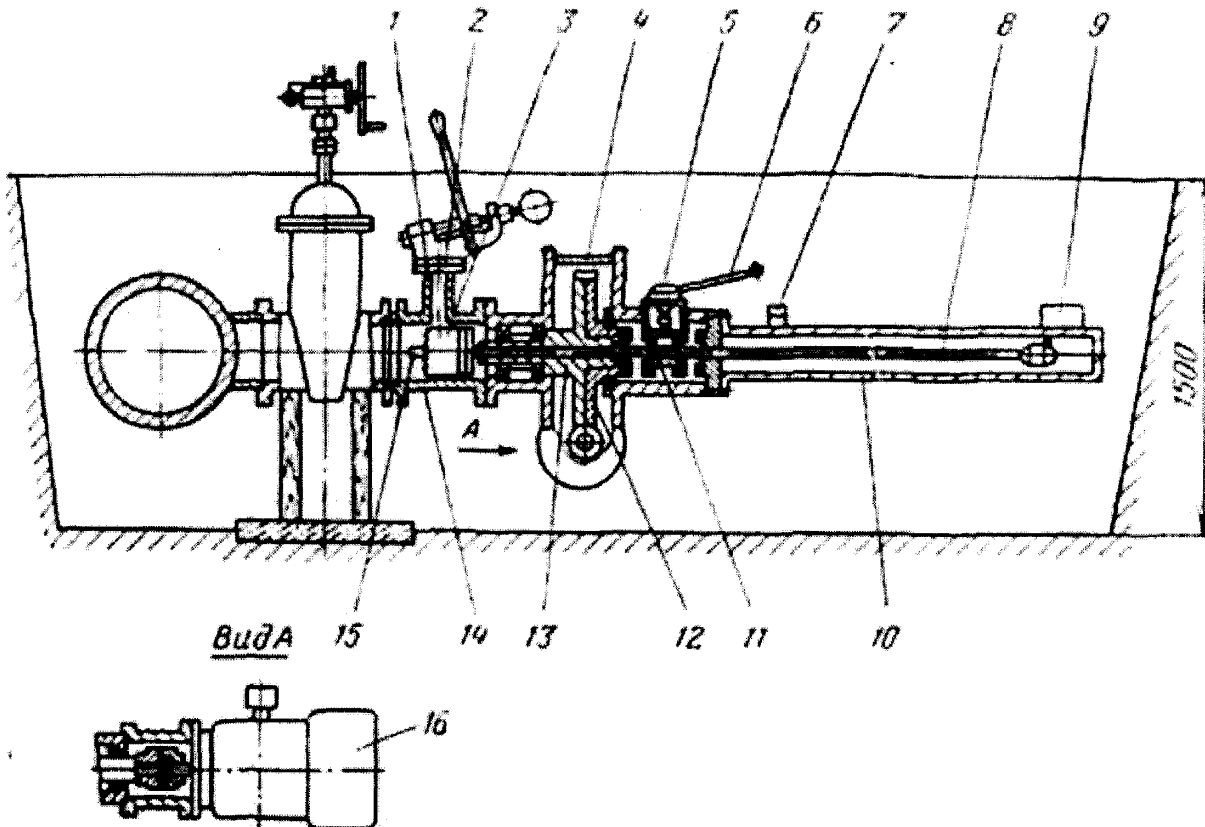


Рис. 1.6. Пристрій для врізання відводів в діючі трубопроводи

Після цього ріжучий інструмент через відкриту засувку підводять до поверхні труби і фрезерують отвір. Після закінчення операції ріжучий інструмент разом з вирізаним диском відводять в початкове положення. Засувку закривають, а установку демонтують. До засувки приєднують відвід. На цьому робота по врізанні відводу закінчується. При врізанні відводу установку обслуговує одна людина. Максимальний час врізання відводу складає 25 хв. Маса установки 306 кг.

В основному, врізання в діючі трубопроводи проводиться за даною схемою, але при цьому можуть бути застосовані пристрої які приведені в працях [19-23, 100, 101, 103, 104].

Недоліком даних пристроїв є те, що при виконанні врізання не забезпечується безпека робіт внаслідок просочування транспортованого продукту через ущільнюючі елементи в навколишнє середовище, що створює можливість виникнення пожежонебезпечної ситуації та веде до забруднення довкілля. [5]

Задача, яка ставилась при створенні приведеного нище винаходу – підвищення надійності і безпеки проведення врізання та покращення екологічної ситуації шляхом надійної локалізації місця врізання та ріжучого інструменту. [13]

Поставлена задача вирішується тим, що двигун та акумулятор пристрою для безвогневого врізання відводу в діючий трубопровід, який містить патрубок з фланцем і засувкою, шпindel з кільцевою фрезою та центруючий пристрій, розміщені в герметичному кожусі на поршні, який виконаний з можливістю переміщення вздовж осі порожнистого, частково заповненого в'язкою рідиною (наприклад, маслом), корпусу-циліндра, який у верхній частині оснащений кришкою для заливу в'язкої рідини, краном для закачування робочого агенту, отвором з пробкою, яка з'єднана з кожухом за допомогою троса для випуску в'язкої рідини та робочого агенту, а у нижній частині – двома кранами для продувки пристрою інертним газом, крім того, в боковій поверхні корпусу-циліндра виконаний паз з можливістю взаємодії з розміщеним на поршні вимикачем двигуна.

Розміщення двигуна та акумулятора в герметичному кожусі на поршні, який вміщений у корпус-циліндр, частково заповнений в'язкою рідиною, забезпечує надійну герметизацію системи і виключає витіки транспортованого продукту в атмосферу. Підвищення тиску в порожнині корпусу-циліндра внаслідок закачування робочого агенту призводить до подачі ріжучого

інструменту в повздовжньому напрямку вниз, а обертання фрези здійснюється за допомогою двигуна, який живиться від акумулятора.

На рис. 1.7 показаний загальний вигляд пристрою.

Пристрій містить перехідний патрубок 1 з фланцем 2, засувкою 3, шпindel 4 з кільцевою фрезою 5, двигун 6 з акумулятором 7, які розміщені в герметичному кожусі 8 на поршні 9, який виконаний з можливістю переміщення вздовж осі порожнистого корпусу-циліндра 10, що оснащений кришкою 11, краном 12 та отвором 13 з пробкою 14 у верхній частині та кранами 15 і 16 у нижній. Крім того, у боковій поверхні корпусу-циліндра виконаний паз 17 з можливістю взаємодії з вимикачем двигуна 18, розміщеним на поршні, посередині якого виконаний наскрізний отвір для шпінделя, а пробка 14 з'єднана за допомогою троса з кожухом 8. Для центрування фрези та утримання вирізаної ділянки труби призначений центруючий пристрій, який містить болт 19, що вільно входить всередину фрези, та приварену до трубопроводу 20 гайку 21.

Пристрій працює наступним чином.

До трубопроводу 20 приварюють гайку 21 та патрубок 1 з фланцем 2. Болт 19 через фрезу 5 вкручують в гайку 21. Приєднують до патрубку 1 засувку 3, відкривають її і до фрези 5 прикручують шпindel 4, на який встановлюють поршень 9. На поршні кріплять двигун 6 з акумулятором 7, з'єднують вал двигуна з шпінделем 4. На двигун та акумулятор одягають герметичний кожух 8 і встановлюють корпус-циліндр 10, який кріплять до засувки 3. Через кришку 11 заливають в'язку рідину (масло). Через крани 15 і 16 продувають пристрій інертним газом, а по закінченні процесу продувки їх закривають. У порожнині корпусу-циліндра 10 нагнітають тиск, шляхом закачування робочого агента через кран 12.

Під дією тиску поршень 9 виконує рух вниз, вимикач 18 виходить з пазу 17 корпусу-циліндра, що призводить до вмикання двигуна 6 і обертання шпінделя 4 з фрезою 5. Після закінчення вирізання отвору в трубопроводі 20, пробка 14 за допомогою троса відкриває отвір 13 і під дією тиску

транспортованого продукту поршень з шпинделем та фрезою відходить назад, витісняючи через отвір 13 робочий агент та масло, що забезпечує поступове переміщення поршня, вимикач 18 заходить в паз 17, що призводить до вимикання двигуна. Після вимкнення двигуна і виходу шпинделя з фрезою з засувки, останню закривають, через кран 15 зливають транспортований продукт і пристрій демонтують.

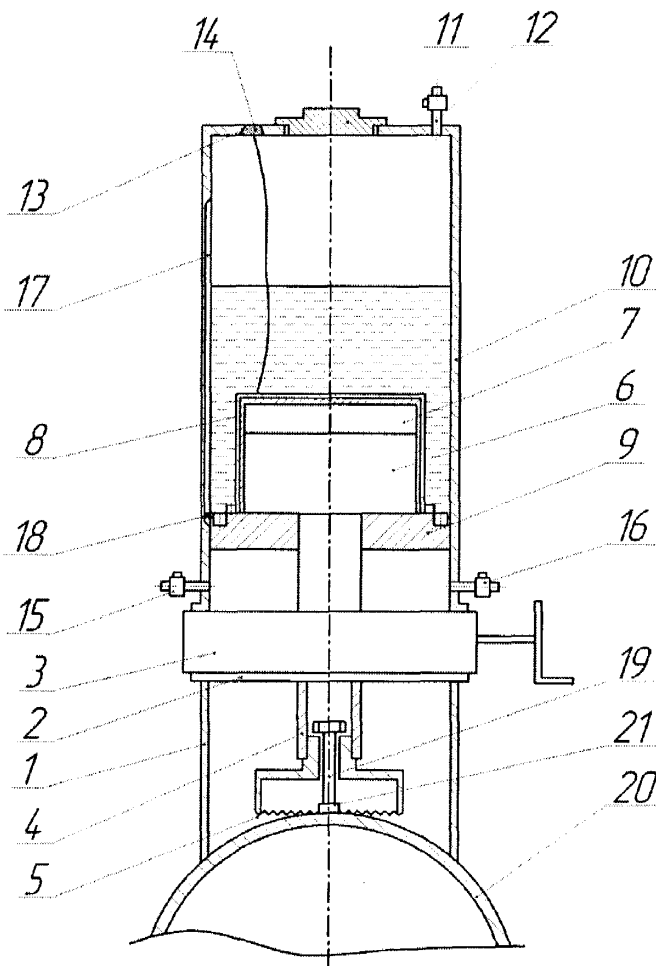


Рис. 1.7. Пристрій для безвогневого врізання відводу в трубопровод

Даний пристрій забезпечує герметичність місця врізання, проте під час проведення врізання існує можливість виходу з ладу акумулятора (який живить двигун), що призводить до зупинки двигуна, який обертає шпиндель з фрезою, і до зупинки самого процесу врізання. Щоб продовжити врізання необхідно замінити акумулятор, для цього потрібно демонтувати циліндричний корпус,

тому, якщо вихід з ладу акумулятора відбувається в момент, коли трубопровід частково прорізаний фрезою і в середину корпусу поступає транспортований продукт, то під час проведення заміни акумулятора відбувається викид даного продукту в довкілля та виникає пожежонебезпечна ситуація. Отже, недоліком даного пристрою є низька надійність його роботи. [5].

Таким чином, спільною особливістю способів безвогневого врізання в діючу магістраль під тиском є необхідність приварювання до зовнішньої поверхні стінки магістралі патрубк-відводу, на якому монтується обладнання для вирізання отвору в стінці магістралі. Процес приварювання патрубк-відводу до стінки магістралі обумовлює створення температурних полів в стінці трубопроводу, які можуть викликати структурні зміни в матеріалі труби і призвести до тимчасової зміни механічних його характеристик, викликаючи пластичні деформації металу. [33, 34, 35, 41]

Існуючі види зварювання в основному передбачають місцевий концентрований нагрів певних ділянок виробу до температури розплавлення або до пластичного стану. Процеси нагріву і охолодження виробу при зварюванні мають вирішальний вплив на якість зварних з'єднань, оскільки тепловий стан металу, шлаку і інших взаємодіючих компонентів при цьому значною мірою впливають на спрямованість всіх фізико-хімічних і металургійних процесів. Залежно від розподілу тепла при зварюванні, швидкості відведення тепла і охолодження зварювальної зони визначається структура наплавленого металу і зони термічного впливу. Від циклу нагріву і охолодження конструкції при зварюванні, а також від характеру температурних полів, залежать величина і вид виникаючих напружень і деформацій. [3, 39, 56]

З тепловими процесами пов'язані найважливіші зварювальні характеристики, що відносяться до швидкості нагріву металу, швидкості розплавлення, продуктивності зварювання і його техніко-економічної ефективності.

На основі теорії розповсюдження тепла, а також досліджень розроблені методи інженерних розрахунків теплових процесів, що забезпечують застосування раціональних зварювальних режимів і технології зварювання металів.

При зварюванні, як правило, виникає нерівномірний розподіл температури, але тривалий нагрів виробу сприяє досягненню сталого теплового стану, при якому температура змінюється від точки до точки, але в кожній окремій точці залишається незмінною зі зміною часу передачі.

Закон теплопровідності Фур'є визначає питомий тепловий потік через ізотермічну поверхню в даній точці:

$$q_T = -\lambda \operatorname{grad} T, \quad (1.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності.

На основі Закону Фур'є виведено загальне диференціальне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1.2)$$

Це рівняння описує процес розповсюдження тепла при постійних коефіцієнті теплопровідності λ і об'ємній теплоємності $c\rho$, насправді вони залежать від температури досить сильно і облік цього чинника приводить до нелінійних диференціальних рівнянь. Швидкість вирівнювання температури характеризують коефіцієнтом температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (1.3)$$

Рівняння теплопровідності (1.2) відображає загальний випадок розподілу тепла в нагрітому тілі. При вирішенні конкретних задач, що відносяться до різних способів зварювання, це рівняння можна значно спростити.

1. Температурне поле в тонкій пластині можна віднести до плоскої системи координат, оскільки температура рівномірно розподілена по товщині пластини і $\partial T / \partial z = 0$. Тоді загальне рівняння перетвориться:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (1.4)$$

2. Температура в тонкому стержні, трубі і інших подібних деталях може бути рівномірно розподілена по поперечному перерізу і не залежати від координат y і z , тоді $\partial T / \partial y = 0$; $\partial T / \partial z = 0$, отже:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (1.5)$$

3. При сталому процесі, коли настає теплова рівновага і температура будь-якого елементу тіла постійна ($T = \text{const}$; $\partial T / \partial t = 0$), рівняння (1.2) перетвориться в рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (1.6)$$

При вирішенні задач розповсюдження тепла недостатньо одного рівняння теплопровідності, потрібно ще знати краєві умови, які відображають початковий розподіл температури в тілі і умови теплообміну на межах тіла, що розглядається.

Початковий розподіл температури в тілі задається у всьому об'ємі у момент $t=0$:

$$T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z). \quad (1.7)$$

Умови теплообміну на межах тіла можуть бути дуже різноманітні. Для практичного користування часто приймають три з них.

Процеси розповсюдження тепла при зварюванні є складними, і для вирішення конкретних завдань переходять до простіших ідеальних теоретичних схем, які достатньою мірою відображають реальну картину розповсюдження тепла при зварюванні.

Форми і розміри тіла істотно впливають на характер розповсюдження тепла в ньому. Близькість меж тіла до джерела тепла різко спотворює теплове поле, тому для розрахунків вибирають одну з наступних схем нагріву тіла.

Окрім ідеальних схем тіл, що нагріваються, при розрахунку зварювальних теплових процесів є схематизація джерел, яка класифікується за наступними

ознаками: по розподілу введення тепла — точкове джерело, лінійне, плоске і об'ємне; по тривалості дії — миттєвий і постійно діючий; по розташуванню щодо досліджуваної точки — нерухомий, рухомий і швидкорухомий.

Безперервно діючі джерела тепла можна представити як сукупність миттєвих джерел, певним чином розподілених по поверхні або по об'єму тіла.

Процес розповсюдження тепла миттєвого точкового джерела в нескінченно малому об'ємі необмеженого тіла виражається рівнянням [37, 84]:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4at}}, \quad (1.8)$$

де T – температура досліджуваної точки тіла $^{\circ}\text{C}$;

R – відстань від джерела тепла до точки тіла з координатами x , y , z ,

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

t – час від моменту введення тепла, с;

Q – кількість теплоти, Дж;

c – питома теплоємність тіла, Дж/(г \cdot $^{\circ}\text{C}$);

ρ – густина тіла, г/см 3 ;

a – коефіцієнт температуропровідності, см 2 /с;

e – основа натуральних логарифмів.

Для миттєвого лінійного джерела, що вводить тепло в пластину δ через необмежену по довжині призму з нескінченно малою основою в необмеженому теплопровідному тілі, розв'язок диференціального рівняння теплопровідності прийме вигляд:

$$T(r, t) = \frac{Q_1}{c\rho 4\pi at} e^{-\frac{r^2}{4at}}, \quad (1.9)$$

де r – відстань даної точки від джерела тепла, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$;

Q_1 – тепло, що вводиться через призму, Дж/см.

Якщо в нескінченний стержень миттєвим плоским джерелом введено тепло, то воно розподіляється тільки по осі xx за відсутності відведення тепла через бічні поверхні в навколишнє середовище. Розв'язок рівняння має вигляд

$$T(x, t) = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (1.10)$$

де x – відстань досліджуваної точки від площини джерела тепла;

Q_2 – тепло, прикладене до площини xOz , Дж/см².

У приведених формулах були розглянуті тільки три випадки дії миттєвих зосереджених джерел. Насправді джерела діють безперервно і мають розповсюдження в більшому або меншому об'ємі.

Для вирішення завдань розповсюдження тепла від реальних джерел використовують принцип накладання елементарних рішень, який полягає в тому, що температура від сумісної дії сукупності розподілених в просторі або часі джерел приймається рівній сумі температур від дії кожного окремого джерела. Принцип накладання застосовують при розрахунку процесу розповсюдження тепла лінійними диференціальними рівняннями і подібними граничними умовами [37, 84].

Тепло, що виділяється електричною дугою, внаслідок високої теплопровідності металу інтенсивно відводиться в холодну масу металу, підвищуючи його температуру. При зварюванні не все тепло, що виділяється дугою, використовується на нагрів виробу, так як частина його витрачається на нагрівання атмосфери і оточуючих предметів шляхом конвекції і радіації. Тому ефективна теплова потужність дуги q завжди менша повної теплової потужності q_1 і виражається формулою:

$$q = \eta_n UI, \quad (1.11)$$

де q – ефективна теплова потужність дуги, Вт;

η_n – ефективний ККД процесу нагріву виробів дугою, $\eta_n = (q/q_1)$; при автоматичному зварюванні під шаром флюсу ТІН $\eta_n = (0,8 \div 0,9)$; при зварюванні плавким електродом відкритою дугою $\eta_n = (0,7 \div 0,75)$; при зварюванні в середовищі CO_2 $\eta_n = (0,62 \div 0,7)$; при аргоно-дуговому зварюванні неплавким електродом $\eta_n = (0,5 \div 0,55)$;

U – напруга дуги, В;

I – сила струму дуги, А.

Ефективний ККД процесу нагріву виробу дугою залежить від технології зварювання, довжини дуги, ступеня заглиблення її в метал і ін.

Точність теплових розрахунків для зварювальних процесів залежить від правильності вибору схеми. В більшості випадків електричну дугу вважають точковим або лінійним джерелом. При накладенні валика на товсту пластину зварювальну дугу приймають за точкове джерело на поверхні тіла. Якщо зварюють листи за один прохід з повним проплавленням, то зварювальну дугу розглядають як лінійне джерело.

Зварювальна дуга є безперервно діючим джерелом, але при накладенні прихваток, коли потрібно визначити температуру тіла через проміжки часу, що у багато разів перевищують період горіння, можна вважати джерело тепла миттєвим.

При розрахунку температур для ручного дугового зварювання часто приймають схему рухомого джерела, а для автоматичного зварювання — схему джерела тепла, що швидко рухається.

При виборі розрахункових схем слід враховувати принцип місцевого впливу, який показує, що температурне поле залежить від розмірів і характеру розподілу джерела тепла тільки на відстанях одного порядку з його розмірами; на великих відстанях температурне поле практично не залежить від форми джерела і об'єму [37, 84].

При зварюванні пластин встик за один прохід з повним проплавленням можна вважати, що температури рівномірно розподілені і однакові по товщині. Електрична дуга в цьому випадку є лінійним розподіленням по товщині джерелом тепла, і температура не залежатиме від координати z , а визначиться значеннями x , y і часом t .

Для граничного сталого теплового стану температурне поле постійне, але залежить від часу і визначається формулою для нагріву пластини тривало діючим рухомим лінійним джерелом тепла:

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx^2}{2a}} K_0 \left(r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right), \quad (1.12)$$

де r – плоский радіус-вектор елемента рухомого поля, тобто відстань від центру джерела тепла до досліджуваної точки, см;

v – швидкість зварювання, см/с;

$K_0(u)$ – Бесселева функція від уявного аргументу другого роду нульового порядку (ця функція табульована);

b – коефіцієнт температуроотдачі, $b=2a/cp\delta$, 1/с;

a – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, Вт/(см²·°С);

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(см·°С);

δ – товщина пластини, см.

Параметри режиму зварювальної дуги, як показують дослідження рівняння (1.8), істотно позначаються на характері температурного поля граничного стану. Так збільшення швидкості зварювання при постійній потужності джерела ($q=\text{const}$) сприяє звуженню ізотерм в напрямі, перпендикулярному до переміщення дуги, і згущування перед нею (рис. 1.8, а). Збільшення потужності дуги (при $v=\text{const}$) сприяє збільшенню площі, яка займається ізотермами по ширині і довжині (рис. 1.8, б). При постійній погонній енергії ($q/v=\text{const}$) збільшення потужності дуги приводить до збільшення площ, обмежених ізотермічними кривими, а зростання швидкості зварювання зменшує ці площі (рис. 1.8, в) [37, 84].

Зварювання виробів з різними теплофізичними властивостями на одному режимі показує, що характер теплових полів неоднаковий. Найбільший вплив на теплове поле робить теплопровідність. Порівняння площ, обкреслених ізотермою 400°С для маловуглецевої сталі, алюмінію і міді, показує, що із збільшенням теплопровідності ці площі зменшуються і збільшуються області, нагріті до нижчих температур.

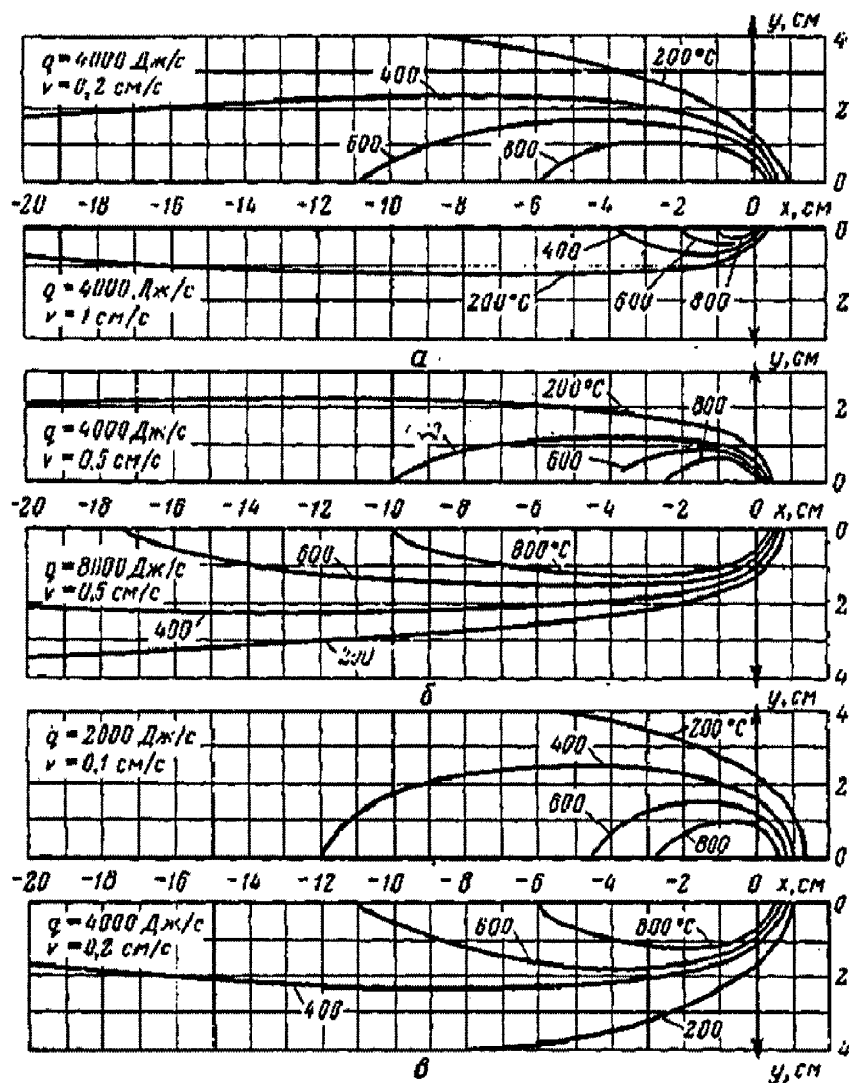


Рис. 1.8. Вплив режиму зварювання на температурне поле граничного стану в пластині з товщиною 1 см

Підвищення швидкості автоматичного зварювання і потужності зварювальних джерел тепла приводить до збільшення областей, нагрітих до певної температури. При цьому довжина зони нагріву збільшується пропорційно швидкості, а ширина зростає, наближаючись до певної межі. Ізотерми, зміщуючись в області вже пройдені джерелами, набувають витягнутого характеру і наближаються до прямих, паралельних осі x . Градієнт температур у напрямі осей z і y набагато більший, що дозволяє нехтувати розповсюдженням теплоти у напрямі x , оскільки градієнт $\partial T / \partial x \rightarrow 0$.

Розглянемо випадок нагріву лінійним джерелом, коли потужність джерела і швидкість зварювання нескінченно зростають ($q \rightarrow \infty$, $v \rightarrow \infty$), а їх відношення залишається постійним ($q/v = \text{const}$).

Нехай при автоматичному зварюванні по осі x рухається джерело тепла, яке проплавляє пластину повністю і прогріває її рівномірно по товщині (рис. 1.9). Тепло від джерела розповсюджується головним чином в площині, перпендикулярній до шва, і можна вважати, що теплообмін між елементарними брусками відсутній. Тепло, підведене до брусків при зварюванні, розповсюджується, як і в стержні, перетином δdx . Кількість тепла dQ , одержана перетином за час dt при проходженні шляху dx , буде рівна qdt . Тепло dQ , одержане перетином δdx , миттєво, оскільки час dt нескінченно малий. Інтенсивність миттєвого плоского джерела:

$$Q_2 = \frac{dQ}{\delta dx} = \frac{qdt}{\delta dx} = \frac{q}{v\delta}. \quad (1.13)$$

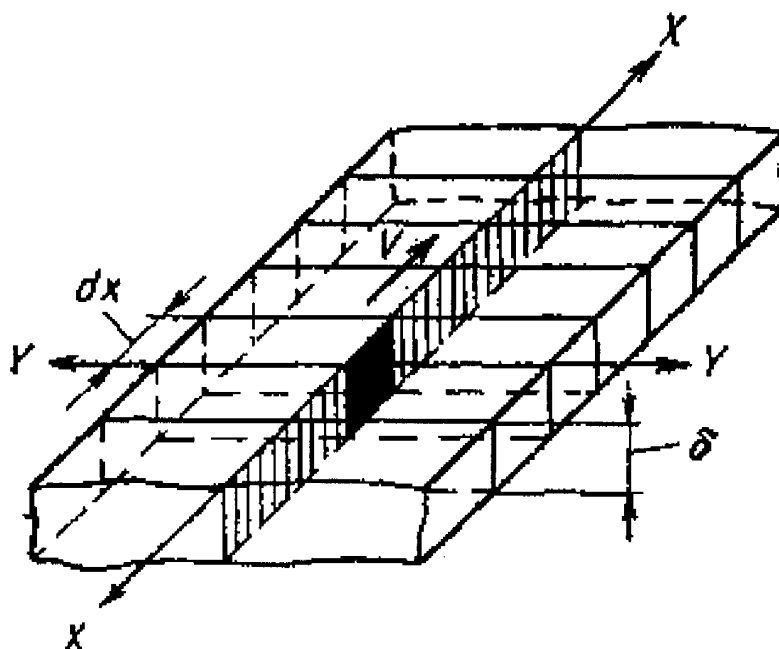


Рис. 1.9. Розрахункова схема розподілу тепла при нагріві пластини лінійним постійно діючим джерелом, яке швидко рухається

Підставляючи одержаний вираз в рівняння (1.10) для розповсюдження тепла в стержні від миттєвого плоского джерела, одержимо:

$$T(y,t) = \frac{q}{v\delta c\rho\sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{y^2}{4at}}. \quad (1.14)$$

З урахуванням тепловіддачі з бічної поверхні пластин остаточний розв'язок має вигляд:

$$T(y,t) = \frac{q}{v\delta c\rho\sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt}. \quad (1.15)$$

де t – час, що відраховується від моменту перетину джерелом площини, перпендикулярної осі x , в якій знаходиться дана точка.

З точки зору математичної фізики задача побудови нестационарного температурного поля, викликаного коловим рухом зварювальної дуги як теплового джерела, не вкладається в рамки приведених розробок. Рух теплового джерела по колу призводить до спотворення теплового поля, яке суттєво буде змінюватися в просторі, причому в межах кола, яке описує зварювальна дуга і за його границями характер формування температурного поля буде суттєво різним. Тому виникає необхідність у проведенні додаткових досліджень з метою визначення характеру розподілу тепла в тілі магістрального трубопроводу.

Тимчасова дія високих температур на трубну сталь при одночасній дії внутрішнього тиску може призвести до виникнення пластичних деформацій в металі і втрати міцності.

Поведінці матеріалів при високих температурах присвячено ряд робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників [31, 33, 43, 44, 47, 65, 75], в яких на основі експериментальних досліджень приводяться залежності механічних властивостей матеріалу від температури. Однак, трубна сталь є сплавом, поведінка якого при високих температурах суттєво відрізняється від поведінки чистих металів.

В [69] наведені результати досліджень залежності межі міцності та порогу плинності сталі 20 від температури в межах від 0 С до 600 °С, однак

поведінка трубної сталі в межах більш широкого діапазону температур може суттєво відрізнятися від досліджуваної сталі. Крім того, при вирішенні задачі міцності трубної сталі при високих температурах важлива роль належить модулю пружності, відомості про який відсутні.

1.4. Формування завдань досліджень

Аналіз розвитку газонафтотранспортного комплексу України і технічного стану газонафтопроводів показав, що в останні десятиріччя проводиться формування закільцьованої мережі розподільчих трубопроводів, яка характеризується високою надійністю постачання продуктів споживачам.

З іншого боку, значний термін експлуатації магістральних газонафтопроводів обумовлює зростання частоти відмов на лінійній частині, що призводить до зростання частоти проведення ремонтів.

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

Сама система та обладнання не вирішують технічної задачі безпечного безвогневого вривання в діючий трубопровід. Необхідна технологія вривання, 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.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВРІЗАННЯ В ДІЮЧИЙ ТРУБОПРОВІД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЕФЕКТІВ ПРИ ЦЬОМУ

Процес врізання патрубка-відводу в діючий газонафтопровід під тиском характеризується як небезпечний і в значній мірі непередбачуваний. Це обумовлено комплексом технологічних операцій, кожна з яких може призвести до аварійної ситуації.

На даний час існує велика кількість способів і технологій безвогневого врізання в діючий трубопровід, суть яких зводиться до попереднього приварювання патрубка-відводу до діючої магістралі з наступним монтажем на ньому технологічного обладнання для фрезерного вирізування отвору в стінці магістрального трубопроводу у внутрішній порожнині привареного патрубка. Операція вважається успішно завершеною, якщо в патрубку-відводі створено тиск продукту, і він ізольований від довкілля запірним пристроєм. Однак, існуючі способи не гарантують повної безпеки при виконанні фрезування отвору в стінці магістрального трубопроводу, оскільки для живлення двигуна, що приводить в обертовий рух фрезу, необхідне його під'єднання до зовнішнього джерела з порушенням герметичності системи.

Іншим важливим аспектом, що визначає безпечність технологічного процесу безвогневого врізання в діючий трубопровід, є процес приварювання до магістралі патрубка-відводу. Температурна дія зварювальної дуги як джерела тепла, здатна створити в стінці трубопроводу, який знаходиться під тиском, умови пластичної деформації металу, що може призвести до його руйнування.

Питанням формування температурного поля в пластині від джерела тепла (в тому числі рухомого) присвячено ряд робіт [3, 37, 78, 81, 84]. Однак, криволінійний рух точкового джерела тепла вносить спотворення в формування температурного поля в стінці трубопроводу, що може призвести до системних похибок в результати розрахунків.

2.1. Новий метод безвогневого врізання в трубопровід під тиском

Задача, що ставилась при створенні даного 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, 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 агенту, отвором з пробкою, яка з'єднана з поршнем за допомогою троса для випуску в'язкої рідини та робочого агенту, 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.

На рис. 2.1 показаний загальний вигляд пристрою.

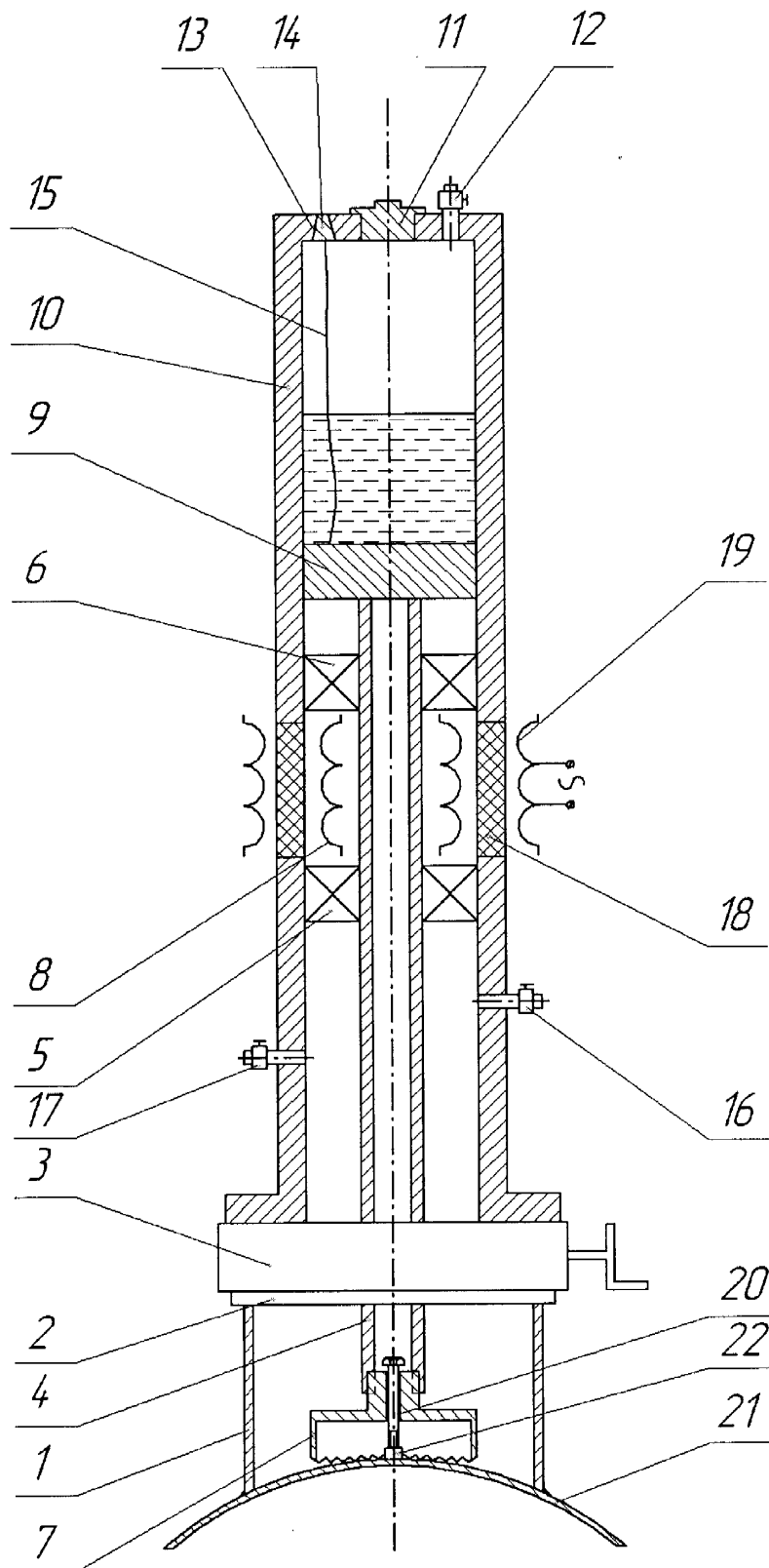


Рис. 2.1. Пристрій для безвогневого врізання відводу в трубопровід

Пристрій містить перехідний патрубок 1 з фланцем 2, засувкою 3, циліндричний корпус 10, в якому розміщено шпindel 4 на підшипниках 5 і 6 з кільцевою фрезою 7, внутрішню обмотку 8, яка розміщена на шпинделі 4, який на кінці оснащений поршнем 9, який виконаний з можливістю переміщення вздовж осі порожнистого циліндричного корпусу 10, що оснащений кришкою 11, краном 12 та отвором 13 з пробкою 14, яка з'єднана з поршнем 9 за допомогою троса 15 у верхній частині та кранами 16 і 17 у нижній. Крім того складовою частиною циліндричного корпусу 10 є ділянка корпусу виконана із пластмаси 18 з зовнішньої сторони якої розміщено статор 19. Для центрування фрези та утримання вирізаної ділянки труби призначений центруючий пристрій, який містить болт 20, що вільно входить в середину фрези, та приварену до трубопроводу 21 гайку 22.

Пристрій працює наступним чином. До трубопроводу 21 приварюють гайку 22 та патрубок 1 з фланцем 2. Болт 20 через фрезу 7 вкручують в гайку 22. Приєднують до патрубку 1 засувку 3, відкривають її і до фрези 7 прикручують шпindel 4. До засувки 3 кріплять нижню частину циліндричного корпусу 10 з підшипником 5, потім на шпindel 4 встановлюють внутрішню обмотку 8, закріплюють пластмасову ділянку корпусу 18 на нижній частині корпусу 10, а до неї кріплять верхню частину циліндричного корпусу 10 з підшипником 6 та поршнем 9, який через отвір, що закривається кришкою 11, встановлюють на шпindel. Через цей отвір, що закривається кришкою 11 заливають в'язку рідину (масло). Через крани 16 і 17 продувають пристрій інертним газом, а по закінченні продувки їх закривають. У порожнину циліндричного корпусу 10 нагнітають тиск, шляхом закачування робочого агента через кран 12, і одночасно підводять струм до зовнішньої обмотки 19. Під дією тиску поршень 9 виконує рух вниз, а внаслідок впливу на ротор 8 сил магнітного поля зовнішньої обмотки 19 ротор 8 разом з шпилем 4 і фрезою 7 починає обертатися. Після закінчення вирізання отвору в трубопроводі 21, пробка 14 за допомогою троса 15 відкриває отвір 13 і під дією тиску транспортованого продукту поршень 9 з шпинделем 4 та фрезою 7 піднімається

вверх, витісняючи через отвір 13 робочий агент та масло, що забезпечує поступове переміщення поршня 9. Одночасно з відкриттям отвору 13 припиняється подача струму до зовнішньої обмотки 19. Після виходу шпинделя 4 з фрезою 7 за межі засувки, останню закривають, через кран 17 зливають транспортований продукт і пристрій демонтують.

Даний пристрій найбільше підходить для виконання безвогневого врізання в трубопроводі будь-якого призначення, оскільки він забезпечує безаварійність проведення робіт при герметичності місця врізання та ріжучого інструменту [12].

2.2. Математичне моделювання розповсюдження тепла в тілі труби при приварюванні відводу

Газопровідний транспорт України на сучасному етапі свого розвитку є однією з провідних галузей народного господарства, від надійного функціонування якої в значній мірі залежить забезпечення потреб вітчизняних споживачів та транзит газу територією України. На сьогодні близько 29% газотранспортної системи України складають газопроводи, що відпрацювали свій амортизаційний термін. Внаслідок тривалого терміну експлуатації відбувається старіння магістральних трубопроводів, тому виникає необхідність у проведенні ремонтних робіт. У разі проведення ремонту без зупинки транспортування продукту зменшуються економічні і екологічні втрати. Одним з видів робіт при такому ремонті є виконання врізання в діючий газопровід.

Необхідність врізання в газопровід також виникає при потребі підключення нових ліній до діючого трубопроводу, для влаштування камер прийому і пуску різних пристроїв, для влаштування обвідних ліній (байпасів).

Зазвичай врізання в газопровід без зупинки транспортування виконують (як говорилося раніше) за наступною схемою: 1) до трубопроводу приварюється патрубок з фланцем до якого прикріплено засувку; 2) на засувку кріпиться пристрій для врізання з шпинделем і фрезою, за допомогою якого

проводять врізання; 3) після виконання врізання шпиндель з фрезою виводиться за межі засувки, останню закривають, а пристрій демонтують.

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.

Розглянемо тонку безмежну пластинку, товщиною 2δ , що нагрівається лінійним джерелом тепла, яке рухається по колу паралельно осі z . Потужність одиниці довжини джерела тепла q є сталою величиною, а радіус кола, яким рухається джерело, дорівнює r_0 . З граничних поверхонь пластинки $z = \delta$ і $z = -\delta$ має місце тепловіддача в навколишнє середовище за законом Ньютона. При цьому $\alpha^+ = \alpha^- = \alpha$, $t_c^+ = t_c^- = t_c$ (тут α^\pm – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь $z = \pm\delta$; t_c^\pm – температура навколишнього середовища). Необхідно для даного випадку вивести диференціальне рівняння теплопровідності, що описує температурне поле в пластинці.

В монографії [71], застосовуючи оперативний метод для нестационарних задач теплопровідності тонких пластинок в комплексі з методом усередження температури по товщині пластинки, отримано таку наближену систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \Lambda \Delta T - \left[\frac{\partial T}{\partial \tau} - \alpha_+ (T - t_+^c) - \alpha_- (T^* - t_-^c) \right] &= -w, \\ \Lambda \Delta T^* - C \frac{\partial T^*}{\partial \tau} - 3 \left[\left(\alpha_+ + \frac{4}{R} \right) T^* - \alpha_+ t_-^c - \alpha (T - t_+^c) \right] &= -w^*, \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

λ , C_V – коефіцієнти теплопровідності і об'ємної теплоємності матеріалу пластинки;

Δ – оператор Лапласа (в циліндричній плоскій системі координат $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$);

T і T^* – інтегральні характеристики температури пластинки ($T = \frac{1}{2\delta} \int_{-\delta}^{\delta} t dz$, $T^* = \frac{3}{2\delta^2} \int_{-\delta}^{\delta} zt dz$);

$$w = \int_{-\delta}^{\delta} W dz, w^* = \frac{3}{\delta} \int_{-\delta}^{\delta} zW dz;$$

t – температурне поле пластинки.

Залежність між температурою пластинки і її інтегральними характеристиками має вигляд:

$$t = T + \frac{z}{\delta} T^*. \quad (2.2)$$

Якщо коефіцієнти теплообміну з бокових поверхонь пластинки $z = \pm\delta$ рівні ($\alpha^+ = \alpha^- = \alpha$), то система (2.1) розділяється і буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \Lambda \Delta T - C \frac{\partial T}{\partial \tau} - 2\alpha T &= -2\alpha t_+^c - w, \\ \Lambda \Delta T^* - C \frac{\partial T^*}{\partial \tau} - 12 \left(\frac{1}{R} + \frac{\alpha}{2} \right) T^* &= -6\alpha t_-^c - w^*. \end{aligned} \quad (2.3)$$

В нашому випадку задача теплопровідності симетричних відносно серединної площини пластинки, тобто $t_c^+ = t_c^- = t_c$, $\alpha^+ = \alpha^- = \alpha$, $w^* = 0$, $T^* = 0$, тому замість (2.3) отримуємо:

$$\Delta T - \chi^2(T - t_c) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{w}{2\lambda\delta}, \quad (2.4)$$

$$\text{де } \chi^2 = \frac{\alpha}{\lambda\delta}.$$

Встановимо вигляд диференціального рівняння (2.4) у випадку джерела тепла, що рухається по колу, використовуючи плоску циліндричну систему координат.

Якщо лінійне джерело тепла зосереджено вздовж осі z в точці M_0 з координатами $r = r_0$, $\varphi = \varphi_0$, то, як відомо [30], функція розподілених джерел тепла в пластинці буде:

$$W(r, \varphi) = \frac{q_1}{r} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \varphi_0), \quad (2.5)$$

де q_1 – потужність одиниці довжини лінійного джерела тепла, Вт/м;

$\delta(r - r_0)$, $\delta(\varphi - \varphi_0)$ – дельта-функції Дірака.

Для лінійного джерела тепла, яке обертається з кутовою швидкістю ω , кутова координата точки M_0 буде $\varphi_0 + \omega\tau$. Тому (2.5) можна переписати так:

$$W(r, \varphi) = \frac{q}{r} \delta(r - r_0) \delta[\varphi - (\varphi_0 + \omega\tau)]. \quad (2.6)$$

При цьому:

$$w = \frac{2\delta q}{r} \delta(r - r_0) \delta[\varphi - (\varphi_0 + \omega\tau)]. \quad (2.7)$$

Приймаємо $\varphi_0=0$ і результат (2.7) підставляємо у (2.4). В результаті отримаємо:

$$\Delta T - \chi^2(T - t_c) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \omega \tau). \quad (2.8)$$

Дане диференціальне рівняння (2.8) є шуканим.

Розглядається тонка безмежна ізотропна пластинка, в якій по колу рухається лінійне джерело тепла. Для такої пластинки, як це було показано раніше, маємо таке диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} - \chi^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \omega \tau). \quad (2.9)$$

Додаємо до рівняння (2.8) початкову і граничні умови:

$$T|_{\tau=0} = 0, T|_{r=\infty} = 0, \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=\infty} = 0. \quad (2.10)$$

Задачу (2.9), (2.10) розв'язуємо, користуючись інтегральними перетвореннями. По змінній φ застосовуємо інтегральне перетворення Фур'є [53]:

$$\bar{T} = \int_c^{2\pi} T K_\gamma(\varphi) d\varphi, \quad \gamma = \begin{cases} 2n \\ 2n - 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{де } K_{2n}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \cos n\varphi, \quad K_{2n-1}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \sin n\varphi.$$

В результаті застосування даного перетворення Фур'є отримуємо:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} \bar{T} - \chi^2 \bar{T} = \frac{1}{a} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \bar{f}_\gamma(n, \tau), \quad (2.12)$$

$$\bar{T}_{/r=0} = 0, \bar{T}_{/r=\infty} = 0, \frac{\partial \bar{T}}{\partial r}_{/r=\infty} = 0. \quad (2.13)$$

$$\text{тут } \bar{f}_{2n}(n, \tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos n\varphi \cdot \delta(\varphi - \omega\tau) d\varphi = \frac{1}{\pi} \cos n\omega\tau,$$

$$\bar{f}_{2n-1}(n, \tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin n\varphi \cdot \delta(\varphi - \omega\tau) d\varphi = \frac{1}{\pi} \sin n\omega\tau.$$

Далі знаходимо інтегральне перетворення Ханкеля [53] по змінній r до задачі (2.12), (2.13):

$$\bar{\bar{T}}(p, n, \tau) = \int_0^{\infty} r J_n(pr) \bar{T}(r, n, \tau) dr, \quad (2.14)$$

де $J_n(pr)$ - функція Бесселя першого роду n -ного порядку.

При цьому будемо мати:

$$\frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}}{\partial \tau^2} + a(p^2 + \kappa^2) \bar{\bar{T}} = \frac{qa}{\lambda} \bar{f}_\gamma(n, \tau) J_n(pr), \quad (2.15)$$

$$\bar{\bar{T}}_{/r=0} = 0. \quad (2.16)$$

Розв'язок звичайного диференціального рівняння (2.15) за умови (2.16) має такий вигляд (в даному випадку одержуємо два розв'язки, оскільки функція \bar{f}_γ має два різних вигляди при $\gamma = 2n$ і $\gamma = 2n - 1$. Позначимо ці розв'язки $\bar{\bar{T}}_{2n}$ і $\bar{\bar{T}}_{2n-1}$):

$$\begin{aligned} \bar{\bar{T}}_{2n} &= \frac{qa J_n(pr_0)}{\pi\lambda[a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2]} \{[a(p^2 + \kappa^2) \cos n\omega\tau + \\ &\quad + n\omega \sin n\omega\tau] - a(p^2 + \kappa^2)e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau}\}, \\ \bar{\bar{T}}_{2n-1} &= \frac{qa J_n(pr_0)}{\pi\lambda[a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2]} \{[a(p^2 + \kappa^2) \sin n\omega\tau - \\ &\quad - n\omega \cos n\omega\tau] + n\omega e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau}\}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Знаходимо обернені перетворення Ханкеля:

$$\begin{aligned}
 \bar{T}_{2n} &= \int_0^\infty p J_n(pr) \bar{T}_{2n} dp = \frac{qa^2}{\pi\lambda} \cos n\omega\tau \times \\
 &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} (p^2 + \kappa^2) dp + \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \sin n\omega\tau \times \\
 &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \frac{qa^2}{\pi\lambda} \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} \times \\
 &\quad \times (p^2 + \kappa^2) e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} dp, \\
 \bar{T}_{2n-1} &= \int_0^\infty p J_n(pr) \bar{T}_{2n-1} dp = \frac{qa^2}{\pi\lambda} \sin n\omega\tau \times \\
 &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} (p^2 + \kappa^2) dp - \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \cos n\omega\tau \times \\
 &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp + \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} \times \\
 &\quad \times e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} dp.
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Обернене перетворення Фур'є функцій (2.18) визначається за формулою:

$$T = \sum_{n=0}^{\infty}{}' (\bar{T}_{2n} \cos n\varphi + \bar{T}_{2n-1} \sin n\varphi) \tag{2.19}$$

де (') після знака суми означає, що доданок при $n=0$ містить множник

В результаті застосування оберненого перетворення (2.19) отримуємо:

$$\begin{aligned}
 T = & \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ a \cos n(\varphi - \omega\tau) \int_0^{\infty} \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \right. \\
 & - n\omega \sin n(\varphi - \omega\tau) \int_0^{\infty} \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\
 & - e^{-a\kappa^2\tau} \left[a \cos n\varphi \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp - \right. \\
 & \left. \left. - n\omega \sin n\varphi \int_0^{\infty} \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp \right] \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Безпосередньою підстановкою (2.20) в (2.9) і (2.10) переконуємося, що функція (2.20) є розв'язком поставленої задачі.

В монографії [38] розглядається аналогічна задача для анізотропної пластинки при нульовій температурі навколишнього середовища і початковій температурі пластинки $f(r, \varphi)$.

В даній задачі початкова температура пластинки та навколишнього середовища прийнята рівною нулю. Якщо ж ця температура відмінна від нуля, наприклад рівна t_c , то до розв'язку (2.20) необхідно додати t_c .

2.3. Реалізація математичної моделі

Реалізація (2.20) передбачає наближене інтегрування складних математичних залежностей, які включають функції Бесселя. Тому підінтегральна функція в загальному вигляді є осцилюючою. Для виконання інтегрування необхідно шукати нульові значення підінтегральної функції і проводити інтегрування на кожній ділянці між сусідніми нулями.

Для реалізації алгоритму розроблено блок підпрограм, кожна з яких виконує певну функцію. Перелік ідентифікаторів для реалізації алгоритму в програму розрахунку на алгоритмічній мові ФОРТРАН приведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Перелік ідентифікаторів програми TENST1 головної програми

Величина	Позначення	
	У формулах (6), (7), (9)	В програмі
Число π	π	PI
Коефіцієнт теплопровідності ґрунту	λ	LAMBDA
Глибина розміщення джерел тепла	h_0	HØ
Коефіцієнт тепловіддачі з ґрунту в повітря	α_n	ALFAP
Відстань між джерелами тепла	l_0	ELØ
Потужність джерел тепла	q	Q
Коефіцієнт температуропровідності	a	AK
Постійна Ейлера	C	C
Час	τ	TAY
Коефіцієнти квадратурної формули Гаусса	-	A(I), I=1,2,...,6
Нулі полінома Лежандра	-	U(I), I=1,2,...,6
Координати точок	x,y	X,Y
Нулі підінтегральних функцій інтегралів (6), (7), (9)	-	E
Аргумент інтегрування в інтегралах (6), (7), (9)	p	PE
Відношення α_n/λ	h	H
Масив розподілу	$T_2(x,y)$	TE (I, J)
Підпрограми-функції	-	FNS1(X,Y,PE,TAY)
	-	FNS2(X,Y,PE,TAY)
	-	FNS3(X,Y,PE,TAY)
	-	FNS4(X,Y,PE,TAY)
	-	FNS5(X,Y,PE,TAY)
	-	OMKOR (D,X)
	-	ER (Z)

Підпрограма-функція FNS1 забезпечує обчислення частини підінтегральної функції інтеграла (2.20), а саме:

$$f_1(x, y, \tau, p) = \frac{1}{p} \cos px \cdot \cos p \frac{l_0}{2} \cdot \frac{1}{2} [e^{-p(h_0-y)} \operatorname{erfc}\left(\frac{h_0-y}{2\sqrt{a\tau}} - p\sqrt{a\tau}\right) - e^{-p(h_0-y)} \operatorname{erfc}\left(\frac{h_0-y}{2\sqrt{a\tau}} + p\sqrt{a\tau}\right)] \quad (2.21)$$

для будь-яких значень координат x , y , часу τ і аргумента інтегрування p (величини x , y , τ і p передаються в підпрограму-функцію із головної програми).

Для обчислення спеціальної функції $\operatorname{erfc}(v)$ використовується апроксимація цієї функції за допомогою раціональних функцій, яка забезпечує високу точність результату

$$\operatorname{erfc}(v) = (a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4 + a_5 z^5) e^{-v^2} + \varepsilon(v),$$

$$z = \frac{1}{1 + sv}, \quad |\varepsilon(v)| \leq 1,5 \cdot 10^{-7}, \quad (2.22)$$

$$s = 0,3275911, \quad a_1 = 0,254829592, \quad a_2 = 0,284496736,$$

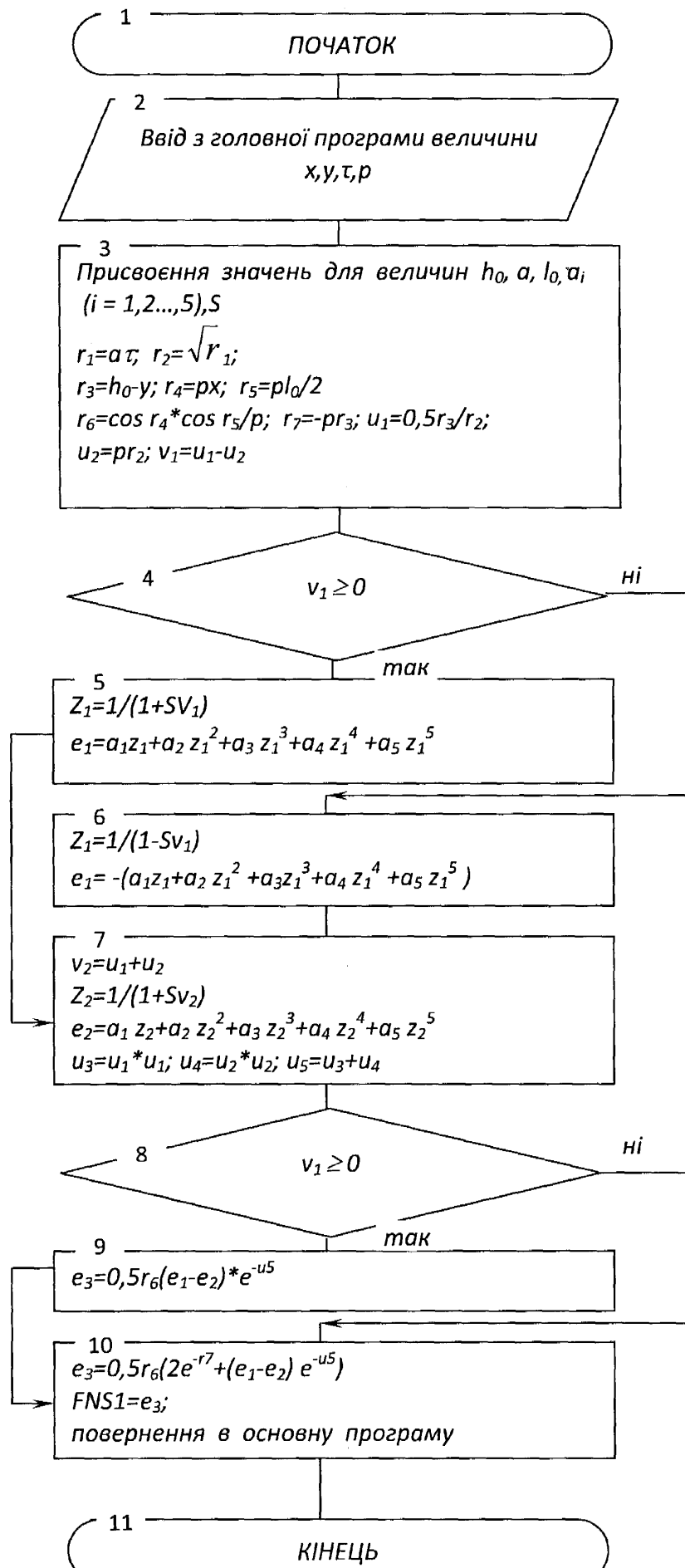
$$a_3 = 1,421413741, \quad a_4 = -1,453152027, \quad a_5 = 1,061405429.$$

Таблиця 2.2.

Перелік ідентифікаторів підпрограми-функції FNS1, відмінних від головної програми і блок-схеми підпрограми-функції

В е л и ч и н а	Позначення	
	В даному тексті	В програмі
1	2	3
Коефіцієнти, що входять у формулу (13) ($a_i, i=1,2,\dots,5$)	a_1, a_2, a_3, a_4, a_5	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5
Коефіцієнт S	S	S
Величини $r_i, i=1,2,\dots,7$	$r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7$	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7
Величини u_1, u_2, v_1, v_2	u_1, u_2, v_1, v_2	U_1, U_2, V_1, V_2
Величини z_1, z_2, e_1, e_2, e_3	z_1, z_2, e_1, e_2, e_3	Z_1, Z_2, E_1, E_2, E_3
Величини u_3, u_4, u_5	u_3, u_4, u_5	U_3, U_4, U_5

Блок-схема підпрограми-функції FNS1



Підпрограма-функція FNS3 забезпечує обчислення частини підінтегральної функції інтеграла (2.20), а саме

$$f_3(x, y, p, \tau) = \frac{1}{p} \cos px \cdot \cos p \left(\frac{pl_0}{2} \right) \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{p-h}{2(h+p)} e^{p(h_0+y)} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{h_0+y}{2\sqrt{a\tau}} + p\sqrt{a\tau} \right) - \\ - \frac{2ph}{h^2-p^2} e^{h(h_0+y)+(h^2-p^2)a\tau} \operatorname{erfc} \left(\frac{h_0+y}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau} \right) \end{array} \right] \quad (2.23)$$

для будь-яких значень координат x , y , часу τ і аргументу інтегрування p (величини x , y , τ і p передаються у підпрограму - функцію із головної програми).

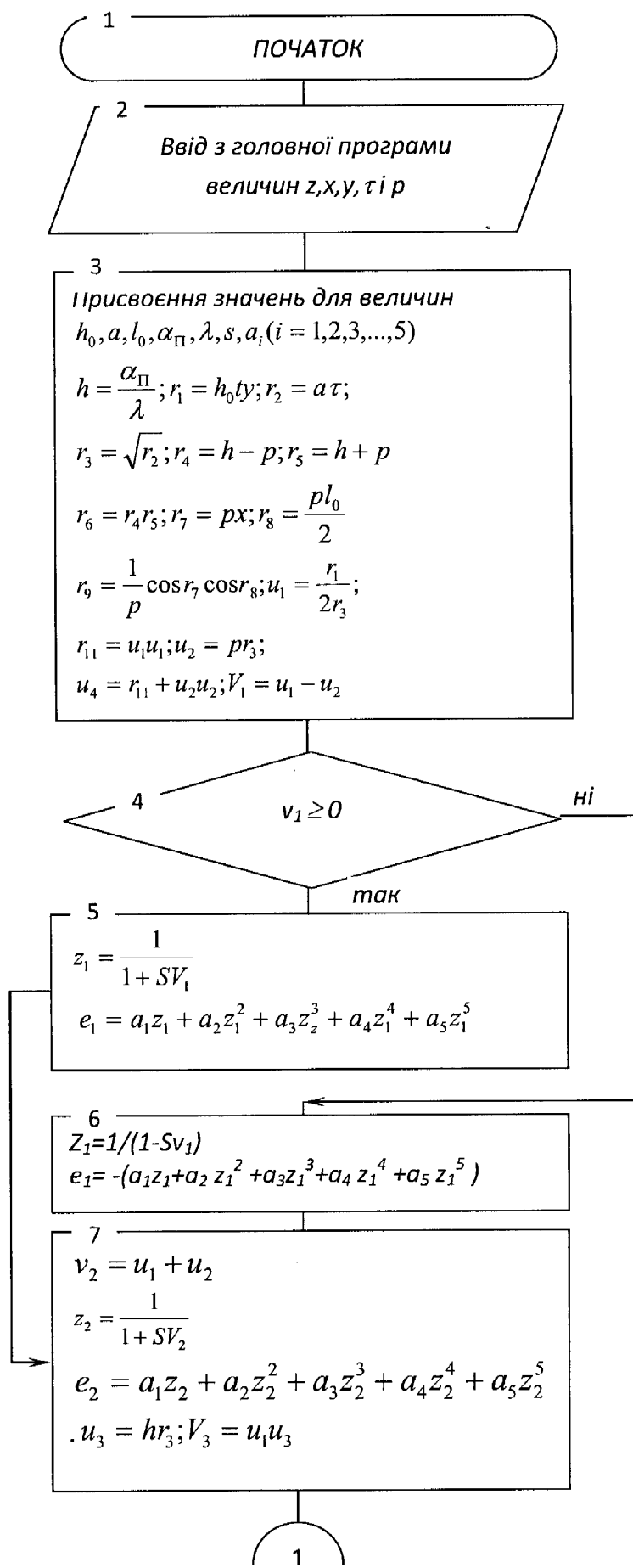
Для обчислення спеціальної функції $\operatorname{erfc}(v)$ використовується, як і в підпрограмі FNS1 апроксимація цієї функції за допомогою раціональних функцій (див. формулу (2.22)).

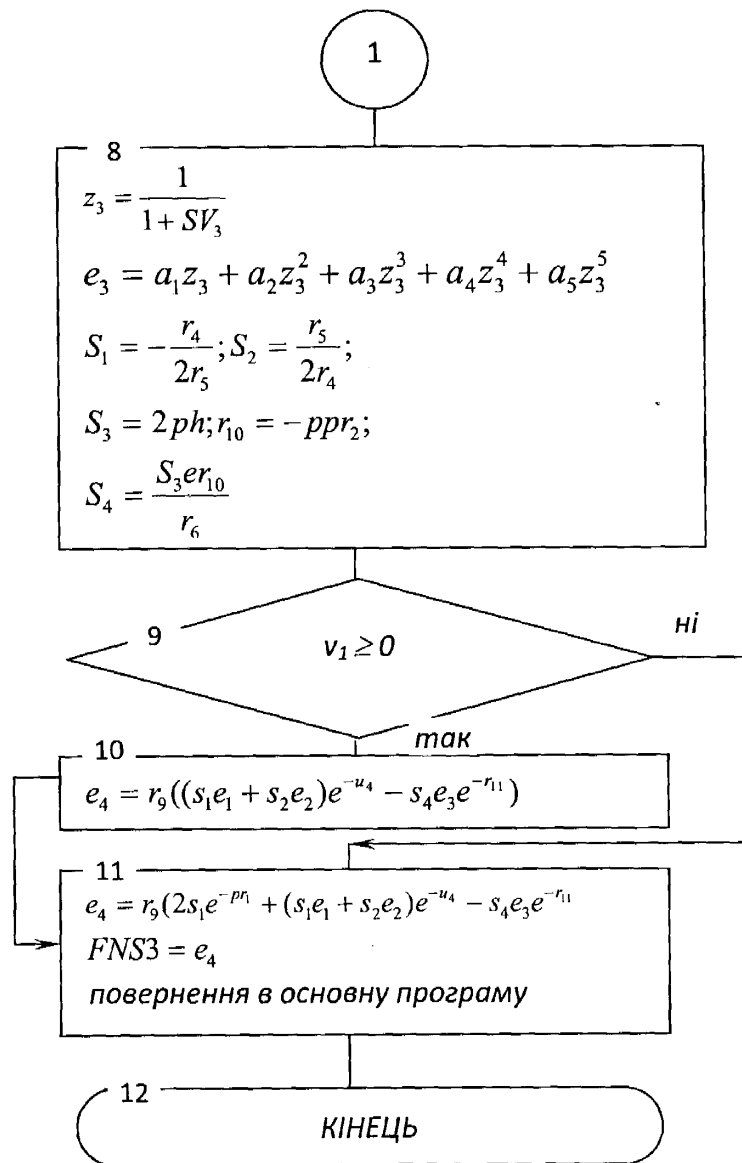
Таблиця 2.3.

Перелік ідентифікаторів підпрограми-функції FNS3, відмінних від головної програми і блок-схеми підпрограми-функції

Величина	Позначення	
	в формулі (14)	в підпрограмі-функції
Коефіцієнт, що входять у формулу (13)	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, S$	A1, A2, A3, A4, A5, S
Величини r_i ($i=1,2,\dots,11$) з блок-схеми	$r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, r_{11}$	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11
Величини u_i ($i=1,2,3,4$) з блок-схеми	u_1, u_2, u_3, u_4	U1, U2, U3, U4
Величини v_i ($i=1,2,3$), z_i ($i=1,2,3$) з блок-схеми	$v_1, v_2, v_3, z_1, z_2, z_3$	V1, V2, V3, Z1, Z2, Z3
Величини e_i ($i=1,2,3,4$) з блок-схеми	e_1, e_2, e_3, e_4	E1, E2, E3, E4

Блок-схема підпрограми-функції FNS3





Підпрограма-функція ОМКОР забезпечує визначення нулів підінтегральних функцій в інтегралі (2.20).

Це у свою чергу забезпечує визначення інтервалів зміни аргумента інтегрування, на яких підінтегральна функція має один і той же знак.

Інтегрування в програмі TENST1 здійснюється на кожному такому інтервалі окремо при використанні квадратурної формули Гауса.

Підпрограма-функція ОМКОР забезпечує визначення нулів підінтегральних функцій у такий спосіб: оскільки зміна знаку підінтегральної функції в інтегралі (2.20), викликана множником $\cos px \cos(pl_0/2)$, то шукаються нулі саме цього множника при зміні аргумента інтегрування p . Для цього знаходиться інтервал, на якому цей множник змінює свій знак, а далі методом хорд визначається нуль для функції $\cos px \cos(pl_0/2)$.

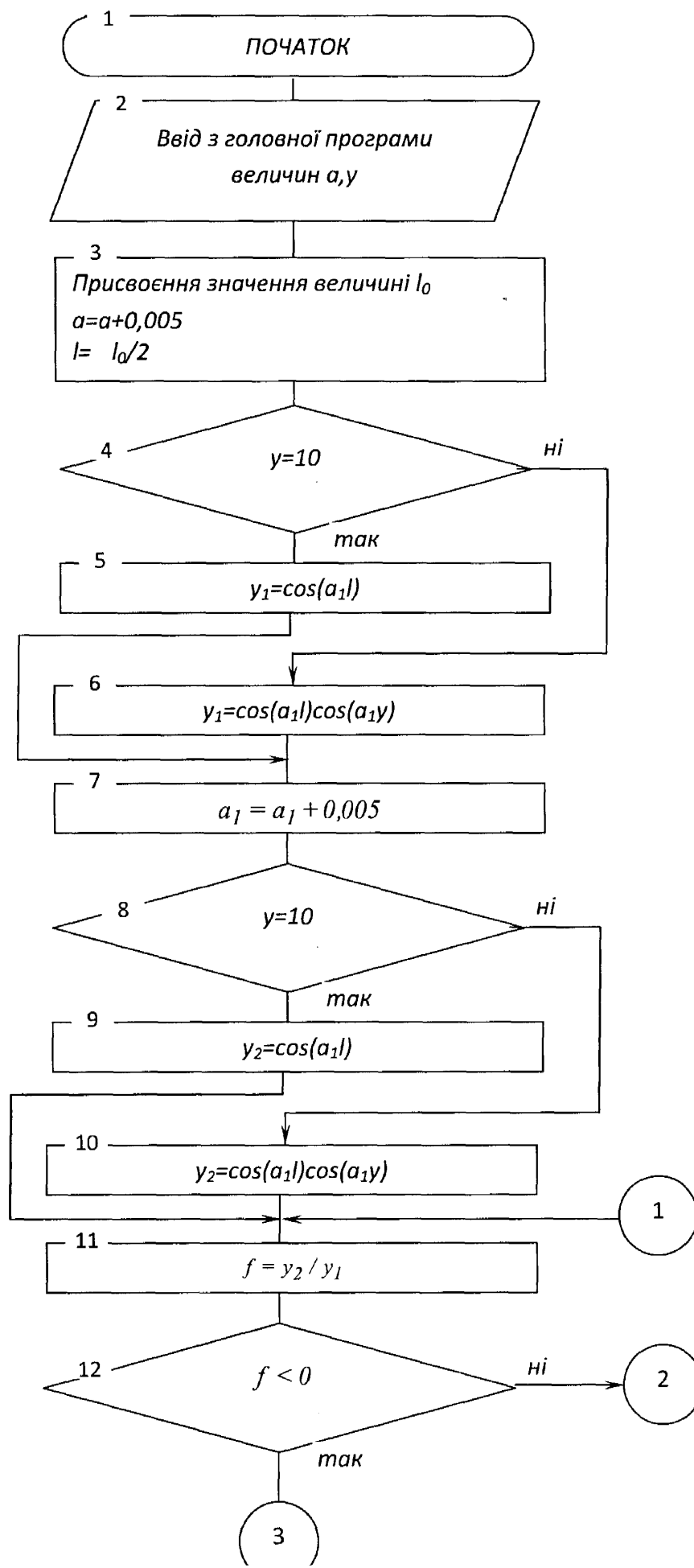
Таблиця 2.4.

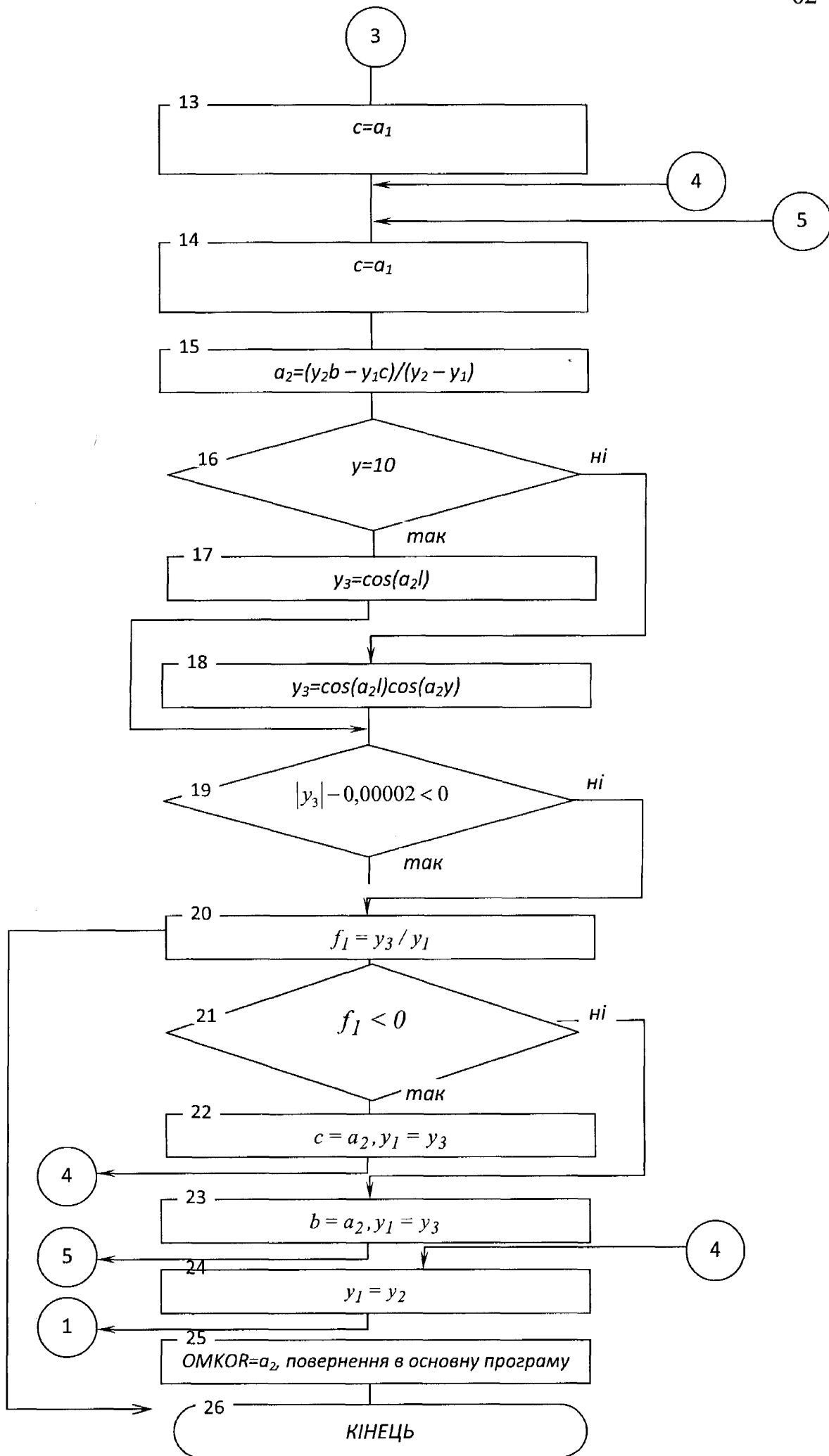
Перелік деяких ідентифікаторів підпрограми-функції ОМКОР

Величина	Позначення	
	в блок-схемі	В підпрограмі-функції
Відстань між джерелами тепла	l_0	$EL\emptyset$
Змінюваний аргумент косинуса (в програмі TENST 1 аргумент інтегрування)	a	A
Координата точки у функції добутку косинусів	y	Y

На наступній сторінці приведена блок-схема підпрограми-функції ОМКОР.

Блок-схема підпрограми-функції ОМКОР





2.4. Результати розрахунків та їх аналіз

В результаті реалізації математичної моделі, приведеної у вигляді (2.20), отримано масиви значень температур стінки труби при різному положенні зварювальної дуги в залежності від полярних координат (кута повороту і радіуса) та часу (додаток А). Розрахункова схема приведена на рис. 2.2. Положення зварювальної дуги під час приварювання патрубків відводу в залежності від часу τ показано на рис. 2.3. Результати розрахунків у вигляді графіків приведено на рис. 2.4-2.17.

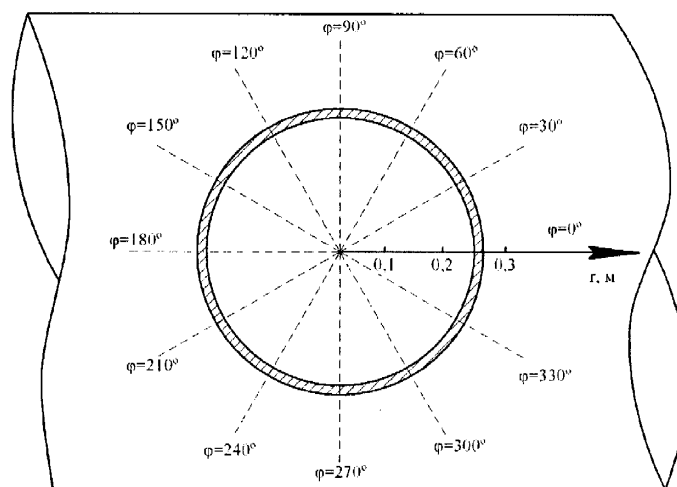


Рис. 2.2. Розрахункова схема приварювання патрубка-відводу

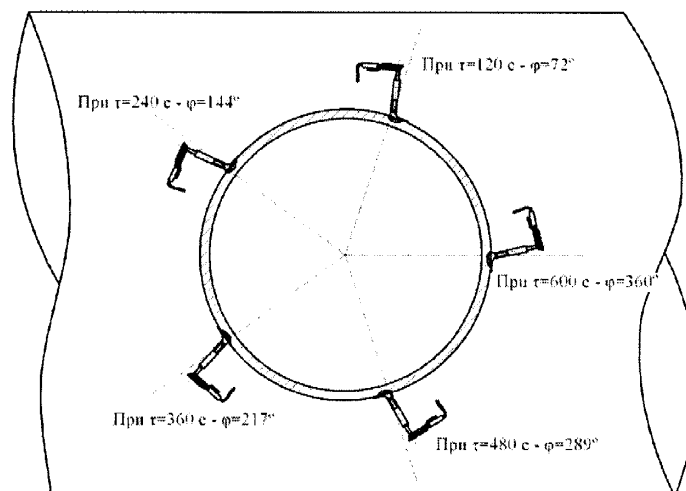


Рис.2.3. Положення зварювальної дуги в різні моменти часу

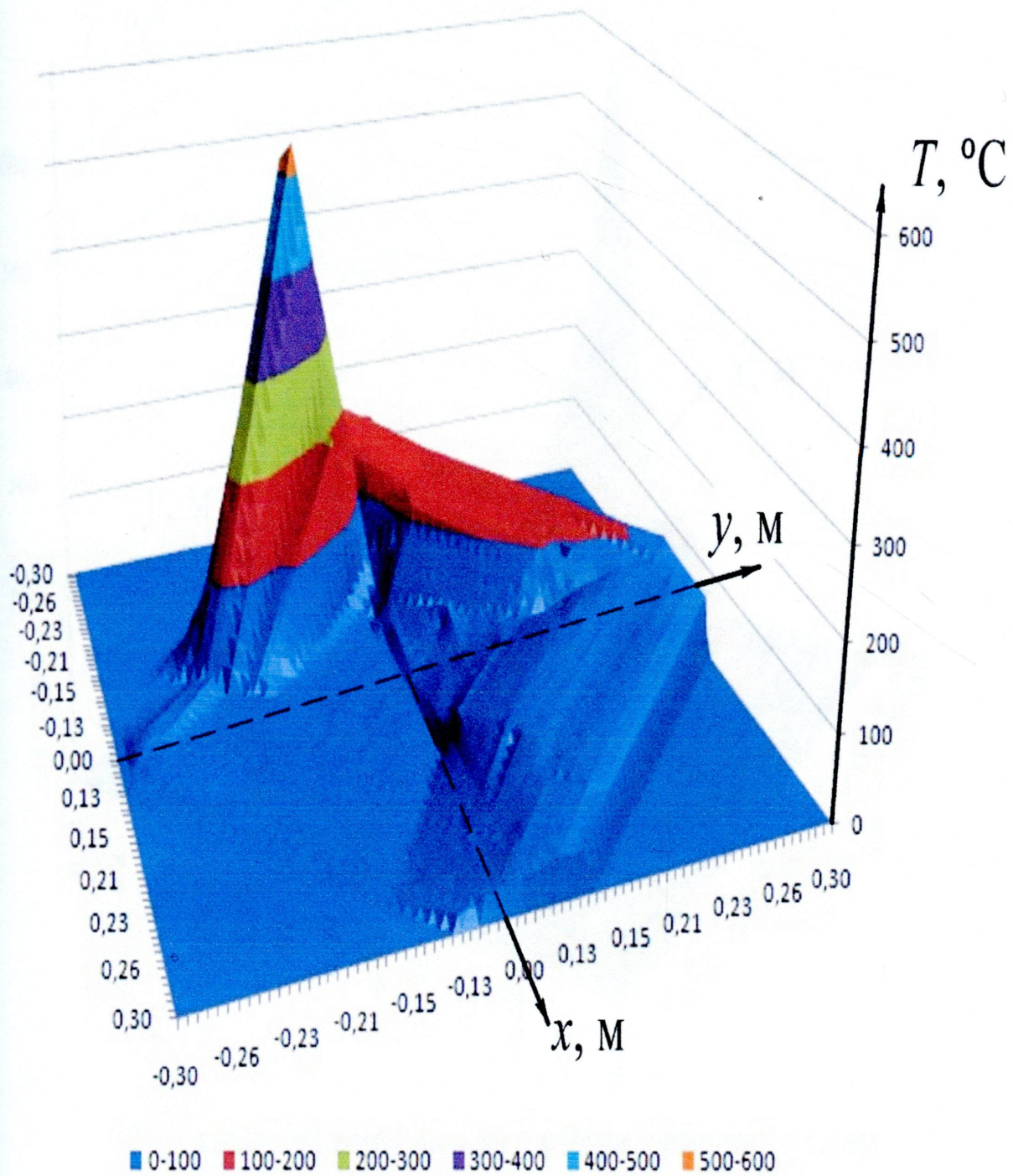


Рис. 2.4. Розподіл температури в стінці трубопроводу під час приварювання патрубків-відводу в момент часу 360 с

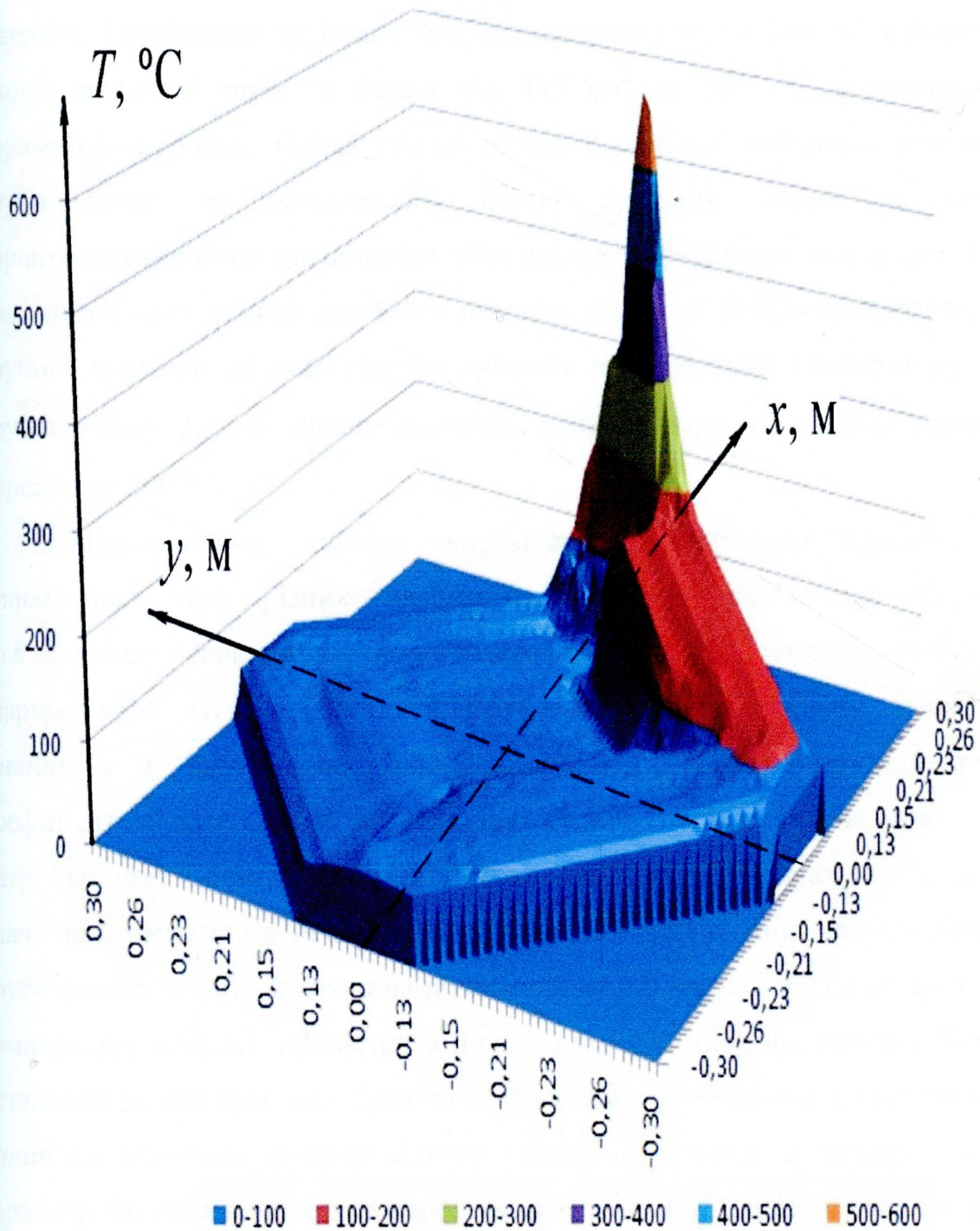


Рис. 2.5. Розподіл температури в стінці трубопроводу під час приварювання патрубка-відводу в момент часу 600 с

Аналіз одержаних графічних залежностей показує, що нагрівання трубопроводу рухомим джерелом тепла відбувається локально в околі діючого джерела. Нагрівання трубопроводу до температури до 200 °С займає значну площу поверхні труби в межах від 449 см² до 668 см² 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 °С. 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 ω , на якій температура перевищує 200 °С.

Моделювання процесу нагрівання трубопроводу рухомою дугою проводилось при різних параметрах режиму зварювання. Серед них розглядалися: швидкість руху джерела тепла v , теплова інтенсивність зварювальної дуги q , загальна інтенсивність охолодження стінки труби зовнішнім і внутрішнім теплоносіями, що характеризується зведеним коефіцієнтом теплообміну λ , матеріал стінки труби та її товщина δ , діаметр патрубку, що приварюється D . Було виконано 21 розрахунок при різних значеннях параметрів процесу. В результаті встановлено, що матеріал стінки труби (марка сталі) і її товщина практично не впливають на характер розподілу температур, тому ці параметри з подальшого розгляду виключено. Крім того, встановлено, що при діаметрах приварювального патрубка понад 50 мм його вплив на величини функції-відгуку також несуттєвий, в зв'язку з чим цей параметр також виключено з переліку визначальних. Отже, величини функції-відгуку розглядалися в залежності від швидкості руху джерела тепла v , теплової інтенсивності зварювальної дуги q , загальної інтенсивності охолодження стінки труби зовнішнім і внутрішнім теплоносіями, що характеризується зведеним коефіцієнтом теплообміну λ . Було встановлено на основі реалізації моделі, що при швидкості руху зварювальної дуги 1 см/хв. і її тепловій інтенсивності

1000 Вт і практично при відсутності теплообміну ($\lambda=0,1$ Вт/м²·К) максимальна миттєва температура при $\tau = 120$ с складає 788 °С, а площа поверхні труби, на якій температура перевищує 200 °С, складає 39,3 см².

Ці параметри були прийняті за екстремальні, а величини значень функції-відгуку визначались відношеннями конкретних значень максимальної температури до екстремального її значення $\bar{T} = T_{\max} / T_{\max}^{ex}$ та відношенням площі, на якій температура перевищує 200 °С в кожному розрахунку, до її екстремального значення $\bar{\omega} = \omega_{200} / \omega_{200}^{ex}$.

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 з 1 см/хв. до 5 см/хв. (тобто в 5 разів) величина відносної температури складе $\bar{T} = 0,795$, а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, становить $\bar{\omega} = 0,897$. Збільшення швидкості руху зварювальної дуги до 10 см/хв. (тобто в 10 разів по відношенню до базової) призводить до зменшення відносної максимальної температури до величини $\bar{T} = 0,621$, а відносної площі поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, - до $\bar{\omega} = 0,788$.

Зменшення теплової інтенсивності зварювальної дуги, що рухається по колу з сталою швидкістю, як теплового джерела до 800 Вт, тобто на 80%, призводить до зниження максимальної відносної температури до $\bar{T} = 0,815$, а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, при цьому становить $\bar{\omega} = 0,917$. При інтенсивності теплового джерела 500 Вт (зниження в порівнянні з базовим варіантом на 50%) спостерігається зменшення максимальної відносної температури до $\bar{T} = 0,815$, а відносна площа поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, 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 °С, які є критеріями безпеки процесу.

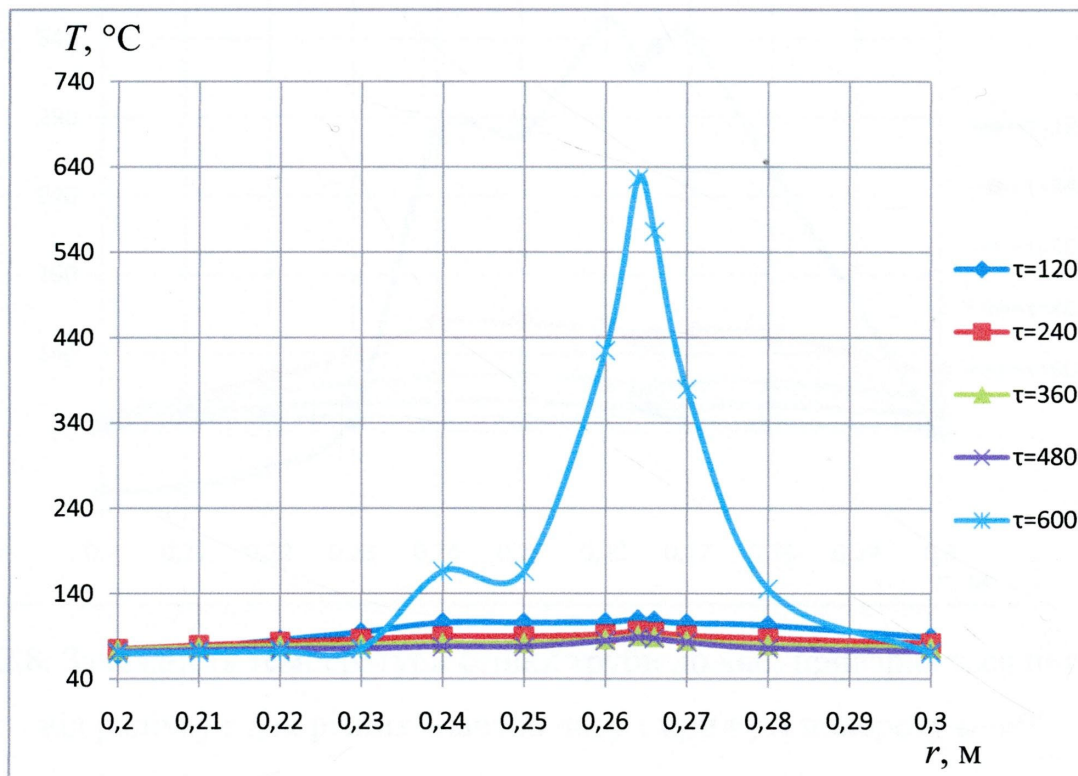


Рис. 2.6. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=0^\circ$

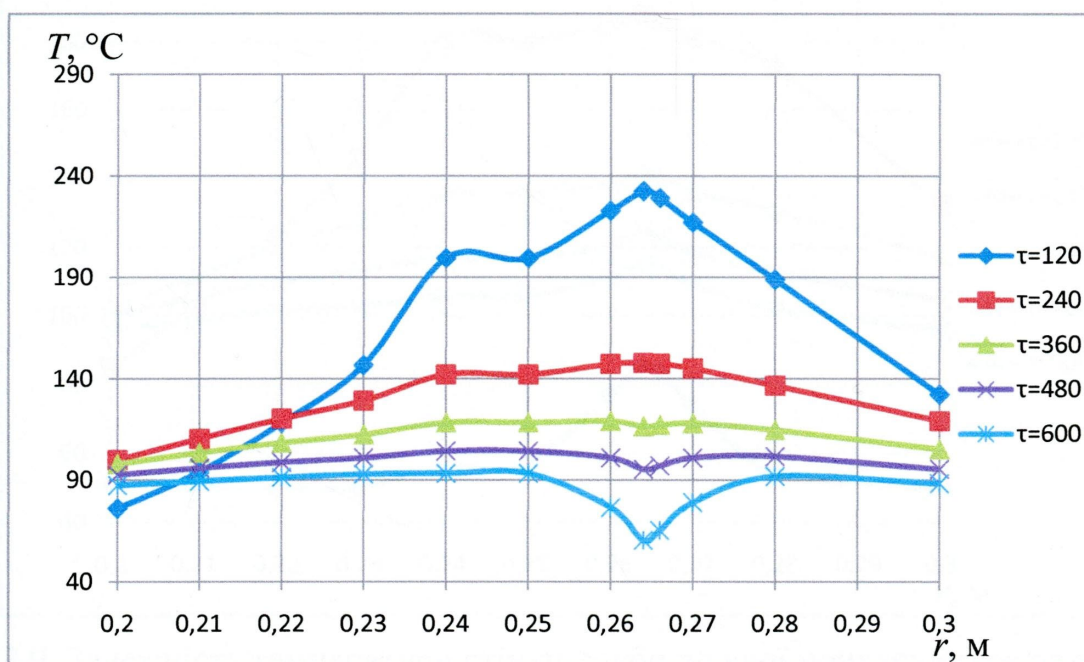


Рис. 2.7. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=30^\circ$

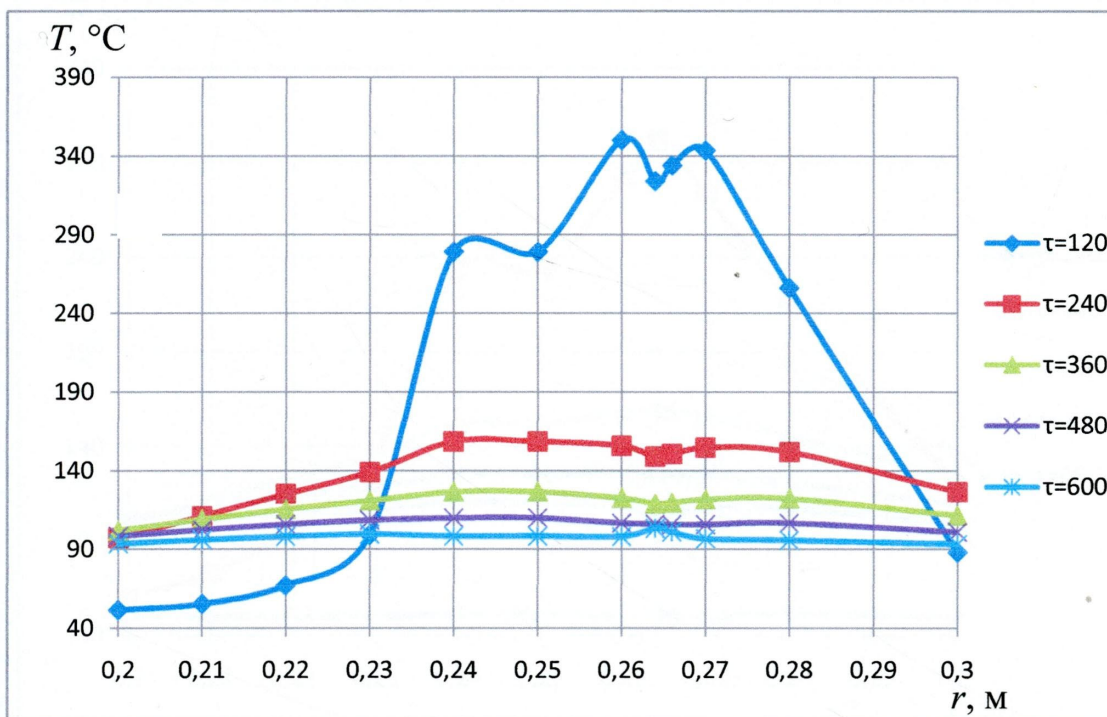


Рис. 2.8. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=60^\circ$

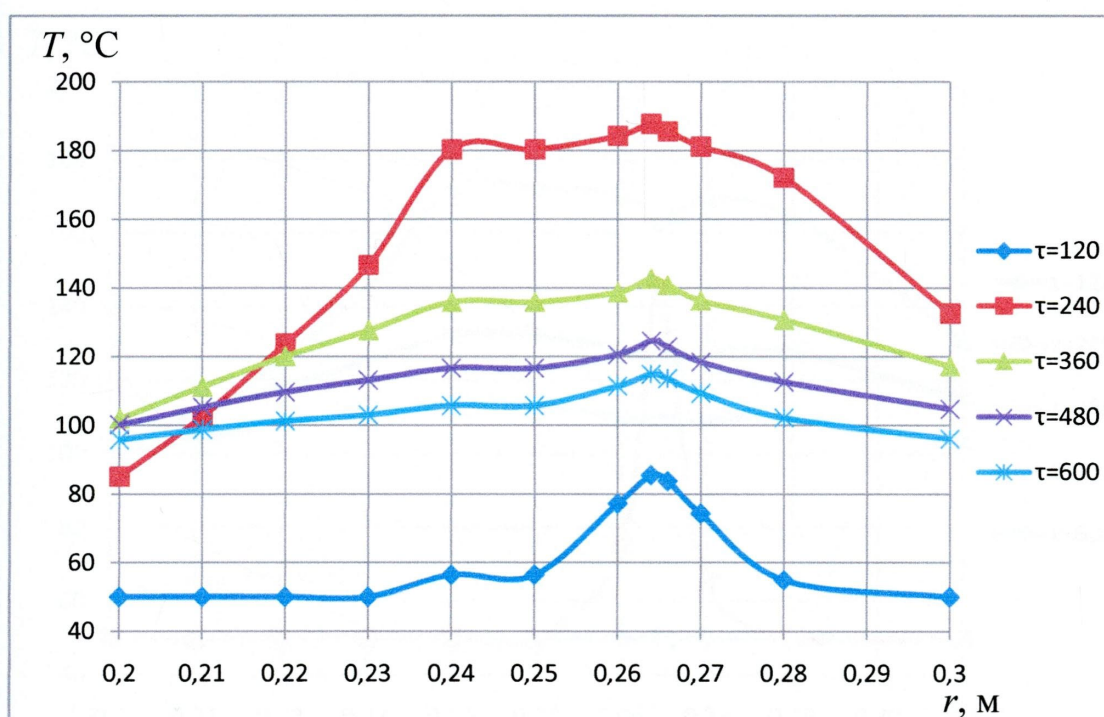


Рис. 2.9. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=90^\circ$

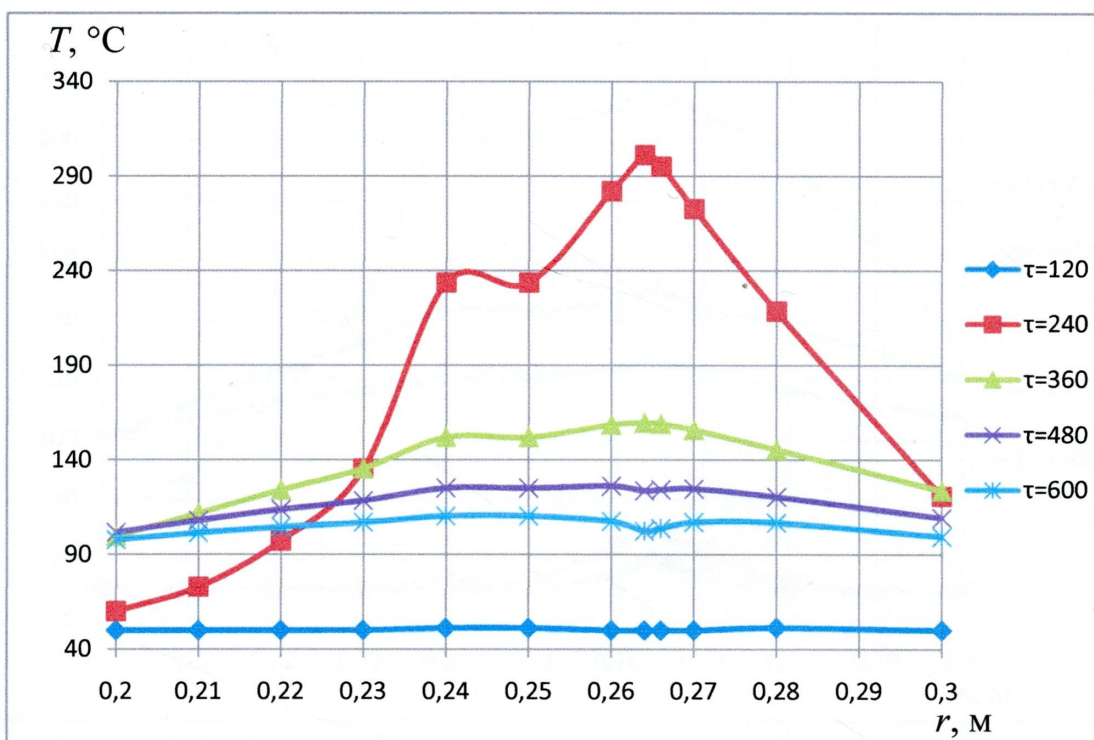


Рис. 2.10. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубок від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=120^\circ$

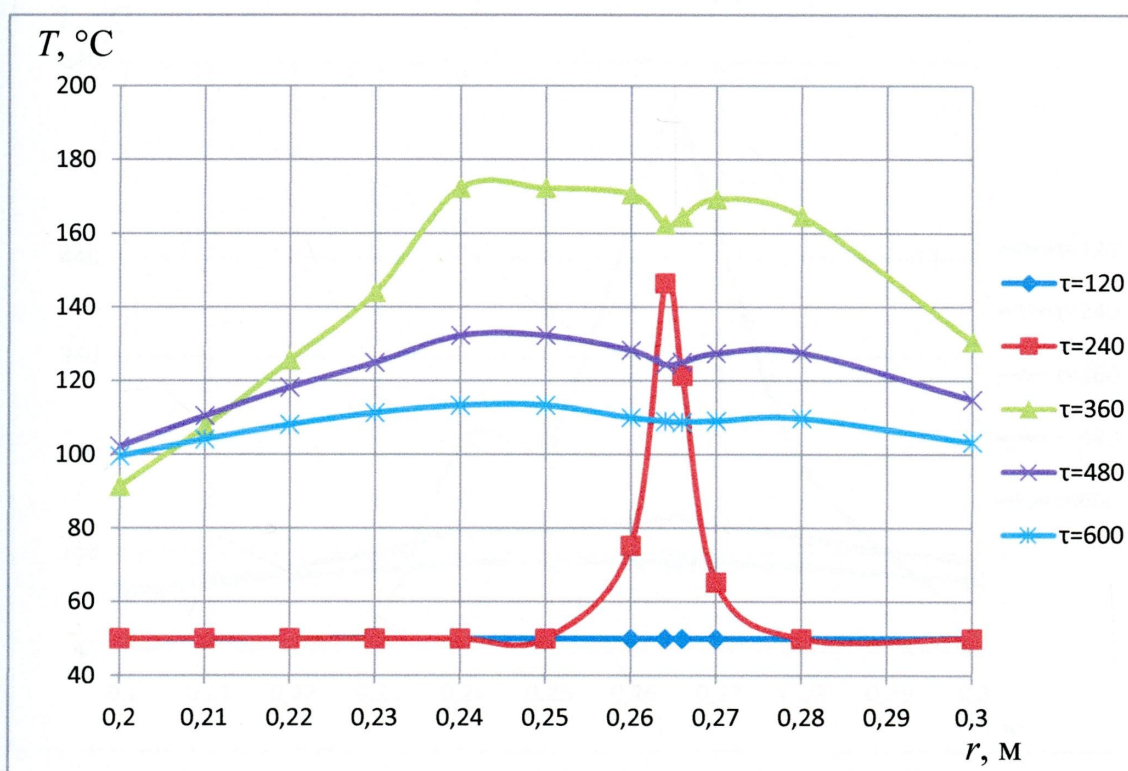


Рис. 2.11. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубок від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=150^\circ$

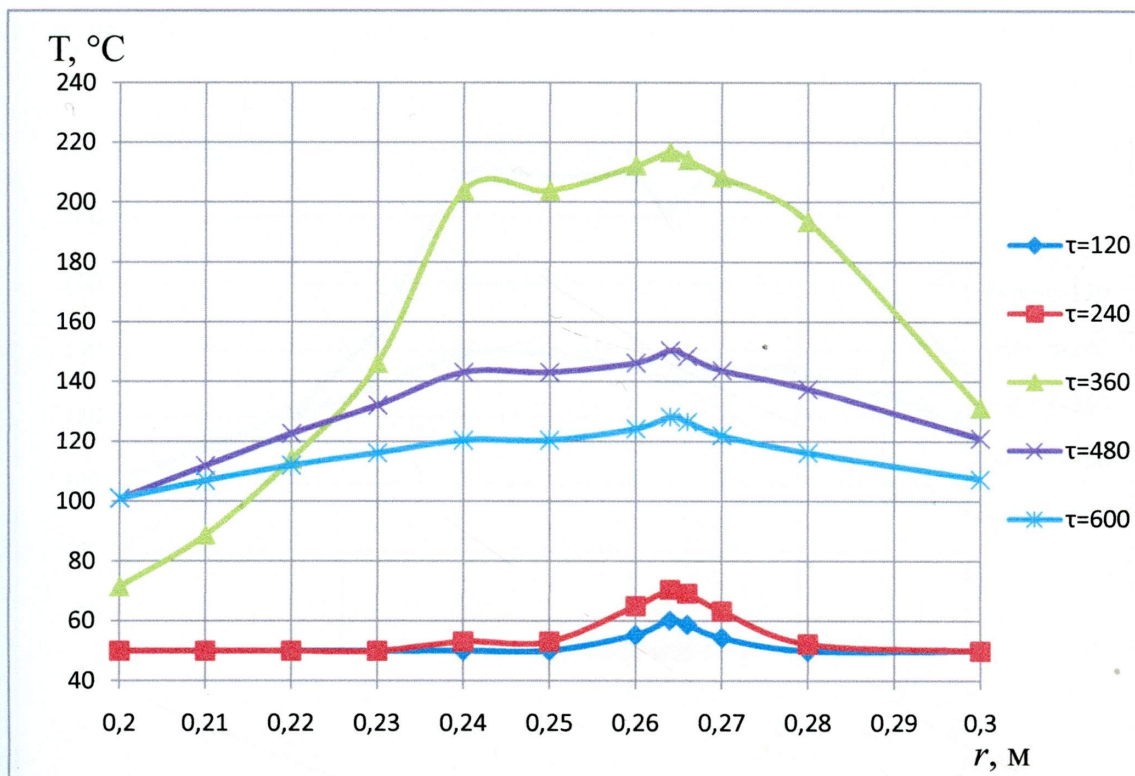


Рис. 2.12. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=180^\circ$

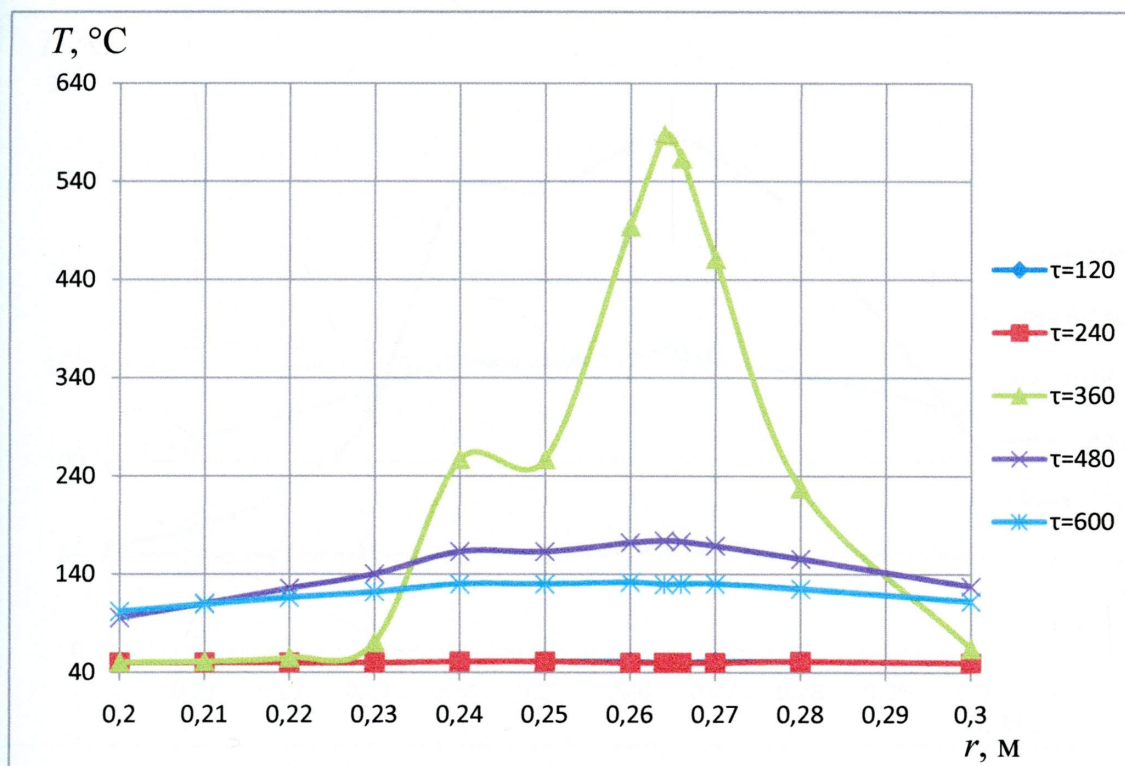


Рис. 2.13. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=210^\circ$

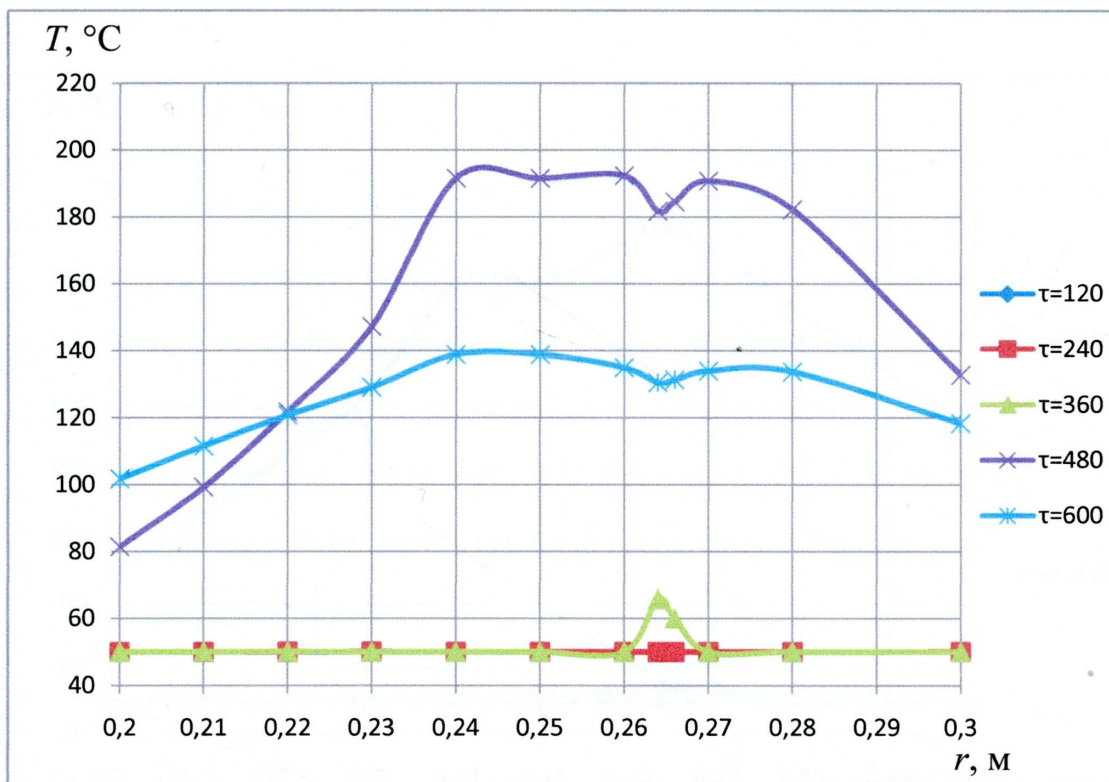


Рис. 2.14. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубок від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=240^\circ$

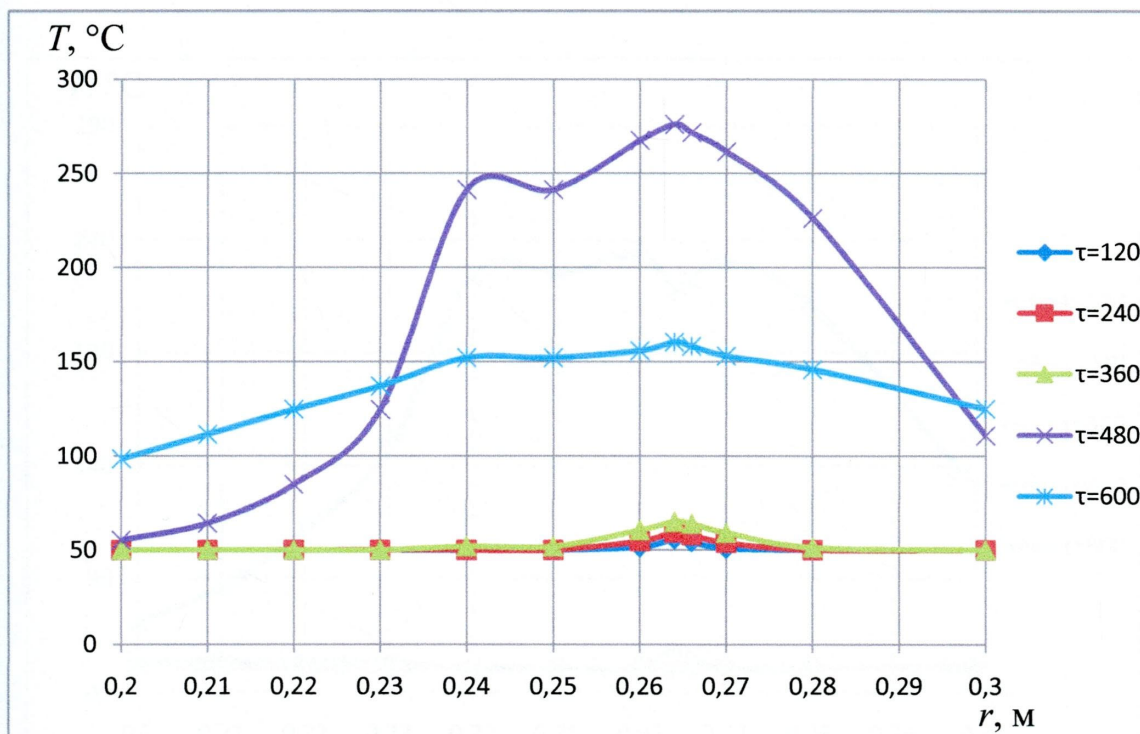


Рис. 2.15. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубок від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=270^\circ$

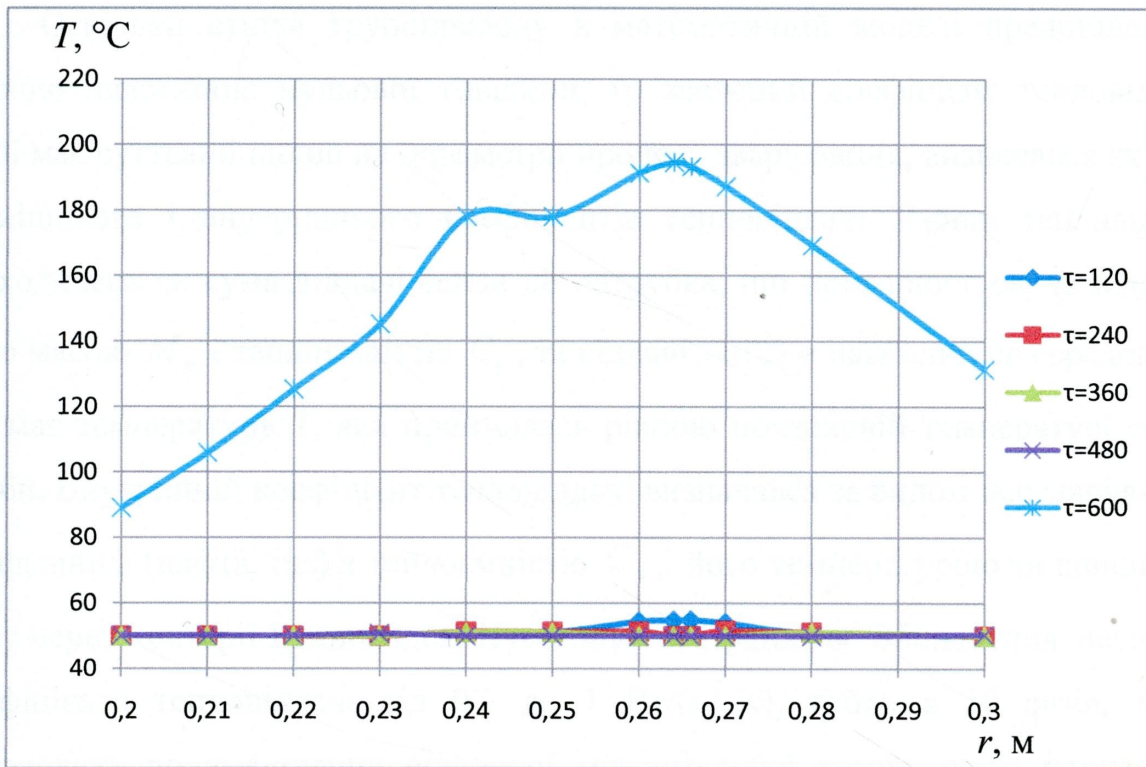


Рис. 2.16. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=300^\circ$

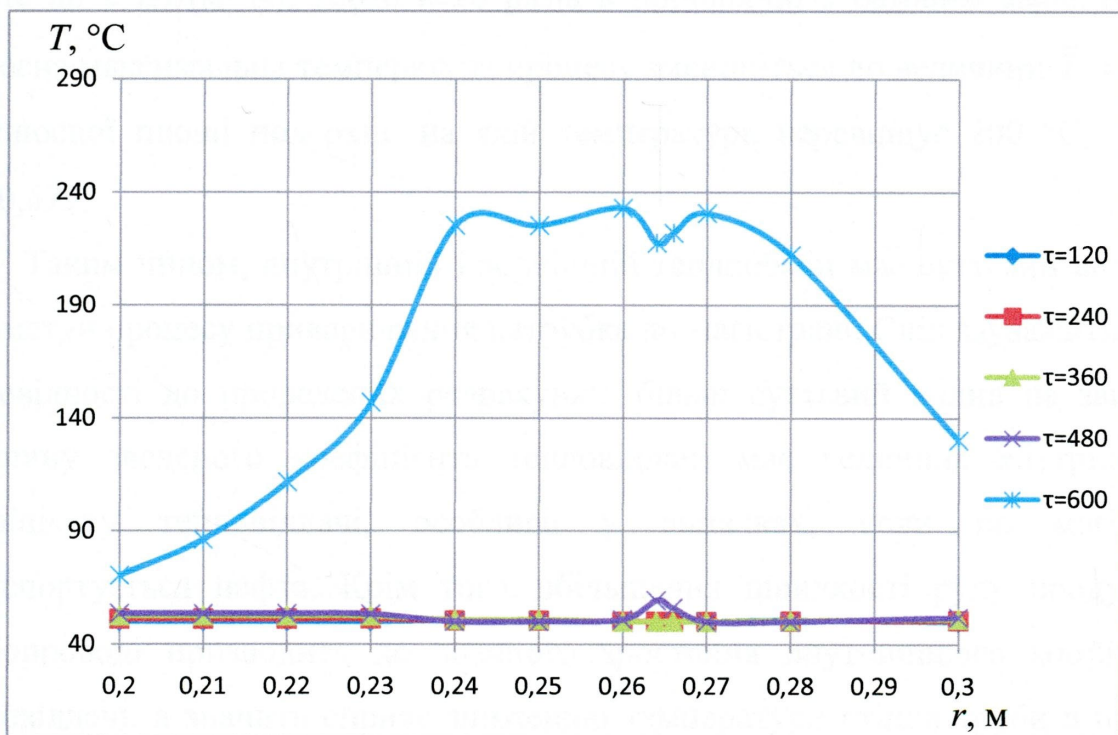


Рис. 2.17. Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубков від радіусу r для різних значень часу τ при куті повороту $\varphi=330^\circ$

Оскільки стінка трубопроводу в математичній моделі представлялася тонкою пластиною нульової товщини, то зведений коефіцієнт тепловіддачі, який має суттєвий вплив на параметри процесу зварювання, визначався як сума зовнішнього і внутрішнього коефіцієнтів тепловіддачі. Зовні тепловіддача знаходилась як сума віддачі тепла до патрубку, що приварюється, за відомою його масою M_g і теплоємністю C_g , та віддачі тепла в навколишнє середовище, що має температуру T , яка приймалась рівною початковій температурі стінки труби. Внутрішній коефіцієнт тепловіддачі визначався за видом перекачуваного середовища (нафта, газ) з теплоємністю C_p , його температурою та швидкістю руху через критерії Рейнольдса, Нуссельта та Прандтля. Збільшення зведеного коефіцієнта тепловіддачі від 0,1 до 1 Вт/(м²·К), тобто в 10 разів, то це призводить до зменшення відносної максимальної температури процесу до величини $\bar{T} = 0,687$, а відносної площі поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, - до $\bar{\omega} = 0,711$. Якщо зведений коефіцієнт тепловіддачі зросте до 2 Вт/(м²·К), тобто в 20 разів в порівнянні з базовим варіантом, то відносна максимальна температура процесу зменшиться до величини $\bar{T} = 0,596$, а відносної площі поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, - до $\bar{\omega} = 0,679$.

Таким чином, внутрішній і зовнішній теплообмін має суттєвий вплив на параметри процесу приварювання патрубка до магістралі. Слід зауважити, що у відповідності до проведених розрахунків більш суттєвий вплив на загальну величину зведеного коефіцієнта тепловіддачі має величина внутрішнього коефіцієнту тепловіддачі, особливо у випадках, коли по магістралі транспортується нафта. Крім того, збільшення швидкості руху продукту в трубопроводі призводить до значного зростання внутрішнього коефіцієнта тепловіддачі, а значить сприяє зниженню температури стінки труби в процесі приварювання патрубка.

Проаналізувавши побудовані графіки та положення джерела тепла (зварювальної дуги), можна зробити висновки про те, що температура стінки труби суттєво відрізняється від початкової при значеннях радіуса від $r = 0,23$ м до $r = 0,29$ м, тобто на відстані (3-4) см від периметру патрубка, що приварюється. В зазначеній області температура змінюється від 150 до 630 °С, в залежності від положення дуги.

Оскільки, міцнісні властивості сталей суттєво змінюються при нагріві їх до температури вище (150-200) °С (як відомо з оглянутої літератури), то можемо зробити висновок про те, що визначення властивостей трубних сталей дослідним шляхом достатньо проводити в діапазоні температур (100-800)°С.

Висновки по розділу 2

1. Запропоновано технічний пристрій для проведення безвогневого врізання в трубопровід під тиском, який дозволить підвищити безпеку проведення робіт на трасі діючого трубопроводу.

2. Для процесу приварювання патрубка до магістралі, як елементу запропонованого пристрою, створено математичну модель нестационарного температурного поля в стінці магістрального трубопроводу, викликаного коловим рухом зварювальної дуги як теплового джерела, в двохвимірному просторі, яка дозволила прогнозувати розподіл температур в стінці труби в залежності від параметрів процесу.

3. Розроблено методику реалізації математичної моделі, створено алгоритм і програму розрахунку, що дозволило проаналізувати вплив різноманітних факторів на перебіг процесу.

4. Встановлено, що нагрівання трубопроводу рухомим джерелом тепла відбувається локально в околі діючого джерела, причому нагрівання трубопроводу до температури до 200 °С займає значну площу поверхні труби в

межах від 449 см² до 668 см² в залежності від параметрів процесу, а більш суттєвий вплив на механічні характеристики сталі представляє нагрів до температури понад 200 °С, площа поверхні якого становить від 39,3 до 21,8 см²

5. Проведений аналіз факторів, що впливають на процес, показав, що в найбільшій мірі на величину максимальної температури і площі поверхні, на якій температура перевищує 200 °С, впливає швидкість руху зварювальної дуги, її теплова інтенсивність та внутрішня тепловіддача.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Аналітичні дослідження формування температурного поля в стінці магістрального трубопроводу, викликаного дією зварювальної дуги як джерела тепла, показали, що короткочасний нагрів металу може перевищувати 600 °С, що може призвести до виникнення пластичних деформацій і руйнування трубопроводу внаслідок комплексної дії температурного поля і внутрішнього тиску. Тому для розробки технології безвогневого врзання в магістральний газопровід під тиском слід особливу увагу приділити дослідженням залежностей механічних властивостей трубних сталей від температурного впливу.

Поведінці матеріалів при високих температурах присвячено ряд робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників [31, 33, 43, 44, 47, 65, 75], в яких на основі експериментальних досліджень приводяться залежності механічних властивостей матеріалу від температури. Однак, трубна сталь є сплавом, поведінка якого при високих температурах суттєво відрізняється від поведінки чистих металів.

В [69] наведені результати досліджень залежності межі міцності та порогу плинності сталі 20 від температури в межах (0÷600) °С, однак поведінка трубної сталі в межах більш широкого діапазону температур може суттєво відрізнятися від досліджуваної сталі. Крім того, при вирішенні задачі міцності трубної сталі при високих температурах важлива роль належить модулю пружності, відомості про який відсутні.

3.1 Експериментальний стенд і вимірювальна техніка

Машина АИМА-ТС 1 (рис. 3.1) призначена для випробування міцнісних властивостей металів та сталей на розрив. Технічна характеристика даної машини приведена в табл. 3.1. 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).

Машина призначена для роботи в приміщеннях лабораторного типу при температурі навколишнього середовища від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості від 45% до 80%.

Таблиця 3.1.

Технічна характеристика машини АИМА-ТС 1

Параметр	Значення
1	2
1. Кількість випробувальних секцій, шт.:	2
2. Діапазони відтворення випробувальних навантажень (загальний діапазон від 0,05 до 30 кН):	
механізм прямого навантаження, кН:	від 0,05 до 0,4
механізм навантаження через систему важеля, кН:	від 0,4 до 30
3. Найменший ступінь навантаження (дискретність), кН:	0,05

Продовж. табл.3.1

4. Межі відносної похибки завдання навантажень, що припускається: від 0,05 кН до 0,4 кН, %: понад 0,4 кН не більше, %:	1 1
5. Кількість одночасно випробовуваних зразків в кожній секції: при випробуванні одиночних зразків, шт.: при випробуванні ланцюжка зразків, шт.:	1 2 або 3
6. Робочий хід активного утримувача, не менше, мм:	70
7. Швидкість руху активного утримувача: при ручному приводі (60 min ⁻¹), мм/хв: при електромеханічному, мм/хв:	10 0,18
8. Діапазон випробувальних температур °С	300÷1100
9. Межі похибки регулювання температури, що припускається, у всьому діапазоні, не більше °С:	3
10. Споживана потужність машини: у режимі випробування, не більше, кВт: при виході на режим, не більше, кВт:	5 8
11. Габаритні розміри машини, не більше: довжина, мм: ширина, мм: висота, мм:	800 800 2300
12. Габаритні розміри електропечі не більше: діаметр, мм: висота, мм:	330 610
13. Маса машини, не більше, кг:	1200
14. Маса електропечі, не більше, кг:	31

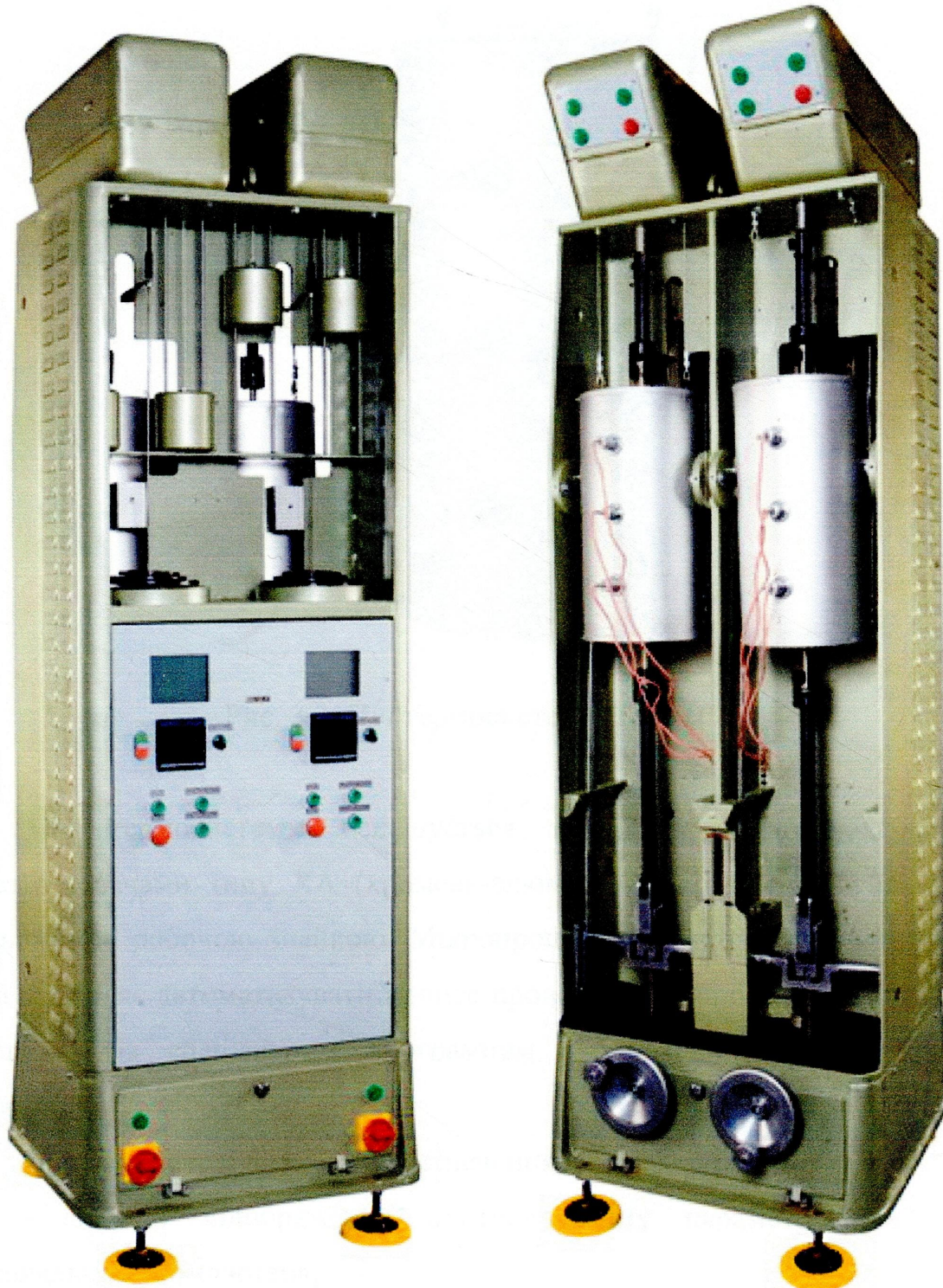


Рис. 3.1. Загальний вигляд машини АИМА-ТС 1

В склад машини АИМА-ТС 1 входить термопіч СТИ ТС-1 (рис. 3.2), яка призначення для підігріву зр'язця то температури при якій проводяться дослідження.

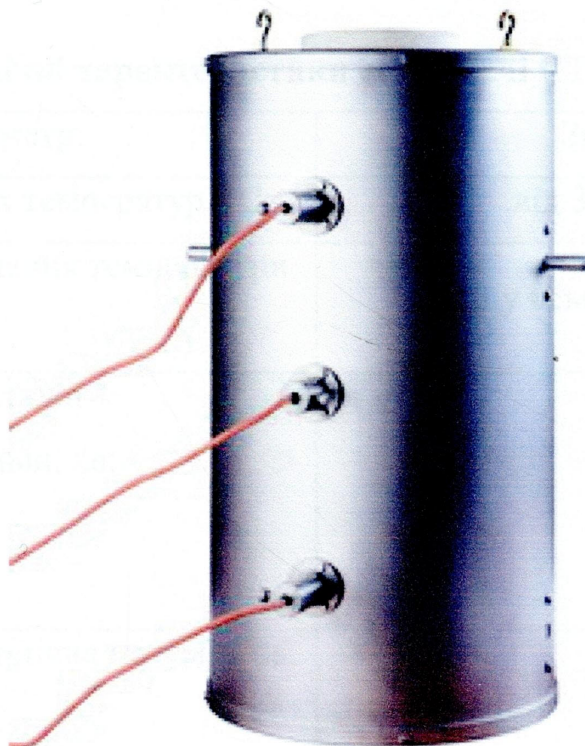


Рис. 3.2. Піч термосистеми СТИ ТС-1

Піч термосистеми оснащується термоелектричними кабельними перетворювачами типу ХА (хромель-алюмель) або НН (ніхросил-нісил) з ізолюваною робочою зпайкою. Мікропроцесорна система управління СТИ ТС-1 дозволяє автоматизувати процес проведення випробувань, передачу на комп'ютер із спеціальним програмним забезпеченням всієї отриманої інформації.

Спеціальне ж програмне забезпечення дозволяє проводити:

- збір і відображення контрольованих параметрів на екрані персонального комп'ютера;
- архівація контрольованих параметрів у вигляді звітів;
- друк значень параметрів, що архівуються і поточних, у вигляді графіків або таблиць;
- програма дозволяє створювати програмно-апаратну систему збору даних і управління випробувальним комплексом СТИ ТС-1.

Технічна характеристика печі СТИ ТС-1 приведена в табл.2.2.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики тернопечі СТИ ТС-1

Параметр	Значення
1. Діапазон робочих температур, °С:	від 300 до 1100
2. Похибка підтримання температури на взірці, °С:	3 у всьому діапазоні
3. Час досягнення сталої температури, не більш, хв: від 100 до 600 °С понад 600 °С	60 120
4. Споживана електрична потужність, не більш, кВт:	4,0
5. Кількість нагрівачів, шт:	3
6. Розміри робочого простору печі, не менше, мм: діаметр висота	72 400
7. Габаритні розміри, не більше, мм: зовнішній діаметр висота	260 500
8. Вага, не більше, кг:	30

3.2 Методика проведення експериментів і обробки їх результатів**3.2.1. Методи відбору взірців**

Вирізання заготовок для взірців проводять на металоріжучих верстатах, ножицях, штампах шляхом застосування кисневого і анодно-

механічного різання і іншими способами, передбачаючи припуски на зону металу із зміненими властивостями при нагріві.

Місця вирізання заготовок для взірців, кількість їх, напрям поздовжньої осі взірців по відношенню до заготовки, величини допусків при вирізанні повинні бути вказані в нормативно-технічній документації (НТД) на правила відбору проб, заготовок і взірців або на металопродукцію.

Взірці рекомендується виготовляти на металоріжучих верстатах. При виготовленні взірців приймають заходи (охолодження, відповідні режими обробки), що виключають можливість зміни властивостей металу при нагріві, що виникають в результаті механічної обробки. Глибина різання при останньому проході не повинна перевищувати 0,3 мм.

Плоскі взірці повинні зберігати поверхневі шари прокату, якщо немає інших вказівок в нормативно-технічній документації на правила відбору проб, заготовок і взірців або на металопродукцію.

Для плоских взірців стріла прогину на довжині 200 мм не повинна перевищувати 10 % від товщини взірця, але не більше 4 мм. За наявності вказівок в нормативно-технічній документації на металопродукцію допускається рихтування або інший вид правки заготовок і взірців.

Задири на гранях плоских взірців повинні бути видалені механічним способом без пошкодження поверхні взірця. Кромки в робочій частині взірців допускається піддавати шліфовці і зачистці на шліфувальному крузі.

За відсутності інших вказівок в нормативно-технічній документації на металопродукцію значення параметрів шорсткості оброблених поверхонь R_a взірців повинне бути не більше 1,25 мкм – для поверхні робочої частини циліндричного взірця і R_z не більше 20 мкм – для бічних поверхонь в робочій частині плоского взірця.

Вимоги до шорсткості поверхні литих взірців і готових виробів повинні відповідати вимогам до шорсткості поверхні литих заготовок і металопродукції, що випробовується без попередньої механічної обробки.

За наявності вказівок в нормативно-технічній документації на правила відбору проб, заготовок і взірців або на металопродукцію допускається випробовувати сортовий прокат, литі взірці і готові вироби без попередньої механічної обробки з урахуванням допусків на розміри, передбачених для випробовуваних виробів.

Випробування проводять на двох взірцях, якщо інша кількість не передбачена в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

Для випробування на розтягування застосовують пропорційні циліндричні або плоскі взірці діаметром або товщиною в робочій частині 3,0 мм і більше з початковою розрахунковою довжиною $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{F_0}$ або $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{F_0}$. Переважно застосовуються короткі взірці.

Литі взірці і взірці з крихких матеріалів допускається виготовляти з початковою розрахунковою довжиною $l_0 = 2,82 \cdot \sqrt{F_0}$.

За наявності вказівок в НТД на металопродукцію допускається застосовувати і інші типи взірців, у тому числі і непропорційні, для яких початкова розрахункова довжина l_0 встановлюється незалежно від початкової площі поперечного перетину взірця F_0 .

Типи і розміри пропорційних циліндричних і плоских взірців вибираються згідно ГОСТ 1497-84.

Тип і розміри взірця повинні указуватися в нормативно-технічній документації на правила відбору проб, заготовок і взірців або на металопродукцію. Допускається застосування при випробуванні пропорційних взірців інших розмірів. Для плоских взірців співвідношення між шириною і товщиною в робочій частині взірця не повинне перевищувати 8:1.

Форма і розміри головок і перехідних частин циліндричних і плоских взірців визначаються способом кріплення взірців в утримувачах випробувальної машини. Спосіб кріплення повинен не допустити ковзання взірців в утримувачах, зминання опорних поверхонь, деформацію головок

і руйнування зрізця в місцях переходу від робочої частини до головок і в головках.

Граничні відхилення по товщині плоских зрізців з механічно не обробленими поверхнями повинні відповідати граничним відхиленням по товщині, встановленим для металопродукції.

Граничні відхилення по товщині плоских зрізців з механічно обробленими поверхнями не повинні перевищувати $\pm 0,1$ мм.

Робоча довжина зрізців повинна складати:

- від $l_0 + 0,5 \cdot d_0$ до $l_0 + 2 \cdot d_0$ – для циліндричних зрізців;
- від $l_0 + 1,5 \cdot \sqrt{F_0}$ до $l_0 + 2,5 \cdot \sqrt{F_0}$ – для плоских зрізців.

При розбіжностях в оцінці якості металу робоча довжина зрізців повинна складати:

- $l_0 + 2 \cdot d_0$ – для циліндричних зрізців;
- $l_0 + 2 \cdot \sqrt{F_0}$ – для плоских зрізців.

При використанні тензометрів допускається застосування зрізців з іншими робочими довжинами, величина яких більша за вказану.

Зрізці маркують поза робочою довжиною зрізця [44, 45, 60, 61, 95].

3.2.2. Підготовка до випробування

Для визначення початкової площі поперечного перетину F_0 необхідні геометричні розміри зрізців вимірюють з похибкою не більше $\pm 0,5\%$.

Вимірювання розмірів зрізців до випробування проводять не менше, ніж в трьох місцях – в середній частині і на межах робочої довжини.

За початкову площу поперечного перетину зрізця в його робочій частині F_0 приймають найменше з отриманих значень на основі проведених вимірювань з округленням по табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Округлення площі взірця

Площа поперечного перетину взірця, мм ²	Округлення, мм ²
До 10 включно	0,01
Від 10 до 20 включно	0,05
Від 20 до 100 включно	0,1
Від 100 до 200 включно	0,5
Більше 200	1

Величину початкової розрахункової довжини l_0 заокруглюють у більшу сторону: для взірців з $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{F_0}$ – до найближчого числа, кратного 5, якщо відмінність між обчисленим і встановленим значеннями l_0 не перевищує 10 %; для взірців з $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{F_0}$ – до найближчого числа, кратного 10.

Початкову розрахункову довжину l_0 з похибкою до 1 % позначають на робочій довжині взірця кернами, ризками або іншими мітками і вимірюють штангенциркулем або іншими вимірювальними засобами з похибкою вимірювання до 0,1 мм.

Для перерахунку відносного видовження після розриву d з відношенням місця розриву до середини і для визначення відносного рівномірного видовження d_p по всій робочій довжині взірця рекомендується наносити мітки через кожних 5 або 10 мм.

Мітки виконують за допомогою ділильних машин або вручну із застосуванням металевої лінійки.

На взірцях з малопластичних металів мітки наносять способами, що виключають пошкодження поверхні робочої частини взірця (нанесенням ділильних сіток або штрихів, фотоспособом, фарбником, олівцем).

Допускається нанесення міток на перехідних частинах взірця шляхом керніння або іншим способом.

Початкову площу поперечного перетину F_0 для взірців складної форми визначають по розрахункових формулах або по масі. Спосіб визначення початкової площі поперечного перетину F_0 для таких взірців повинен бути обумовлений в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

Для вимірювання температури на взірець встановлюють:

два первинних термоперетворювача (термопари) – при $l_0 \leq 100$ мм (біля крайніх міток);

три первинних термоперетворювача (термопари) – при $l_0 > 100$ мм (біля крайніх міток і по-середині взірця);

Робочий кінець первинного термоперетворювача повинен мати надійний контакт з поверхнею взірця і бути ізольованим від радіаційного нагріву [60, 61].

Під час проведення досліджень були використані взірці циліндричної форми довжиною $l_0 = 100$ мм і діаметром $d = 10$ мм (рис. 3.3), які були виготовлені із трубної сталі 14Г2АФ та 17ГС.

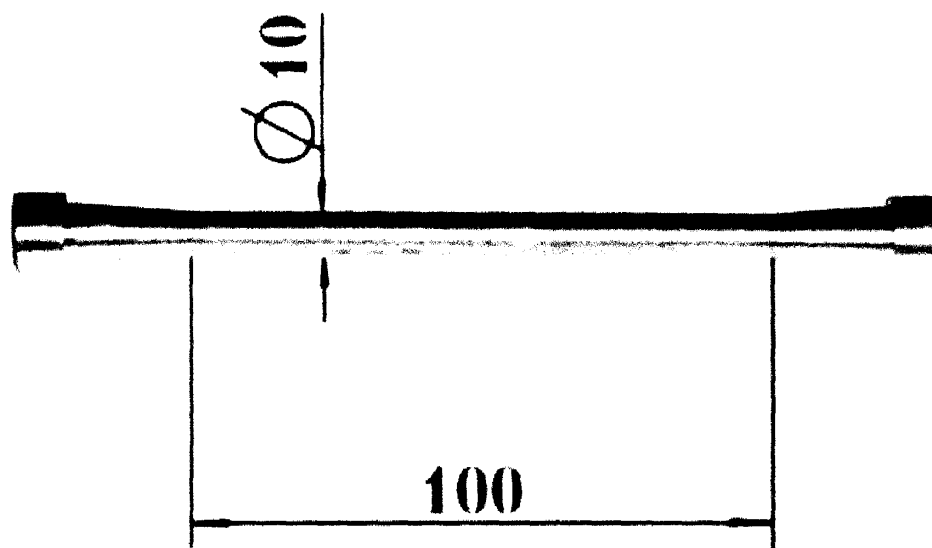


Рис. 3.3. Циліндричний взірець для проведення випробувань

3.2.3 Проведення випробовувань і обробка результатів

Межу пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ визначають:

- за допомогою тензометрів (розрахунковий спосіб);
- графічним способом за початковою ділянкою діаграми, записаною від електричного силовимірювача і вимірювача деформації.

Тензометр або вимірювач деформації встановлюють на взірець після прикладання до нього початкового зусилля P_0 , що відповідає напруженню, рівному (5-10)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$.

При визначенні межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ розрахунковим способом після встановлення тензометра проводять навантаження взірця рівними ступенями до зусилля, відповідного напруженню, рівному (70-80)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$. Кількість ступенів зусилля повинна бути не менше чотирьох. Час витримки на кожному ступені до (5-7) с.

Подальше навантаження проводять дрібнішими ступенями. Коли приріст видовження для малого ступеня навантаження перевищить середнє значення приросту видовження (при тому ж ступені зусилля) подальше навантаження припиняють. Визначають середню величину приросту видовження на малий ступінь навантаження. Знайдену величину збільшують відповідно до прийнятого допуску. Визначають зусилля $P_{\text{пц}}$, відповідне підрахованому значенню приросту видовження.

Допускається застосування методу лінійної інтерполяції для уточнення значення $P_{\text{пц}}$.

Визначення межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ графічним способом проводиться по початковій ділянці діаграми розтягування, записаної від електричного силовимірювача і вимірювача деформації. Видовження визначається на ділянці, рівній базі вимірювача деформації. Масштаб по осі видовження повинен бути не менше 100:1 при базі вимірювача деформації 50 мм і більше

і не менше 200:1 при базі вимірювача менше 50 мм; по осі зусилля 1 мм діаграми повинен відповідати не більше 10 Н/мм^2 ($1,0 \text{ кгс/мм}^2$).

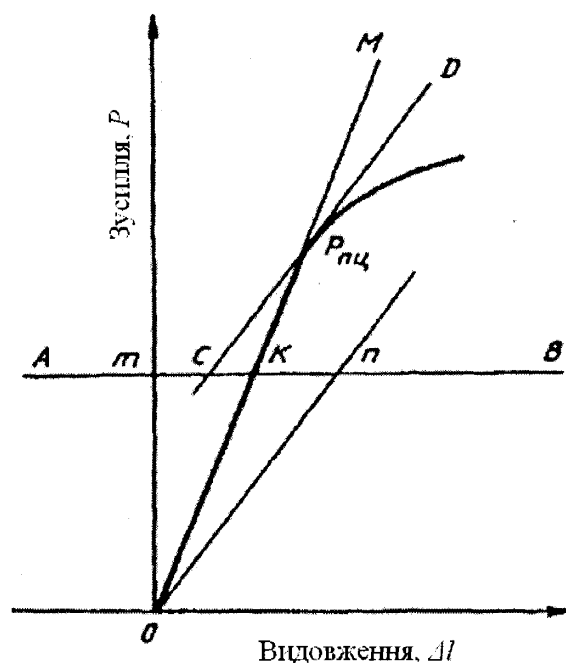


Рис. 3.4. Визначення межі пропорційності

З початку координат (рис. 3.4) проводять пряму, що співпадає з початковою лінійною ділянкою діаграми розтягування. Потім на довільному рівні проводять пряму AB , паралельну осі абсцис, і на цій прямій відкладають відрізок kn , рівний половині відрізка mk . Через точку n і початок координат проводять пряму On і паралельно їй проводять дотичну CD до діаграми розтягування. Точка дотику визначає шукане зусилля $P_{пц}$.

Межа пропорційності ($\sigma_{пц}$) Н/мм^2 (кгс/мм^2), обчислюється за формулою [44]:

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}. \quad (3.1)$$

Модуль пружності E визначають:

- за допомогою тензометра (розрахунковий спосіб);
- графічним способом за початковою ділянкою діаграми розтягування, записаної від електричних силовимірювача і вимірювача деформації.

Тензометр або вимірювач деформації встановлюють на взірець після прикладання до нього початкового зусилля P_0 , що відповідає напруженню, яке дорівнює (10-15)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$.

Після встановлення тензометра проводять навантаження взірця рівними ступенями до зусилля, яке відповідає напруженню, що дорівнює (70-80)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$. Величина ступеня навантаження повинна складати (5-10)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$. За результатами випробувань визначають середню величину приросту видовження взірця $\Delta l_{\text{ср}}$, мм, на ступінь навантаження ΔP , Н (кгс).

При визначенні модуля пружності графічним способом взірець навантажують до зусилля, що відповідає напруженню, яке дорівнює (70-80)% від передбачуваної межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$. Масштаб по осі видовження повинен бути не менше 100:1 при базі вимірника деформації 50 мм і більше, і не менше 200:1 при базі вимірника менше 50 мм; по осі зусилля 1 мм діаграми повинен відповідати не більше 10 Н/мм^2 ($1,0 \text{ кгс/мм}^2$).

Модуль пружності (E), Н/мм^2 (кгс/мм^2), обчислюють за формулою [44]:

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l_{\text{ср}} \cdot F_0} \quad (3.2)$$

Межі текучості фізична $\sigma_{\text{т}}$, верхня $\sigma_{\text{тв}}$ і нижня $\sigma_{\text{тн}}$ визначають за діаграмою розтягування, яка отримана на випробувальній машині за умови, що масштаб діаграми по осі зусилля буде таким, що 1 мм відповідає напруженню не більше 10 Н/мм^2 .

Фізичну межу текучості $\sigma_{\text{т}}$ допускається визначати по явно вираженій зупинці стрілки або цифрового індикатора силівимірювального пристрою випробувальної машини.

При визначенні верхньої межі текучості $\sigma_{\text{тв}}$ швидкість навантаження повинна встановлюватися в межах, приведених в табл. 3.4, якщо немає інших вказівок в НТД на металопродукцію.

Таблиця 3.4.

Швидкість навантаження при визначенні верхньої межі текучості $\sigma_{ТВ}$

Модуль пружності E , Н/мм^2	Швидкість вантаження, $\text{Н/(\text{мм}^2 \cdot \text{с})}$	
	мінімальна	максимальна
$E \leq 1,5 \cdot 10^5$ (для кольорових металів)	1	10
$E > 1,5 \cdot 10^5$ (для кольорових і чорних металів)	3	30

Швидкість навантаження повинна бути встановлена в області пружності і підтримуватися по можливості постійною, поки не буде досягнута верхня межа текучості $\sigma_{ТВ}$.

При визначенні фізичної σ_T , і нижньої $\sigma_{ТН}$ меж текучості швидкість відносної деформації робочої частини взірця на стадії текучості повинна бути в межах від $0,00025$ до $0,0025 \text{ с}^{-1}$, якщо в НТД на металопродукцію немає інших вказівок. Швидкість відносної деформації повинна підтримуватися по можливості постійною.

Якщо швидкість відносної деформації на стадії текучості не може бути забезпечена безпосереднім регулюванням випробувальної машини, то випробування слід проводити, задаючи швидкість навантаження в області пружності. Швидкість навантаження перед досягненням стадії текучості повинна бути в межах, вказаних в табл. 3.4. При цьому управління машиною не повинне змінюватися до кінця стадії текучості.

Умовну межу текучості з допуском на величину пластичної деформації при навантаженні $\sigma_{0,2}$ (або з іншим встановленим допуском) визначають за діаграмою, отриманою на випробувальній машині або за допомогою спеціальних пристроїв.

Для визначення умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ (або з іншим встановленим допуском) за діаграмою розтягування обчислюють величину пластичної деформації з урахуванням встановленого допуску, виходячи з довжини

робочої частини взірця l або початкової розрахункової довжини по тензометру l_0 . Знайдену величину збільшують пропорційно масштабу діаграми і відрізок отриманої довжини OE відкладають по осі видовження від точки O (рис. 3.5, а). З точки E проводять пряму, паралельну OA . Точка перетину прямої з діаграмою відповідає зусиллю умовної межі текучості при встановленому допуску на величину пластичної деформації. Масштаб діаграми по осі видовження повинен бути не менше 50:1. За відсутності випробувальних машин з діаграмами вказаного масштабу і можливості їх отримання за допомогою спеціальних пристроїв допускається, за винятком випадків розбіжностей в оцінці якості металопродукції, використовувати діаграми з масштабом по осі видовження не менше 10:1 при застосуванні зразків з робочою довжиною не менше 50 мм.

Якщо прямолінійна ділянка діаграми розтягування виражена нечітко, то рекомендується наступний спосіб визначення умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ (або з іншим встановленим допуском) рис. 3.6, б).

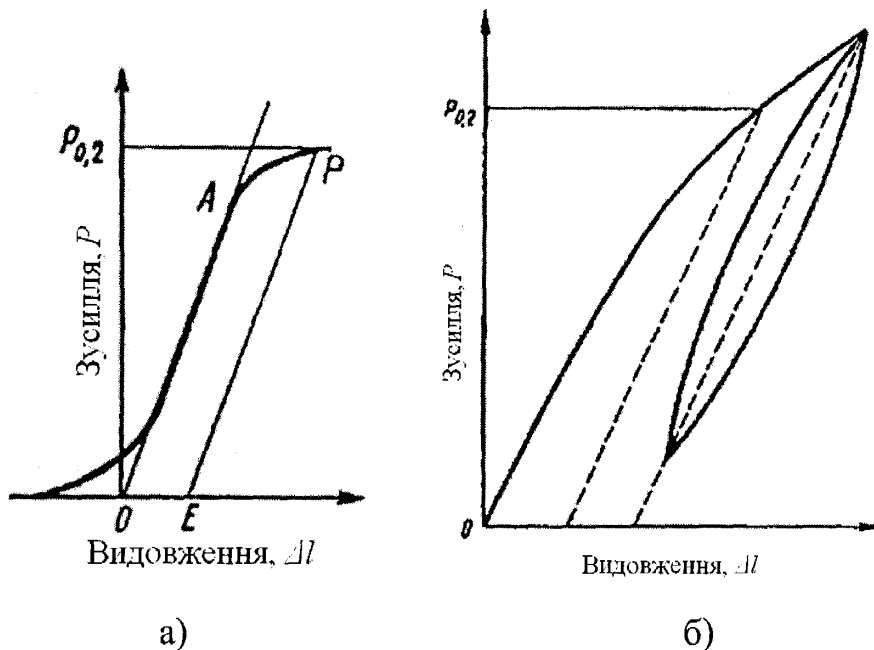


Рис. 3.5. Визначення умовної межі текучості

Після того, як очікувана умовна межа текучості буде перевищена, зусилля на взірець знижують до величини, що становить приблизно 10% від

досягнутого. Далі проводять нове навантаження зрізця до тих пір, поки величина прикладеного зусилля не перевищить початкове.

Для визначення зусилля на діаграмі проводять пряму уподовж петлі гістерезису. Далі проводять паралельно їй лінію, відстань від початку якої до точки O діаграми, відкладена по осі видовження, відповідає допуску на величину пластичної деформації.

Величина зусилля, відповідна точці перетину цієї лінії з діаграмою розтягування, відповідає зусиллю умовної межі текучості при встановленому допуску на величину пластичної деформації.

При визначенні умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ (або з іншим встановленим допуском) швидкість навантаження повинна відповідати вказаній в табл. 3.4, якщо в НТД на металопродукцію немає інших вказівок.

Умовна межа текучості ($\sigma_{0,2}$), Н/мм² (кгс/мм²), обчислюється за формулою [60]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}. \quad (3.3)$$

Умовну межу текучості $\sigma_{0,2}$ (або з іншим встановленим допуском) визначають тільки за відсутності майданчика текучості, якщо немає інших вказівок в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

За наявності вказівок в НТД на металопродукцію проводиться визначення умовної межі текучості з допуском на величину повної деформації σ_{Π} і умовної межі текучості σ_p , що визначається методом послідовного навантаження і розвантаження зрізця.

Для визначення тимчасового опору σ_T зрізці піддають розтягуванню під дією плавно зростаючого зусилля до руйнування.

Найбільше зусилля, що передує руйнуванню зрізця, береться за зусилля P_{max} , що відповідає тимчасовому опору.

При визначенні тимчасового опору σ_T швидкість деформації повинна бути не більше 0,5 від початкової розрахункової довжини зрізця l_0 , вираженою в мм/хв.

Тимчасовий опір (σ_T), Н/мм² (кгс/мм²), обчислюють за формулою [60]:

$$\sigma_T = \frac{P_{max}}{F_0}. \quad (3.4)$$

Визначення відносного рівномірного видовження проводять на взірцях з початковою розрахунковою довжиною l_0 не менше $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{F_0}$. Відносне рівномірне видовження δ_p визначають на більшій частині зруйнованого взірця на розрахунковій ділянці $A'B'$ (рис. 3.6), віддаленій на відстані не менше ніж $2d_0$ або $2b_0$ від місця розриву. Кінцева довжина розрахункової ділянки $l_{кр}$ повинна бути не менша $2d$ або $1,5b_0$. Початкову довжину розрахункової ділянки $l_{пр}$ визначають по кількості міток на розрахунковій ділянці і початковій відстані між ними.

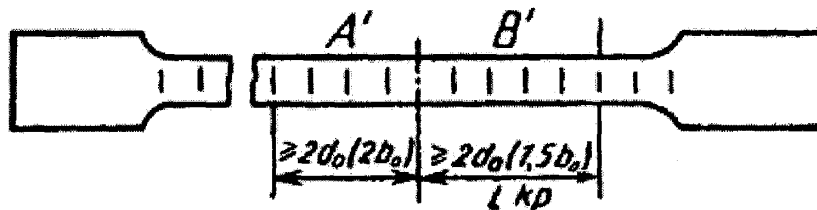


Рис. 3.6. Схема зруйнованого взірця

Допускається визначення відносного рівномірного видовження δ_p по діаграмі розтягування з масштабом по осі видовження не менше 10:1 як відповідного найбільшому зусиллю R_{max} .

Відносне рівномірне видовження (δ_p) %, обчислюють за формулою:

$$\delta_p = \frac{(l_{кр} - l_{пр}) \cdot 100}{l_{пр}}. \quad (3.5)$$

Для визначення кінцевої розрахункової довжини взірця l_k зруйновані частини взірця щільно складають так, щоб їх осі утворили пряму лінію.

Вимірювання кінцевої розрахункової довжини взірця l_k проводиться штангенциркулем при значенні відліку по ноніусу 0,1 мм.

Визначення кінцевої розрахункової довжини взірця проводиться вимірюванням відстані між мітками, що обмежують розрахункову довжину.

Якщо відстань від місця розриву до найближчої з міток, що обмежують розрахункову довжину взірця, складає $1/3$ або менше початкової розрахункової довжини l_0 і певна величина відносного видовження після розриву не задовольняє вимоги нормативно-технічної документації на металопродукцію, то допускається проводити визначення відносного видовження після розриву δ з віднесенням місця розриву до середини.

Перерахунок проводять по заздалегідь нанесених уздовж робочої частини взірця керках або рисках, наприклад через 5 або 10 мм.

За наявності вказівок в НТД при визначенні відносного видовження після розриву для малопластичних металів ($\delta \leq 5\%$) визначають:

а) абсолютне видовження ($l_k - l_0$).

Перед випробуванням біля одного з кінців робочої довжини взірця наносять ледве помітну мітку. На взірцеві проводять дугу радіусом, рівним початковій розрахунковій довжині взірця l_0 , і з центром в нанесеній мітці. Після розриву обидві половини взірця щільно складають і притискають один до одного під дією осьового зусилля. Другу дугу того ж радіусу проводять з того ж центру. Відстань між дугами, рівну абсолютному подовженню взірця (рис. 3.7), вимірюють за допомогою вимірювального мікроскопа або інших засобів вимірювань;

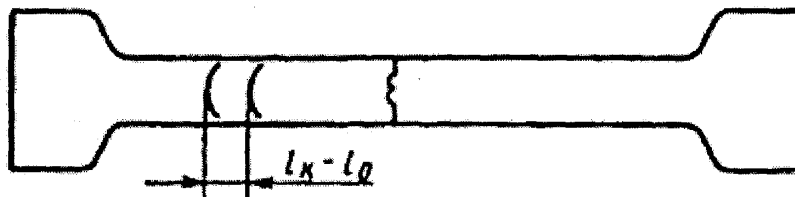


Рис. 3.7. Визначення видовження взірця

б) кінцеву розрахункову довжину l_k по діаграмі розтягування при масштабі діаграми по осі деформації (видовження) не менше 50:1;

в) кінцеву розрахункову довжину взірця l_k по відстані між головками взірця або мітками, нанесеними на перехідних частинах взірця, із застосуванням розрахункових формул.

Відносне видовження взірця після розриву (δ) у відсотках обчислюють за формулою [60]:

$$\delta = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100}{l_0}. \quad (3.6)$$

У протоколі випробувань повинно бути вказано, на якій розрахунковій довжині визначено відносне видовження після розриву δ .

Для визначення відносного звуження ψ циліндричного взірця після розриву вимірюють мінімальний діаметр d_k в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Вимірювання мінімального діаметру d_k проводиться штангенциркулем з відліком по ноніусу до 0,1 мм.

По середньому арифметичному з отриманих значень обчислюють площу поперечного перетину взірця після розриву F_k .

Відносне звуження після розриву (ψ) обчислюють за формулою [60]:

$$\psi = \frac{(F_0 - F_k) \cdot 100}{F_k}. \quad (3.7)$$

Округлення обчислених результатів випробувань проводять відповідно до табл. 3.5.

Результати випробувань не враховують:

при розриві взірця по кернах (ризикам), якщо при цьому яка-небудь характеристика механічних властивостей не відповідає встановленим вимогам в нормативно-технічній документації на металопродукцію;

при розриві взірця в захватах випробувальної машини або за межами розрахункової довжини взірця (при визначенні відносного рівномірного видовження δ_p і відносного видовження при розриві δ);

при розриві взірця по дефектах металургійного виробництва і отриманні при цьому незадовільних результатів випробувань.

За відсутності інших вказівок в нормативно-технічній документації на металопродукцію випробування, крім тих, що не враховуються, повторюють на такій же кількості зразків.

Результати випробувань записують в протокол.

Таблиця 3.5

Округлення результатів випробування

Характеристика механічних властивостей	Інтервал значень характеристики	Округлення
Межа пропорційності, Н/мм ² (кгс/мм ²)	До 100 (до 10,0)	До 1,0 (до 0,1)
Межа пружності, Н/мм ² (кгс/мм ²)		
Межа текучості фізична, Н/мм ² (кгс/мм ²)		
Межа текучості умовна, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Від 100 до 500 (Від 10 до 50)	До 5,0 (до 0,5)
Тимчасовий опір, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Більше 500 (Більше 50)	До 10 (до 1)
Модуль пружності, Н/мм ² (кгс/мм ²)	1,00-2,50·10 ⁵ (1,00-2,50·10 ⁴)	До 0,01·10 ⁵ (до 0,01·10 ⁴)
Відносне рівномірне видовження %	До 10,0	До 0,1
Відносне видовження після розриву %	Від 10,0 до 25,0	До 0,5
Відносне звуження площі поперечного перетину після розриву %	Більше 25,0	До 1,0

3.3 Результати досліджень та їх аналіз

Під час приварювання патрубків відводу до діючого трубопроводу відбувається нагрівання стінки і при цьому змінюються міцнісні властивості трубної сталі. Ці зміни, під час проведення вогневих робіт на діючому газопроводі, можуть призвести до руйнування стінки, що потягне за собою виникнення аварійної ситуації, забруднення навколишнього середовища, а також може викликати загибель людей. Щоб запобігти цьому, необхідно встановити як саме змінюються механічні характеристики трубних сталей під час нагрівання та при якому максимальному допустимому тиску в газопроводі можна проводити вогневі роботи. З цією метою, згідно описаної методики в пункті 3.2, було проведено дослідження зміни механічних властивостей трубних сталей 14Г2АФ та 17ГС в діапазоні температур (20-900)°С.

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

Граничні відхилення від встановленої температури випробовування в точках замірювання по довжині розрахункової частини взірця без врахування похибок вимірювання температури, зумовлених термоелектричним перетворювачем і вторинними приладами, не перевищували:

± 5°С – при температурі випробовування до 600°С;

± 5°С – при температурі випробовування від 600°С до 900°С.

При розбіжностях в оцінці якості металу граничні відхилення температури від встановленої, при випробовуванні в будь-якій точці розрахункової довжини взірця приймалися на 2°С меншими.

Тривалість нагрівання взірця до температури випробовування і час витримки при цій температурі приймався у відповідності з нормативно-технічною документацією на металопродукцію.

Проведення випробовувань проводилось на машині АИМА-ТС 1 для різних значень температури. Результати випробовувань і всі необхідні заміри на розірваному взірцеві (рис. 3.8) фіксувались у протоколі (додаток Б) і, на основі одержаних даних, було проведено розрахунок межі текучості, тимчасового опору та модуля пружності трубних сталей 14Г2АФ і 17ГС для різних значень температури з діапазону (20-900)°С та побудовано відповідні залежності, які показано на рис. 3.9 та 3.10.



Рис. 3.8. Циліндричний взірець після випробовування

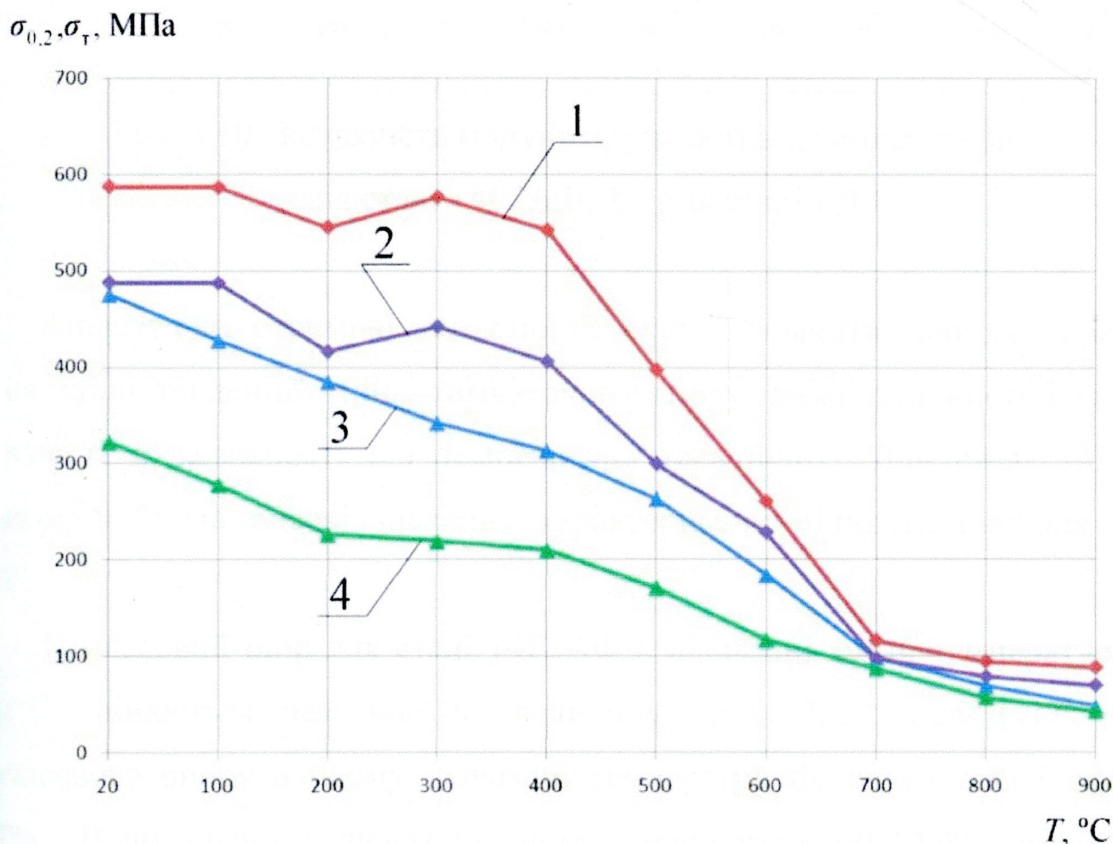


Рис. 3.9. Залежність межі текучості та тимчасового опору від температури:

1,2 – відповідно, тимчасовий опір сталі 14Г2АФ та 17ГС;

3,4 – відповідно, межа текучості для сталі 14Г2АФ та 17ГС.

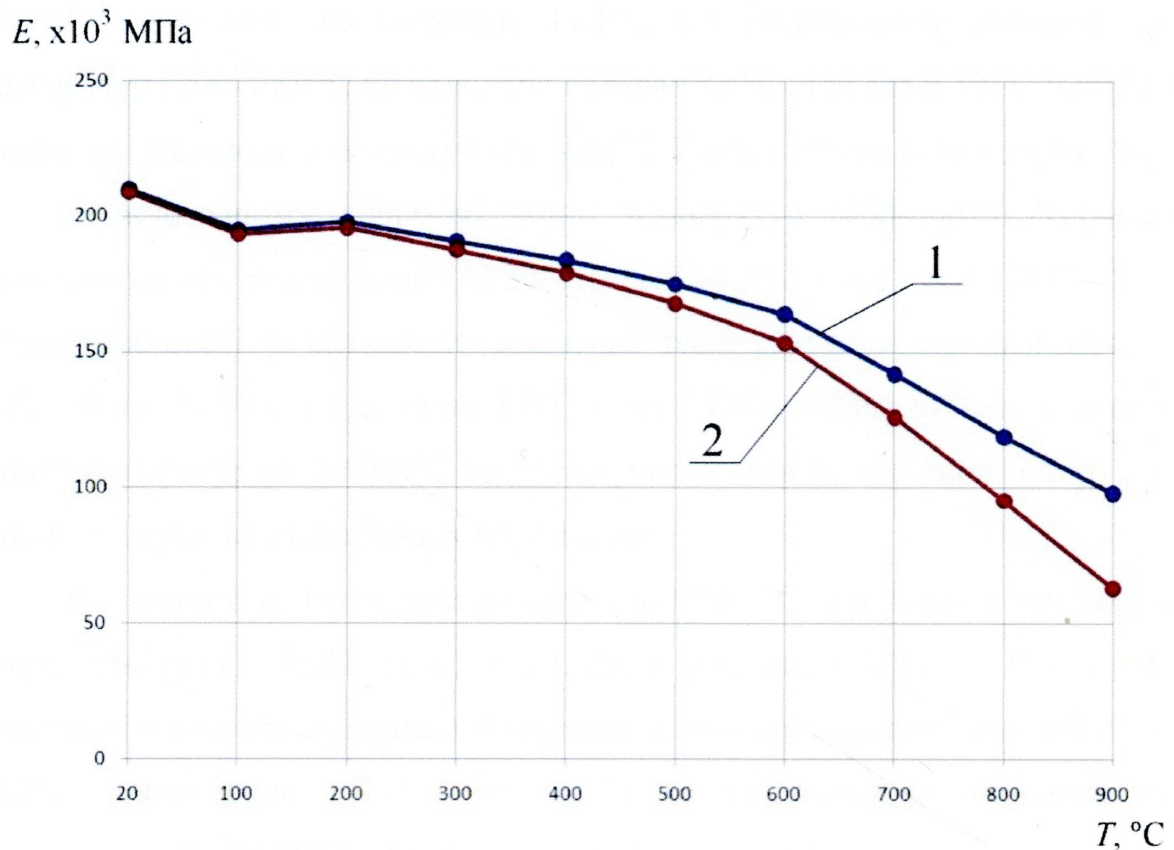


Рис. 3.10. Залежність модуля пружності від температури:

1 – для сталі 14Г2АФ; 2 – для сталі 17ГС

Аналізуючи отримані залежності, слід відзначити, що для обидвох марок сталі тенденції зміни тимчасового опору, межі плинності і модуля пружності в залежності від температури ідентичні. Для сталі 14Г2АФ характерні більш високі значення характеристик міцності, ніж для сталі 17ГС.

Тимчасовий опір для сталі 14Г2АФ в діапазоні зміни температур (20-200)°C змінюється незначно на величину 7,1%. Для сталі 17ГС зміна тимчасового опору в цьому діапазоні температур більш суттєва і складає 11,7%. В подальшому діапазоні зміни температур (200-400)°C зменшення тимчасового опору для сталі 14Г2АФ складає 5,9%, а для сталі 17ГС – 8,1%. Таким чином, в діапазоні зміни температур (20-400)°C 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 14Г2Ф 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 складає для сталі 14Г2АФ 6,3%, а для сталі 17ГС – 8,9%, в діапазоні температур (600-900)°С зменшення модуля пружності складає для сталі 14Г2АФ 30,9%, а для сталі 17ГС – 50,6%.

З аналізу приведених залежностей встановлено, що в діапазоні зміни температур (20-400)°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 (0-250)°C зростає на величину до 1,5 %, а в подальшому зменшується і при температурі 900°C складає близько (10-20)% початкового значення.

Висновки по розділу 3

1. Виконано планування експерименту з встановлення впливу температури на механічні властивості трубних сталей в діапазоні температур (20-900) °C і проведено серії дослідів з виготовленими взірцями сталей 14Г2АФ і 17ГС на машині АИМА-ТС 1, що дозволило побудувати залежності тимчасового опору, межі плинності і модуля пружності сталей від температури.

2. Встановлено, що для трубних сталей в діапазоні зміни температур (20-450)°C межа плинності сталей практично не змінюється, а в подальшому починає різко зменшуватися і при температурі 900 °C складає близько (20-30)% від початкового значення.

3. Модуль пружності трубних сталей в діапазоні температур (0-259)°C зростає на величину до 15 %, а в подальшому зменшується і при температурі 900°C складає близько (10-20)% початкового значення.

РОЗДІЛ 4

УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗВОГНЕВОГО ВРІЗАННЯ В ДІЮЧИЙ ТРУБОПРОВІД НА ПРАКТИЦІ

4.1 Визначення допустимого тиску в трубопроводі при реалізації безвогневого врізання

З метою проведення реконструкції і розвитку газонафтотранспортних 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. Проте постає питання: “який повинен бути допустимий тиск в газопроводі під час приварювання патрубку до нього, щоб проведення вогневих робіт було безпечним з точки зору охорони праці та екології, а також, щоб пониження тиску не значним чином вплинуло на економічні затрати підприємства, що експлуатує газопровід?”

Слід зауважити, що процес врізання в діючий трубопровід під тиском є надзвичайно складним і небезпечним, оскільки супроводжується місцевим нагріванням тіла труби. 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.

Місьцеве нагрівання трубопроводу здійснюється зварювальною дугою як джерелом тепла у ході проведення ремонтних робіт на лінійній частині. При цьому знижуються всі механічні властивості трубної сталі, що може призвести до втрати пружності матеріалу. Якщо ремонтні роботи проводити без припинення перекачування продукту, то, з одного боку, рух продукту в трубопроводі призведе 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 [33] величина тиску в трубопроводі під час проведення зварювальних робіт не повинна перевищувати 1,5 МПа, незалежно від товщини стінки труби і марки сталі.

Визначення напружено-деформованого стану стінки трубопроводу під дією внутрішнього тиску та температурних напружень від рухомого точкового джерела тепла є задачею термопружності, часткові розв'язки якої наведено в [65, 71, 75, 85].

Однак через складність постановки і реалізації задачі для умов вказаного навантаження неможливо одержати її розв'язок, тому слід використати спрощені методи, зокрема метод суперпозиції часткових розв'язків. До таких розв'язків належить побудова температурного поля в стінці трубопроводу від дії рухомої зварювальної дуги як джерела тепла, визначення температурних напружень в стінці труби та напружень від внутрішнього тиску.

Під час проведення теоретичних досліджень формування температурного поля в стінці трубопроводу від дії рухомої зварювальної дуги як джерела тепла було отримано математичну модель (2.20).

Створення даної математичної моделі процесу нестационарного розподілу тепла в стінці труби від точкового джерела, що рухається по колу, з врахуванням теплообміну з навколишнім середовищем та продуктом, що рухається в трубопроводі, дало змогу одержати розв'язки, графічне зображення яких показано на рис. 2.6-2.17. Проведемо аналіз графіка 2.13 на якому температура стінки труби, в даний момент часу, досягає максимального значення. Як видно з графіків, миттєва температура стінки труби може перевищувати 550°C на момент часу 360 секунд (коли дуга перебуває в точці, що розглядається), проте з плином часу вона швидко

знижується, і через 120 секунд складає 150°C , а після 360 секунд спадає практично до початкового значення. Таким чином, процес нагрівання триває (2-3) хв. з наступним охолодженням протягом (6-8) хв. Зауважимо, що максимальна миттєва температура залежить від потужності теплового джерела і спостерігається в околі дії зварювальної дуги, а тривалість процесу визначається теплофізичними характеристиками трубної сталі, швидкістю руху джерела та витратою продукту в трубопроводі та його властивостями.

Визначення напружень термопружності в стінці труби проводилось за таких припущень:

- матеріал труби “працює” в зоні прямої пропорційності (закон Гука);
- зона термовпливу представляється у вигляді балки із зацземленням кінців;
- поле термонапружень змінюється в часі відповідно зміні температури;
- напруження від внутрішнього тиску в трубопроводі є сталими і не залежать від температурного впливу.

З метою встановлення залежностей механічних властивостей трубної сталі 14Г2АФ від температури проводились експериментальні дослідження на дослідному стенді АИМА-ТС-1 (розділ 3). В досліді були використані взірці з неексплуатованої сталі, які піддавались випробовуванням в діапазоні $(20-900)^{\circ}\text{C}$. В результаті встановлено залежності границі міцності $\sigma_{0,2}$, межі плинності σ_m та модуля пружності E від температури, які у вигляді графіків зображені на рис. 3.9 та 3.10.

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 4.1.

Використовуючи залежність модуля пружності по поверхні труби, можна знайти напруження в стінці, що виникають від дії температур [18]:

$$\sigma_T = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot E(t). \quad (4.1)$$

Напруження від внутрішнього тиску в трубопроводі не залежать від температури впливу і можуть бути знайдені з залежності [87]:

$$\sigma_p = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \delta}, \quad (4.2)$$

де p – внутрішній тиск;

d, δ – внутрішній діаметр і товщина стінки трубопроводу.

Еквівалентні напруження від дії внутрішнього тиску і температурного поля можуть бути визначені шляхом сумування [83, 88, 89].

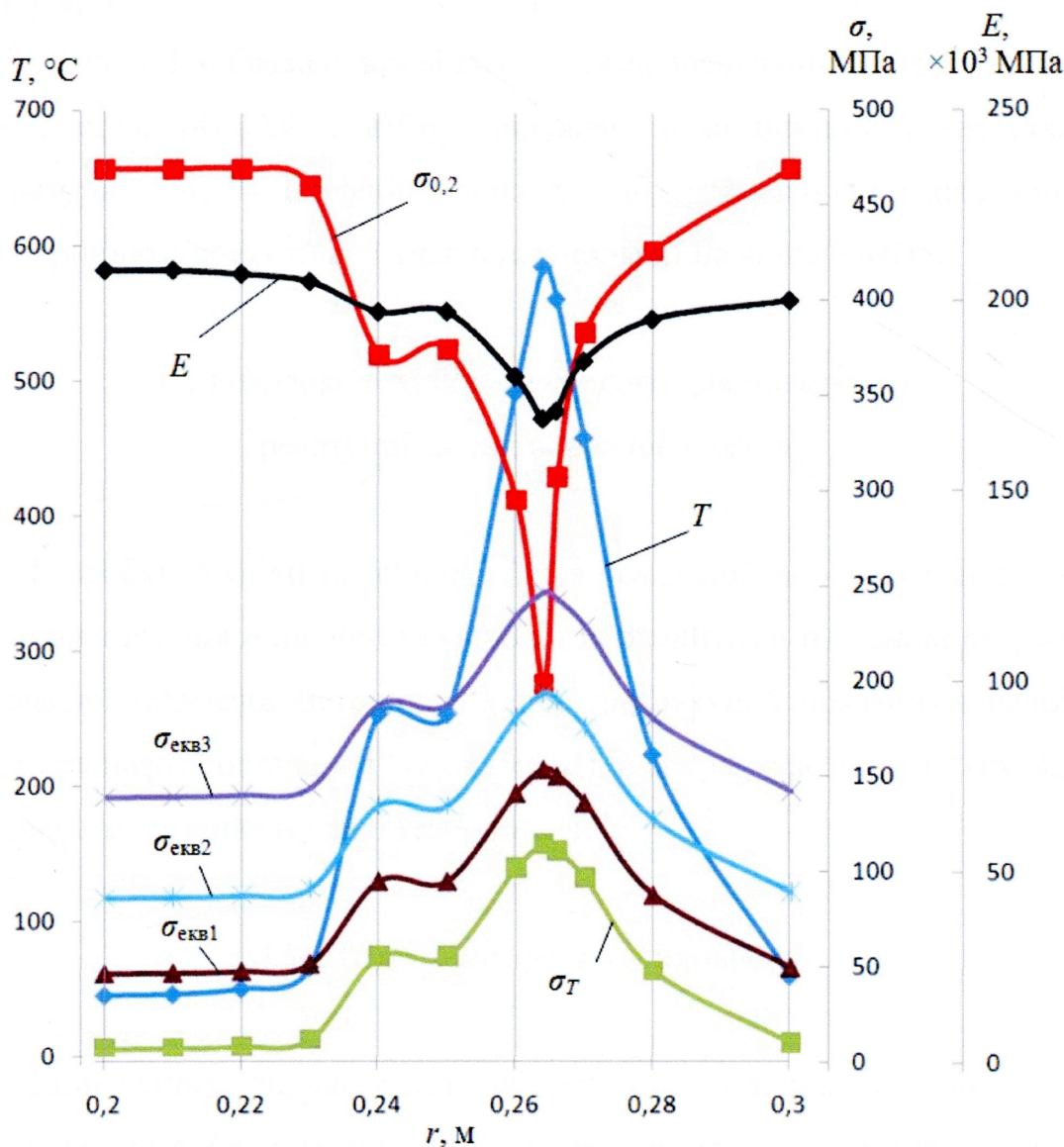


Рис. 4.1. Розподіл напружень в стінці труби та залежність механічних властивостей сталі 14Г2АФ від температури:

$\sigma_{екв1}$ – сумарні еквівалентні напруження в стінці труби при $p = 1,5$ МПа; $\sigma_{екв2}$ – те ж при $p = 3$ МПа; $\sigma_{екв3}$ – те ж при $p = 5$ МПа.

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 трубної 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 трубної сталі і можливої при цьому аварії.

На рис. 4.1 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.

4.2 Розробка техніки і технології для практичної реалізації запропонованого методу

Розробку техніки та технології для реалізації запропонованого методу виконання врізання в діючий газопровід проводитимемо на основі розробленої комплексної галузевої методики “Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання” (Додаток В), а зокрема розділу 3 “Проведення безвогневого врізання в діючі газопроводи”.

4.2.1 Підготовка робочої площадки

Попередньо проводиться обстеження ділянки газопроводу, де планується врізання відводу, лупінгу, перемички або ремонт, і суміжних газопроводів (паралельних або тих, що перетинають його) у межах небезпечної зони, з метою виявлення місць, пошкоджених корозією, виявлення і усунення витоків вибухонебезпечних речовин, легкозаймистих

рідин, які за своєю інтенсивністю і місцезнаходженням становлять небезпеку при виконанні вогнебезпечних робіт. В таблиці 4.1 приведені радіуси небезпечних зон проведення робіт в залежності від діаметру газопроводу та від робочого тиску [7].

Забороняється під час виконання робіт на газопроводі врізанням під тиском піднімати тиск на паралельних і перетинаючих його нитках газопроводів.

Таблиця 4.1

Радіуси небезпечних зон

Робочий тиск, МПа	Умовний діаметр, мм	Радіуси небезпечних зон, м
Від 2,5 до 10	300 і менше	100
	від 300 до 600	150
	від 600 до 800	200
	від 800 до 1000	250
	від 1000 до 1200	300
	від 1200 до 1400	350
Від 1,2 до 2,5	300 і менше	75
	Від 300	100

Визначається розташування поздовжньої осі і глибина закладання газопроводу. Поздовжню вісь відмічають кілками, які встановлюються через 50 м. Знаки, на яких вказується фактична глибина закладання газопроводу, встановлюються в межах видимості на прямих ділянках траси не більше ніж через 50 м, а також в місцях перетину з відводом, лупінгом, байпасом. Висота таких знаків повинна становити від 1,5 до 2,0 м.

Визначення положення газопроводу у вертикальній (глибина закладання) і горизонтальній (в плані) площинах треба виконувати з використанням трасошукачів, шукачів ушкодження (типу ВТР-1УМ, УТ-3,

ШК-2м) або комплектом апаратури «Пеленг-1». Уточнення положення осі газопроводу проводять мідним шупом.

Проводиться оконтурення межі небезпечної зони, закріпивши на місцевості попереджувальні знаки. Для прикладу див. рис. 4.2.

Обстежуються і, при необхідності, проводиться ремонт вздовж-трасових і під'їзних доріг.

Для захисту від атмосферних опадів і вітру місце монтажу вузла врізання в газопровід забезпечується навісом або укриттям.

Спеціалізована бригада після одержання плану організації робіт готує комплект устаткування, інвентар, матеріали для виконання спеціальних робіт (зварювання під тиском, врізання в газопровід відводів).

Схема організації робіт по проведенню врізання відводу з розміщенням устаткування наведена на рис. 4.3. [8, 17]

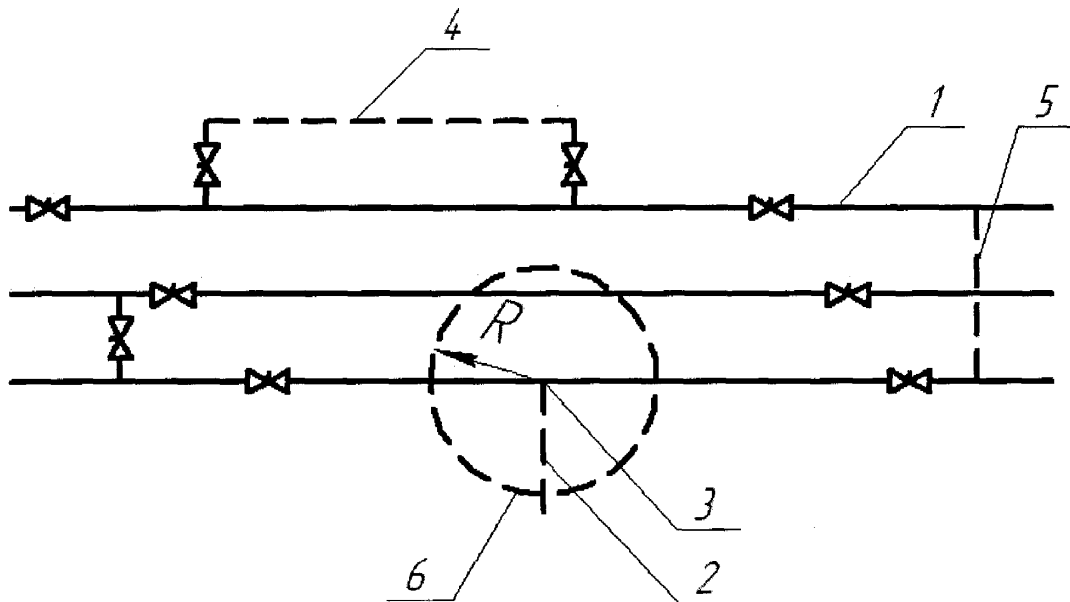


Рис. 4.2. Схема магістрального газопроводу

з позначенням місця врізання відводу:

1 – магістральний газопровід; 2 – вісь газопроводу-відводу; 3 – місце врізання газопроводу-відводу в магістральний газопровід; 4 – врізання лупінгу; 5 – врізання перемички між нитками магістрального газопроводу; 6 – межа небезпечної зони при врізанні газопроводу-відводу; R – радіус небезпечної зони.

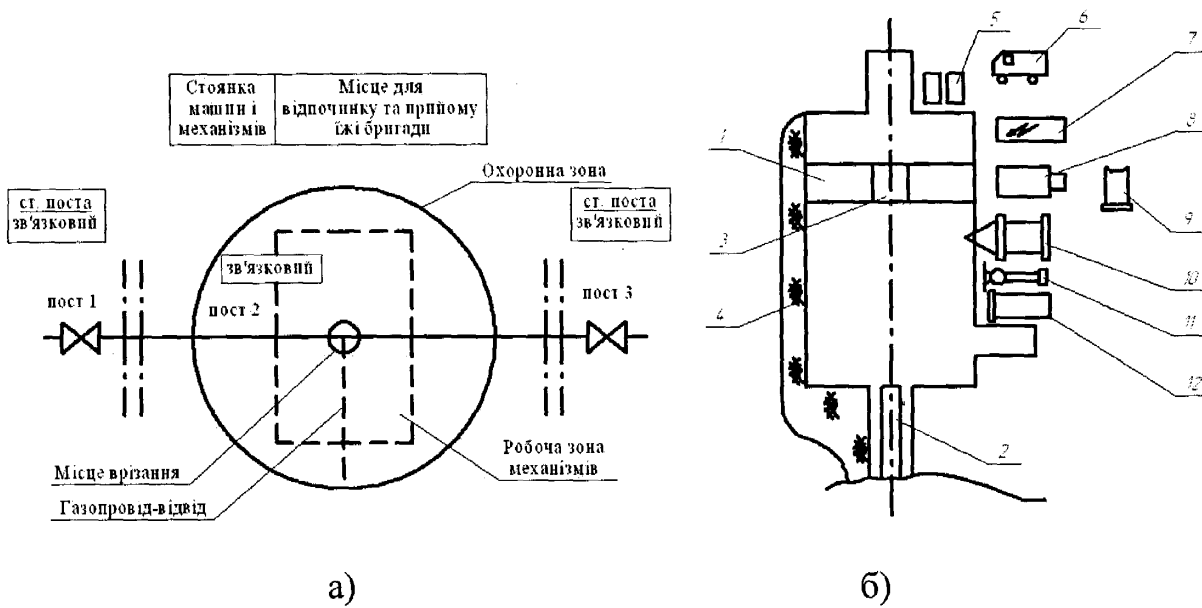


Рис. 4.3. Схема організації робіт по врізанню відводу в магістральний газопровід:

а – розміщення зон; б – розміщення механізмів біля місці врізання
 1 – магістральний газопровід; 2 – газопровід-відвід; 3 – місце врізання патрубку з фланцем; 4 – відвал ґрунту; 5 – газорізальне обладнання; 6 – спецтехніка; 7 – електростанція; 8 – зварювальне обладнання та обладнання для термообробки; 9 – патрубков з фланцем; 10 – трубоукладач; 11 – кульовий кран; 12 – машина для врізання.

4.2.2 Земляні роботи

Розкриття газопроводу, що знаходиться під тиском, і розробку котловану екскаватором треба виконувати при умові наближення ріжучих кромки зубців ковша на відстань не ближче ніж 0,5 м до твірної частини труби газопроводу, при цьому ходова частина і опорні елементи екскаватора не повинні переміщуватись безпосередньо над газопроводом.

Вилучення ґрунту, що залишився навколо труби і під трубою, виконується тільки вручну, без застосування ударних інструментів. Під

трубою ґрунт вилучається нижче нижньої твірної частини труби на глибину (0,5-0,6) м.

Величина нахилу стінок котловану визначається залежно від його глибини, типу ґрунту і його стану з урахуванням рекомендацій таблиці 4.2.

При наявності різноманітних видів ґрунту крутість відкосів для всіх пластів треба визначати по найбільш слабкому типу ґрунту.

Розміри котловану повинні забезпечувати розміщення необхідного устаткування в залежності від виду спеціальних робіт, що виконуються:

– по вісі газопроводу, уздовж його твірної – розміщення патрубків з фланцями, для врізання і підведення відводу, перемички, лупінгу, байпасу, перекриттів порожнини трубопроводу, перепускних патрубків;

– перпендикулярно вісі газопроводу – розміщення плоскої засувки, кульового крану, пристрою для вирізання отвору в трубопроводі, запірних пристроїв для перекриття порожнини труби.

Розміри котловану (максимальні) залежно від устаткування, що застосовується, наведені на рис. 4.4 і в таблиці 4.3. Розміри котлованів уточнюються при опрацюванні конкретного проекту. [48]

Таблиця 4.2

Граничні значення нахилу стінок котловану

Вид ґрунтів	Нахил стінок (відношення їх висоти до основи) при глибині виймання, м, не менше		
	1,5	3	5
Насипні і неущільнені	1 : 0,67	1 : 1	1 : 1,25
Піщані і гравійні	1 : 0,5	1 : 1	1 : 1
Супісчані	1 : 0,25	1 : 0,67	1 : 0,85
Суглинок	1 : 0	1 : 0,5	1 : 0,75
Глина	1 : 0	1 : 0,25	1 : 0,5
Леси та лесоподібні	1 : 0	1 : 0,5	1 : 0,5

Таблиця 4.3

Розміри котловану для врізання газопроводу-відводу

Діаметр газопроводу, мм	Розміри котловану, м							
	A	B	L	l	H	h_1	c	d
530	3,2	1,6	7,8	2,0	1,9	0,6	1,2	0,5-0,6
720	3,5	1,75	8,6	2,2	2,1	0,7	1,2	0,5-0,6
820	5,0	2,5	2,4	2,4	2,2	0,84	1,2	0,5-0,6
1020	6,0	3,0	10,7	2,6	2,6	0,9	1,2	0,5-0,6
1220	6,0	3,0	11,7	2,8	2,8	1,0	1,2	0,5-0,6
1420	6,0	3,0	12,5	2,8	3,0	1,2	1,2	0,5-0,6

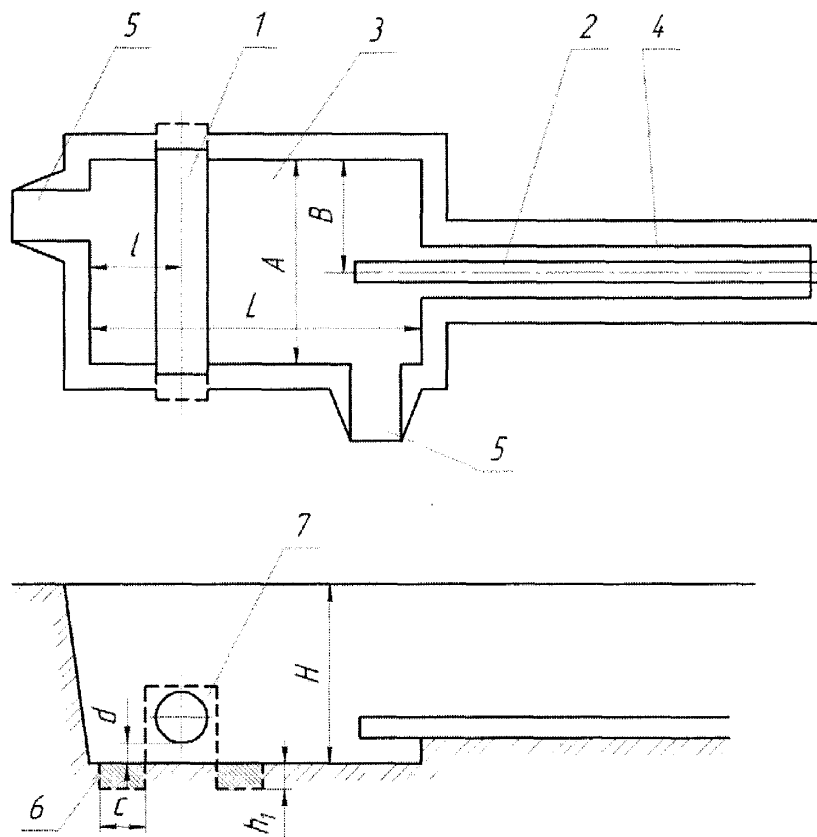


Рис. 4.4. Котлован для горизонтального врізання газопроводу-відводу (перемички, лупингу) в магістральний газопровід:

1 – магістральний газопровід; 2 – газопровід-відвід; 3 – котлован; 4 – траншея газопроводу-відводу; 5 – вихід з котловану; 6 – «кишеня» з насипним ґрунтом; 7 – контур ґрунту, що розробляється навколо труби вручну.

4.2.3 Визначення фактичних значень товщини стінки δ і зовнішнього діаметру газопроводу D_3 в місці приварювання вузла врізання

Товщина стінки газопроводу заміряється на відстані 100 мм по обидві сторони місця приварювання. Виконання робіт в місцях де товщина стінки менша за проектну і виходить за мінусовий допуск (по технічних умовах (ТУ) на труби), не допускається, і місце врізання зміщується.

Відхилення від номінальних розмірів зовнішніх діаметрів і овальність труб (відношення різниці між найбільшим і найменшим діаметром в одному перерізі до номінального діаметру) не повинні перевищувати меж, що забезпечують допустимий зазор при зварюванні вузла врізання з поверхнею газопроводу. Для вимірювань використовуються рулетки вимірювальні по ГОСТ 7502, перевірочні лінійки по ГОСТ 8026 і ін. При перевищенні меж відхилень місце врізання зміщується.

4.2.4 Контроль якості металу труби

Проводиться візуальний і неруйнівний контроль суцільним скануванням ультразвуковим методом згідно ГОСТ 14782 всього периметру очищеної поверхні газопроводу в місці монтажу вузла врізання, включаючи ділянки на відстані не менше 200 мм в кожную сторону від місця підєднання вузлів або деталей вузлів врізання.

Проводиться неруйнівний контроль радіографічним методом згідно ГОСТ 7512 або ультразвуковим методом згідно ГОСТ 14782 на всій довжині заводського зварного шва (поздовжнього і спірального) на очищеній поверхні труби газопроводу на відстані не менше 100 мм в кожную сторону від місця підєднання вузлів врізання. Допускається при необхідності застосовувати додаткові фізичні методи неруйнівного контролю.

Для контролю якості металу труби і вимірювання товщини стінки використовуються дефектоскопи по ГОСТ 23667 та ультразвукові товщиноміри по ГОСТ 28702.

У місці монтажу вузла врізання в металі труби і заводському зварному шві труби не допускається наявність поверхневих і внутрішніх дефектів (розшарувань, тріщин, раковин, корозійних дефектів будь-якої глибини і довжини, рисок, задирів, подряпин глибиною більше 5 % від товщини стінки).

Критерії оцінки якості зварних швів труби неруйнівними фізичними методами контролю повинні відповідати вимогам, вказаним в ТУ на труби.

При виявленні в контрольованих зонах недопустимих поверхневих або внутрішніх дефектів місце врізання зміщують. Зовнішні дефекти (риски, задири, подряпини) глибиною не більше 0,2 мм і які складають не більше 5 % від товщини стінки, усувають шліфуванням до величини шорсткості поверхні Rz20-Rz30, товщина стінки труби не повинна виходити за межі мінусового допуску по ТУ на труби.

Ремонт дефектів наплавленням не допускається.

Поверхня стінки газопроводу, в місцях накладення кільцевих зварних швів, зачищається механічним способом до металевого блиску з використанням приспособлення безударної дії на відстань 150 мм по обидві сторони місця зварювання. Забої і задири на основній трубі не допускаються.

Опуклість заводських зварних швів труби газопроводу зашліфовується до рівня з поверхнею труби на відстань не менше 150 мм в кожену сторону від торців вузла врізання з плавним переходом на зовнішню поверхню заводських швів. Зашліфовування проводиться механічним способом з використанням шліфмашинки тільки після зниження тиску на ділянці до допустимої величини. [48]

4.2.5 Приварювання патрубків-відводів до тіла діючого трубопроводу

Приварювання патрубків-відводів здійснюється безпосередньо до тіла діючого газопроводу, за умов пониження тиску до величини розрахованої в попередньому пункті.

Перед встановленням патрубків-відводів на трубопроводі, його поверхня очищується від іржі, бруду, мастила і т.п. Зачищення проводять електрошліфмашинкою і металевою щіткою до повного видалення продуктів корозійного руйнування. Місця корозійних пошкоджень стінки трубопроводу заповнюються матеріалом, який запобігає подальшій місцевій корозії.

Кромка патрубків-відводів перед його встановленням на трубопровід зачищається до металевого блиску на ширину не менше 10 мм.

Ділянка трубопроводу, де буде встановлено патрубків-відвідів, просушуються газовим полум'ям до температури на поверхні в 50°C.

Починати зварювальні роботи дозволяється тільки тоді, коли дотримуються умови безпечного виконання дугового зварювання на магістральному газопроводі під тиском згідно графічної залежності, наведеної на рис. 4.1.

Необхідність попереднього підігріву зварюваних конструктивних елементів та трубопроводу, а також параметри підігріву вибираються згідно з ВСН 006-89 в залежності від еквівалентного вмісту вуглецю $C_{екв}$, товщини стінки зварюваних елементів та температури навколишнього середовища (повітря).

Підігрів виконується газовим полум'ям у секторі зварювання.

Виконання зварювальних робіт при мінусових температурах навколишнього повітря слід супроводжувати обов'язковим попереднім підігрівом зварюваних конструктивних елементів і ділянки трубопроводу до 100-150°C незалежно від їх хімічного складу. При температурі повітря нижче

мінус 20°C виконувати ремонтні роботи із застосуванням дугового зварювання на трубопроводі під тиском заборонено.

Для приварювання патрубків-відводів до трубопроводу під тиском застосовуються електроди з основним видом покриття типу Е42А, (УОНИ-13/45, ОК 48.04, В-17), Е50А (УОНИ-13/55, ОК 53.70, ЛБ-52У, Гарант, АНО-ТМ, Фокс ЕВ-50, ОЗС-ВНИИСТ-27, В-26), Е60 (УОНИ-13/65, ОК 74.70, ВСФ-65, Гарант КС, Шварц ЗК, Кессель 5520Мо, АНО-ТМ60, ОЗС-24, ЛБ-62Д, ОК 73.79, Нибаз 65).

Під час приварювання патрубків-відводів до трубопроводу під тиском слід додержуватись рекомендованих режимів зварювання, які наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Рекомендовані режими зварювання

Вид шва	Діаметр електроду, мм	Сила струму, А
Кореневий	3,0-3,25	100-120
Заповнювальний	3,0-3,25	100-120
	4,0	140-160
Облицювальний	4,0	140-160

Режими зварювання корегуються в залежності від просторового положення зварного з'єднання та стабільності горіння електроду.

Порядок виконання наплавлення та приварювання патрубка визначається в залежності від його просторового положення – горизонтальне або вертикальне (рис. 4.5). Кореневий шов виконується з поперечними коливаннями кінця електроду (така техніка зварювання допустима і для другого проходу), заповнювальні і облицювальні - з розкладкою швів.

Після виконання кореневого шару поздовжніх або кільцевих зварних з'єднань розрізних елементів (напівоболонки), треба обов'язково виконати його шліфування абразивним інструментом.

Під час зварювання, після кожного проходу, необхідно ретельно очистити поверхню шва від шлаку та бризок розплавленого металу і виконувати контроль відсутності тріщин і пор у кожному шарі багатошарового зварного шва перед накладанням наступного.

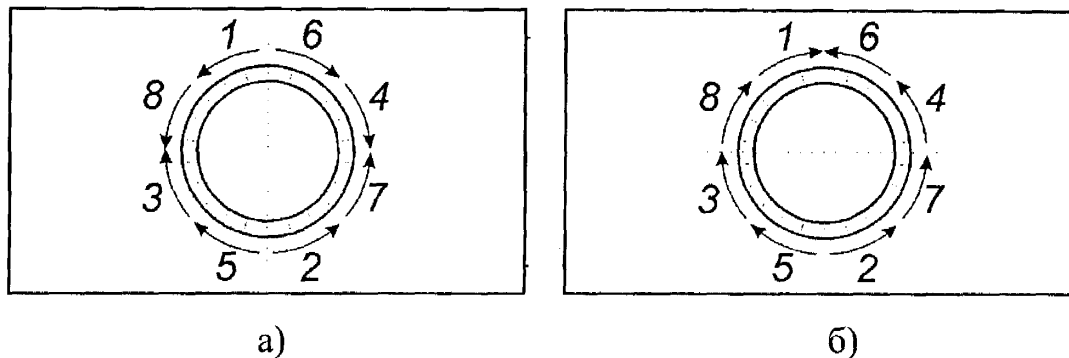


Рис. 4.5. Порядок виконання наплавлення та приварювання патрубка в залежності від його просторового положення (відносно трубопроводу)
а – вертикальне; б - горизонтальне.

Зварний шов облицювального шару повинен перекривати основний метал в кожен сторону від розробки крайок на (2,5-3,5) мм і мати опуклість висотою (1-3) мм з плавним переходом до основного металу.

Для поліпшення якості зварного з'єднання, початок і кінець кожного шару необхідно зсувати одне відносно одного на (20-30) мм.

Під час виконання заповнювальних і облицювальних шарів швів патрубку, який виготовлений із сталі з межею міцності 540 МПа і більше, необхідно слідкувати за тим, щоб температура перед накладанням кожного наступного шару була не нижче 5°C. Якщо температура ділянки стику, який треба зварити, нижче зазначеної величини, необхідно виконати повторний підігрів.

Після завершення зварювання, поверхня облицювального шару шва повинна бути очищена від шлаку та бризок розплавленого металу. [49, 77, 86,

4.2.6 Вирізання отвору в газопроводі під тиском

Попередньо встановлюється на трубопровід та приварюється патрубковідвід до основної магістралі відповідно до пункту 4.2.5.

До однієї крайки кульового крану (з вхідної сторони) приварюється перехідне кільце. До другої крайки кульового крану (з вихідної сторони) приварюється інше перехідне кільце, після цього приварюється фланець для наступного монтажу пристрою для врізання в газопровід. Довжина перехідних кілець повинна бути не менше 100 мм.

Вісь прохідного перетину кульового крану повинна співпадати з осями перехідних кілець та фланця (у поздовжньому напрямку) або бути паралельними між собою. Незбігання осей вказаних елементів не повинно перевищувати допустиме зміщення відповідних зварюваних крайок (кульового крану, перехідних кілець, фланця). Перекоси при збиранні та зварюванні вузла врізання "перехідне кільце - кульовий кран – перехідне кільце – фланець" не дозволяються.

Установлюється в котловані вузол врізання "перехідне кільце - кульовий кран – перехідне кільце – фланець" на настил. Висота настилу повинна забезпечувати співвісність прохідного перетину вузла врізання з відповідним патрубком вузла відводу.

Приварюється зовнішню крайку перехідного кільця (з вхідної сторони кульового крану) до відповідного патрубка вузла відводу.

Монтаж і зварювання виконуються у відповідності до вимог СНиП III-42-80 і ВСН 006-89.

Виконується контроль якості зварних швів неруйнівними методами – ультразвуковим і радіографічним [94] згідно з вимогами ВСН 012-88.

Після встановлення на трубопровід вузла врізання виконується операція по випробуванню вузла відводу на герметичність у наступній послідовності:

- на фланець вузла врізання встановити і закріпити через прокладку пласку заглушку, в якій розташовано манометр та штуцер;
- підключити до штуцера балон із стиснутим інертним газом;
- відкрити кульовий кран;
- встановити внутрішній випробувальний тиск, який повинен дорівнювати величині внутрішнього допустимого тиску на ділянці трубопроводу при зварюванні і врізанні;
- витримати вузол відводу під випробувальним тиском на протязі двох годин, контроль за тиском проводити по манометру, що встановлений на заглушці.

При перевірці герметичності всі зварні шви вузлів відводу та врізання можна покривати мильним розчином для візуального огляду нещільностей.

Монтується на машині для врізання корончату фрезу з направляючим свердлом. Конструкція свердла повинна передбачати кріплення спеціальних стержнів, що утримують вирізаний темплет для вилучення його з труби.

Підйомним краном (трубоукладачем) опускається машина для врізання в котлован до фланця, який через перехідне кільце з'єднаний з кульовим краном.

Установлюється прокладку в гніздо фланця. За допомогою крана або монтажного підіймача виставлюється машина для врізання в горизонтальне (вертикальне) положення. Центрується фланець машини для врізання з фланцем кульового крану і проводиться їх стикування. Єднальними болтами стягаються фланці. У випадку горизонтального розташування машини для врізання монтажний підіймач повинен надійно спиратися на ґрунт котловану. При необхідності під підіймач підстелюється дерев'яний настил.

Після монтажу машини для врізання виконується перевірка на герметичність фланцевого з'єднання в наступній послідовності:

- відкрити кульовий кран;

- підключити до штуцера фланця машини для врізання балон із стиснутим інертним газом;

- встановити внутрішній випробний тиск в 1,0 МПа;

- витримати вузол врізання разом із машиною для врізання під випробним тиском на протязі 30 хвилин.

Контроль випробного тиску проводиться по манометру, встановленому на трубопроводі підводу інертного газу. При перевірці герметичності зварні шви і фланцеві з'єднання можна покривати мильним розчином для візуального огляду нещільностей.

Процес механічного врізання в магістральний трубопровід проводиться в два етапи:

- 1) Висвердлюється отвір в трубі направляючим свердлом.

При цьому необхідно: витиснути тиском газу інертний газ з порожнини вузла врізання крізь вентиляційний клапан машини для врізання; клапан закрити; вирівняти тиск газу в вузлі врізання і газопроводі.

- 2) Вирізається отвір в трубі корончатою фрезою.

Фрезерування виконується в автоматичному режимі, параметри якого вибираються залежно від діаметру фрези, міцності металу труби і товщини її стінки.

Після закінчення вирізання отвору в трубі фрезу повернути до корпусу тиску (адаптер) машини, закрити кульовий кран, скинути тиск в адаптері машини. Машину демонтувати.

Підготовка вузла врізання до приєднання газопроводу-відводу виконується з урахуванням двох варіантів з'єднання між собою.

При зварному з'єднанні (переважно):

- відрізати фланець від перехідного кільця кульового крану, підготувати крайку перехідного кільця під зварювання;

- за допомогою дугового зварювання приварити до крайки перехідного кільця заглушку;

– зробити контроль якості зварних кільцевих стиків неруйнівними методами контролю - радіографічним і ультразвуковим згідно з ВСН 012-88.

При фланцевому з'єднанні:

– до фланця кульового крану приєднати глухий фланець і закріпити їх між собою шпильками (болтами).

4.3 Результати реалізації запропонованого методу безвогневого врізання на газопроводах УМГ «Прикарпаттрансгаз»

Впровадження запропонованого методу безвогневого 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) (рис. 4.6).

Попередньо ГРС “Вознесенівка Друга” була підключена до газопроводу РІ діаметром 820 мм. Проте виникла необхідність проведення ремонту даного газопроводу із його відключенням, що призвело б до зупинки подачі газу споживачам, які живляться від ГРС “Вознесенівка Друга”. Тому було прийнято рішення про підключення даної ГРС до перемички і при цьому був застосований запропонований пристрій для виконання врізання.

Згідно розробленої техніки і технології було проведено врізання в діючий трубопровід на перемичці між газопроводами ШДКРІ та РІ на відстані 30 м від крану № 46П. Акт впровадження методу безвогневого врізання в діючі газопроводи наведено в додатку Д.

Підготовчі роботи з безвогневого врізання в діючий газопровід було розпочато 15 вересня 2008 року. В план підготовчих робіт було включено розкриття ділянки газопроводу-перемички між газопроводами ШДКРІ та РІ на відстані 30 м від крану № 46П, шляхом риття котловану у відповідності до

[8], очищення поверхні труби від ізоляції та підготовка техніки та матеріалів для процесу врізання.

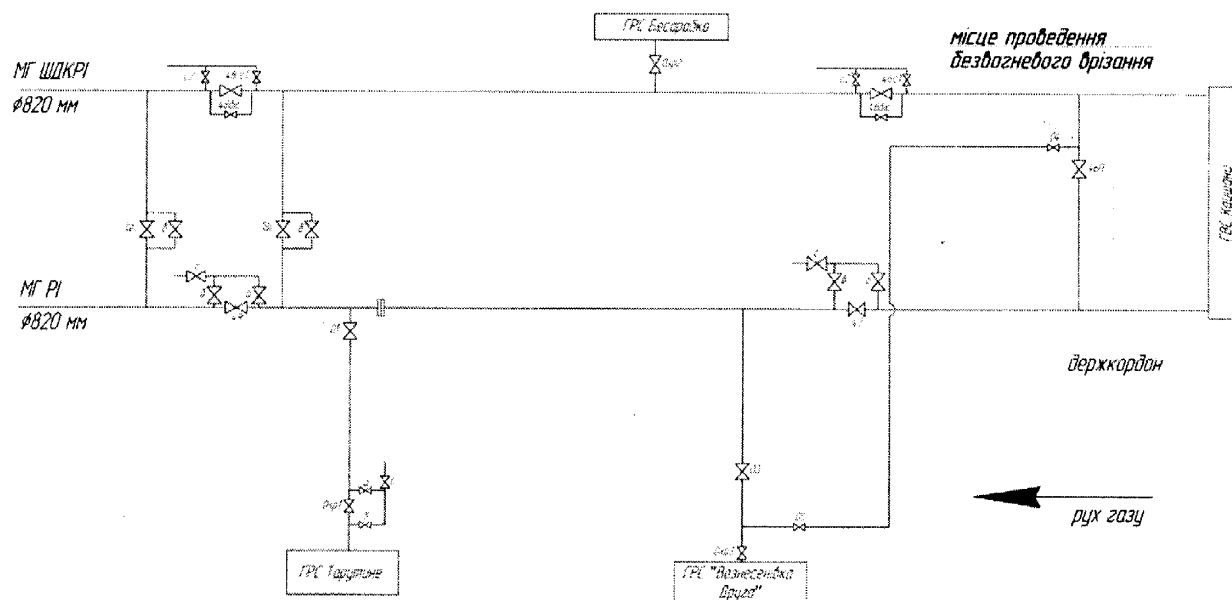


Рис. 4.6. Схема проведення вогневих робіт

17 вересня 2008 року о 9 год. 20 хв. розпочалися роботи безпосередньо з проведення безвогневого врізання в діючий газопровід з приварення патрубку діаметром 108x8 мм і довжиною 150 мм, підготовка якого була проведена попередньо. Приварювання проводилось за допомогою ручного дугового зварювання з використанням електродів УОНИ-13/55 (рисунок 4.7). В процесі проведення зварювальних робіт тиск в газопроводі-перемичці діаметром 529x8 мм (сталь 17ГС, Челябінський трубопрокатний завод) був понижений до величини 3 МПа, розрахованої за запропонованою методикою. Тривалість накладання першого шва складала 5 хв. 10 с., загальна тривалість процесу приварювання патрубку накладанням 3 шарів шва складала 36 хв. Процес приварювання патрубку було закінчено о 9 год. 56 хв. Після приварювання патрубку розпочався процес монтажу і приварювання кульового крана з ручним приводом безколязнього встановлення з торцями під приварювання ПТ-39153.06, Ду100мм, Ру=12,5 МПа, габаритна довжина 440 мм. На вільному кінці крану попередньо для монтажу пристрою для безвогневого врізання приварено фланець (Ду100 мм, зовнішній діаметр

230 мм, число кріпильних болтів 8, різьба М20, $R_y=6,4$ МПа). Тривалість процесу виставлення, монтажу і приварювання крана склала 66 хв. Процес було завершено о 1 год. 03 хв.

Після встановлення крана розпочато процес монтажу пристрою для безвогневого врізання, згідно технологічного креслення приведенного в додатку Е. Процес монтажу розпочався з встановлення вала з фрезою, на якому встановлено обмотку ротора двигуна. На фланці кріпилася неметалічна частина пристрою з обмоткою статора двигуна. Підшипники ковзання, роль яких виконували бронзові втулки, розміщені у металевій частині корпусу, мають можливість осьового переміщення. На вільному кінці вала кріпився поршень, в якості якого використано поршень двигуна ГАЗ-24. Змонтована таким чином конструкція закривалася ковпаком-циліндром, в якому розміщений поршень. Ковпак-циліндр кріпився кріпильними болтами до фланця. Його висота вибиралася із розрахунку, щоб після закінчення прорізання отвору в стінці трубопроводу поршень знаходився у верхній точці ковпака-циліндра і при цьому фреза вийшла за межі крану. В даному випадку висота ковпака-циліндра склала 734 мм. Після закінчення монтажу системи до верхнього патрубку ковпака-циліндра підключався через гнучкий шланг високого тиску насос-дозатор НКМШ-1-26. Тривалість монтажу пристрою безвогневого врізання в трубопровід під тиском складала 106 хв. Процес монтажу закінчився о 12 год. 49 хв.

Перед початком проведення процесу безвогневого врізання в діючий газопровід під тиском було проведено тестові випробування пристрою, котрі полягали у перевірці режиму роботи насоса-дозатора, який включався 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.

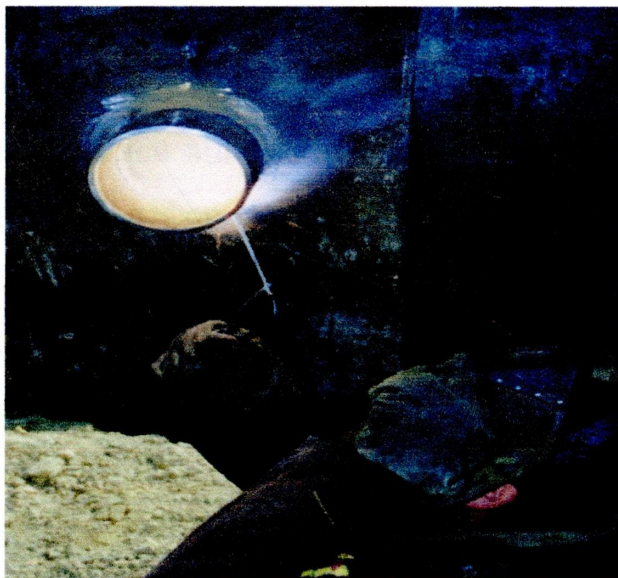


Рис. 4.7. Приварювання патрубка-відводу

Безпосередньо по закінченні тестування системи почалася 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 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 оправдав і може бути застосований на діючих газопроводах з метою безпечного та безперервного проведення врізання.

Висновки по розділу 4

1. На основі проведених досліджень формування температурного поля в стінці труби під дією рухомого джерела тепла і залежностей механічних властивостей трубних сталей від температури розроблено метод визначення характеристик напружено-деформованого стану стінки труби при нагріванні.

2. Використання запропонованого методу визначення характеристик напружено-деформованого стану стінки труби при нагріванні дозволило розрахунковим шляхом встановити величину допустимого тиску в трубопроводі при місцевому нагріванні стінки зварювальною дугою і встановити його залежності від характеристик матеріалу труби, товщини стінки та теплової дії джерела.

3. Результати проведених досліджень і розробок викладено як розділ галузевої методики “Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання” і з їх використанням заплановано і здійснено безвогневе врізання в газопровід-перемичку між газопроводами ШДКРІ та РІ, що показали високу ефективність способу.

ОСНОВНІ 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 $(20-900)^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що в діапазоні зміни температур $(20-450)^{\circ}\text{C}$ 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 $(0-259)^{\circ}\text{C}$ 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 ШДКРІ та РІ і показали високу ефективність способу. Результати виконаних розробок ввійшли в комплексну галузеву методику “Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабієв Г.М. Транзитні можливості газотранспортної системи України: сьогодення та перспективи / Г.М. Бабієв // Вісник національної газової спілки України. – 2005. – № 2. – С. 12–15.
2. Бут В.С. До проблеми ремонту магістральних газопроводів під тиском / В.С. Бут // Сварщик. – 1998. – № 1. – С. 6–7.
3. Василик А.В. Теплові розрахунки при зварюванні / А.В. Василик, Я.М. Дрогомирецький, Я.А. Криль. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 209 с. – ISBN 966-694-040-X.
4. 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.
5. 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.
6. Запухляк В.Б. Теоретичні дослідження температурних процесів під час приварювання патрубків до діючого трубопроводу / В.Б. Запухляк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №3(36). – С. 53-55.
7. Інструкція з технології і техніки безпеки приєднання газопроводів, газопроводів-відгалужень до діючих МГ під тиском з застосуванням зварювальних робіт: Затв. Першим заступником генерального директора ДК "Укртрансгаз" 01.03.2001. – Харків: УкрНДІгаз, 2001. – 66 с.
8. Комплексна галузева методика. Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання: Затв. Директором ВРТП Укренергосервіс 25.12.2009. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 88 с.
9. 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.

10. НАК Нафтогаз України <http://www.naftogaz.com>
11. Обслуговування і ремонт газопроводів : монографія / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків, В.В. Костів – Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2009. – 712 с. – ISBN 978-966-668-208-9.
12. Пат. 81332 А Україна, МПК F 16 L 41/00. Пристрій для безвогневого врізування відводу в діючий трубопровід / Грудз В.Я., Запужляк 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.
13. Пат.33752 А Україна, МПК F 16 L 41/04. Пристрій для без вогневої врізки відводу в діючий трубопровід / Грудз В.Я., Вржук Л.С., Мартинюк О.Т., Боднарчук В.М. ; заявник і власник патенту ІФНТУНГ. – № 99031774 ; заявл. 30.03.99 ; опубл. 15.02.01, Бюл. № 1. – 6 с.
14. Порівняльний аналіз енергетичної безпеки ЄС та України : звіт аналітично-дорадчого центру Блакитної стрічки ПРООН. – 2007. – 33 с.
15. Розподіл температури в стінці діючого трубопроводу під час приварювання до нього патрубку-відводу : Матеріали науково-практичної конференції "Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовки кадрів галузі", Івано-Франківськ, 2-3 верес. 2010р. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 68 с.
16. 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.
17. Технологічна інструкція з ремонту магістральних газопроводів під тиском із застосуванням дугового зварювання. Затв. Першим заступником

"Укртрансгаз", 2000. – 111 с.

18. Трубопровідний транспорт газу : монографія / [М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.] ; за ред. М.П. Ковалка; Аген. з рац. вик. енерг. та екол. – К. : Арена, 2002. – 600 с. – ISBN 966-96172-0-0.
19. А.с. 1196600 СССР, МКИ F 16 L 41/04, В 23 В 41/08. Устройство для врезки отвода в действующий трубопровод / Л.М. Рубинштейн, Я.М. Флакс, М.В. Готлиб (СССР). – №3756288 / 29-08 ; заявл. 20.06.84 ; опубл. 07.12.85, Бюл. №45.
20. А.с. 1361413 СССР, МКИ F 16 L 41/04, В 23 В 41/08. Устройство для врезки отвода в действующий трубопровод / М.В. Готлиб, Я.М. Флакс, Л.М. Рубинштейн (СССР). – №4096492 / 29-08 ; заявл. 15.07.86 ; опубл. 23.12.87, Бюл. №47.
21. А.с. 780612 СССР, МКИ F 16 L 41/04. Способ присоединения отвода к действующему трубопроводу / В.П. Каревский, В.В. Колпиков, А.Н. Ольшанский, В.В. Дьяченко (СССР). – №2620932 / 25-08 ; заявл. 31.05.78 ; опубл. 15.11.80, Бюл. №42.
22. А.с. 832229 СССР, МКИ F 16 L 41/04. Устройство для врезки трубопровод / В.А. Малык, П.В. Волоценко, А.Н. Явор, С.Л. Кочарян, И.Н. Панасенко (СССР). – №2500027 / 29-08 ; заявл. 27.06.77 ; опубл. 23.05.81, Бюл. №19.
23. А.с. 929953 СССР, МКИ F 16 L 41/04. Устройство для врезки отводов в трубопровод / Л.М. Рубинштейн, Я.М. Флакс, и В.С. Чистов (СССР). – №2848782 / 29-08 ; заявл. 29.11.79 ; опубл. 23.05.82, Бюл. №19.
24. А.с. 1114852 СССР, МКИ F 16 L 55/16. Устройство для перекрытия трубопровода / М.Э. Шварц, В.А. Кострыкин, В.Х. Галюк, В.К. Липский, В.М. Чулин, В.Б. Белоусов, В.А. Юфин (СССР). – № 3537066 / 29 ; заявл. 10.01.83 ; опубл. 23.09.84, Бюл. № 35.
25. А.с. 1333931 СССР, МКИ F 16 L 55/18. Устройство для перекрытия течи в

- трубопроводе / М.И. Брехман, Э.Р. Резник (СССР). – № 3957636 / 23; заявл. 27.09.85; опубл. 30.08.87, Бюл. № 32.
26. А.с. 1024652 СССР, МКИ F 16 L 55/18. Устройство для перекрытия трубопровода / Ю.Н. Васильев, З.Т. Галиуллин, С.П. Зарицкий, В.Н. Лось, В.Е. Павленко (СССР). – № 3326387 / 29; заявл. 31.07.81; опубл. 23.06.83, Бюл. № 23.
27. А.с. 998811 СССР, МКИ F 16 L 55/18. Устройство для перекрытия дефектного участка действующего трубопровода / А.Д. Бальзак, И.Н. Некрич, Л.В. Пристай, Г.Л. Литвинов, Г.В. Луков (СССР). – № 2774996 / 29; заявл. 05.06.79; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.
28. Авдонин А.С. Прикладные методы расчета оболочки тонкостенных конструкций / А.С. Авдонин. – М. : Машиностроение, 1969. – 404 с.
29. Анучкин М.П. Трубы для магистральных трубопроводов / М.П. Анучкин, В.Н. Горицкий, Б.И. Мирошниченко. – М. : Недра, 1986. – 231 с.
30. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. – М. : Наука, 1974. – 432с.
31. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов (справочник) : А.В. Бобылев. – М. : Металлургия, 1987. – 208 с.
32. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров вузов : И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 704 с.
33. Бут В.С. Присоединение дуговой сваркой отводов к магистральным нефтепроводам под давлением / В.С. Бут. – М. : ВНИИОЭНГ, 1991. – 91 с. – (Обзор, информ. Сер. “Транспорт и хранение нефти”).
34. Бут В.С. Присоединение отводов к магистральным нефтепроводам под давлением дуговой сваркой : автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.03.06 “Технология и машины сварочного производства” / Бут Виктор Степанович ; инст. электросварки им. Е.О. Патона. – К., 1986. – 16 с.
35. Бут В.С., Щербак А.В. Обоснование применения дуговой сварки при

- ремонте магистральных трубопроводов под давлением / В.С. Бут, А.В. Щербак // Сварщик. – 2001. – № 3. – С. 15–19.
36. Выгодский М.Я. Дифференциальное исчисление : у 2 т. / М.Я. Выгодский. – М. : Наука, 1965 – 689 с.
Т.2. – 1965. – 592 с.
37. Гаген Ю.Г. Тепловые расчеты при сварке трубопроводов и конструкций : учеб. пособ. / Ю.Г. Гаген, В.Д. Таран. – М. : 1973. – 92 с.
38. Галицин А.С. Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности / А.С. Галицин, А.Н. Жуковский. – К. : Наукова думка, 1976. – 282 с.
39. Грабин В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. – К. : Наукова думка, 1978. – 276 с.
40. Дифференцирование функций одной и нескольких переменных с приложениями : учебное пособие / Д.А. Мустафина, И.В. Ребро, С.Ю. Кузьмин, Н.Н. Короткова. – Волгоград : РПК “Политехник”, 2009. – 118 с.
41. Добрушин Л.Д. Опыт подключения отводов к действующим магистральным газопроводам под давлением с использованием бандажного устройства, сварки взрывом и дуговой сварки /Л.Д.Добрушин, С.А.Волошко, Г.А.Иващенко и др. // Применение энергии взрыва в сварочной технике. – К. : ИЭС, 1985. – с. 80-90.
42. Егерман Г.Р. Ремонт магистральных трубопроводов / Г.Р. Егерман, М.Д. Джафаров, Е.Л. Никитин. – М.: Недра, 1972. – 265 с.
43. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах (справочник) / В.Е. Зиновьев. – М. : Metallurgy, 1989. – 384 с.
44. Золоторевский В.С. Механические испытания и свойства металлов : В.С. Золоторевский. - М.: Metallurgy, 1974. – 350 с.
45. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов : В.С.

- Золоторевский. - М. : Металлургия, 1983. – 351 с.
46. Зубов Л.М. Методы нелинейной теории упругости в теории оболочек / Л.М. Зубов. – Изд. ростовского университета, 1982. – 144 с.
47. Ингерсолл Л.Р. Теплопроводность, ее применение в технике и геологии / Л.Р. Ингерсолл, О.Дж. Зобель, А.К. Ингерсолл. – М. : Ленинград, 1959. – 262 с.
48. Инструкция по технологии производства работ на газопроводах врезкой под давлением : Утв. распоряжением ОАО “Газром” 03.04.2007. – 236 с.
49. Инструкция по технологии сварки и резки труб при производстве ремонтно-восстановительных работ на магистральных газопроводах : Утв. заместителем Министра газовой промышленности 24.02.1986. – М. : 1986. – 92 с.
50. Капитальный ремонт магистральных трубопроводов / [В.Л. Березин, К.Е. Ращепкин, Л.Г. Телегин и др.]. – М.: Недра, 1978. – 346 с.
51. Комплексная механизация капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов / [Б.В. Будзуляк, Н.Х. Халлыев, А.М. Тютнев и др.] ; под общ. ред. Н.Х. Халлыева. – М. : Недра, 2004. – 216 с. – ISBN 5-8365-0214-5.
52. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1968. – 720 с.
53. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1970. – 712 с.
54. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С.А. Куркин. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
55. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
56. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков / Л.С. Лившиц. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.

57. Мазель А.Г. Муфтование локальных повреждений трубопроводов / А.Г. Мазель, Л.А. Гобарев, Е.В. Лопатин, К.М. Нагорнов, А.И. Рыбаков, Ю.Т. Кенегесов, В.А. Шишко // Газовая промышленность. – 1997. – № 3. – С. 20-23.
58. Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М. : Елима, 2004. – 1104 с. – ISBN 5-89674-011-5.
59. Махненко В.И. Расчет напряжений и деформаций в тонкостенной оболочке вращения при положении круговых швов / В.И. Махненко, Е.А. Великонваненко // Автоматическая сварка. – 1982. – № 3.
60. Металлы. Методы испытаний на растяжение (ISO 6892 – 84: 1984, IDT) : ДСТУ ISO 6892 – 84 : 1984. – [Действующей от 1986 -01 - 01]. – М. : Стандартиформ, 2005. – 22 с.
61. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах (ISO 783 – 89: 1984, IDT) : ДСТУ ISO 783 – 89 : 1989. - [Действующей от 1986 -01 - 01]. – М. : Стандартиформ, 2005. – 41 с.
62. Немыцкий В. Курс математического анализа / В. Немыцкий, М. Слудская, А. Черкасов ; под общ. ред. – 3-е изд., перераб. – М. : 1957 – . Т.1. – 1957. – 488 с.
63. Новые методы ремонта магистральных трубопроводов: Сб. Транспорт и подземное хранение газа / [И.С. Хретинин, В.А. Иванов, А.В. Парипский и др.]. – М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – 56 с.
64. Определение расчетной ширины зоны сплавления кольцевых швов с трубопроводом / В.С. Бут, Г.А. Иващенко, М.Н. Галеев, В.Х. Галюк. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987. – С. 43-47. – (Исследования в области надежности и эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов).
65. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 252 с.
66. Пат. 4351349 США, МПК F 16 L 055/10. Pipe repair kit apparatus and

method : Пат. 4351349 США, МПК F 16 L 055/10 L. Peter (США).

67. Пат. 15841 ГДР, МПК F 16 L 055/18. Device for pipeline ceiling : Пат. 15841 ГДР, МПК F 16 L 055/18 G. Michaelsen, M. Haustein.
68. Пелех Б.Л. Обобщенная теория оболочек / Б.Л. Пелех. – Львов : Вища школа, 1978. – 161 с.
69. Писаренко Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1976. – 416 с.
70. Подстригач Я.С. Обобщенная термомеханика / Я.С. Подстригач, Ю.М. Коляно. – К. : Наукова думка, 1976. – 310 с.
71. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинах. – Киев: Наукова думка, 1972. – 308с.
72. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов / [И.Н. Миролюбов, С.А. Енгальчев, Н.Д. Сергиевский и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Высшая школа, 1967. – 483 с.
73. Проблемы безопасности врезки в действующий трубопровод : Материалы V международной научно-технической конференции “Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта”, Новополоцк, 07-09 июня 2006р. – Новополоцк, 2006. – 300 с. – ISBN 985-418-231-2.
74. Промышленная безопасность магистрального трубопроводного транспорта : учеб. пособ. / [В.С. Аванесов, А.Б. Александров, С. А. Александров и др.] ; под ред. А.И. Владимирова, В.Я. Кершенбаума. – 2-е изд. – М. : Национальный институт нефти и газа, 2006. – 600 с. – ISBN 5-93157-073-X.
75. Прочность материалов при высоких температурах / Г.С. Писаренко, В.Н. Руденко, Г.Н. Третьяченко, В.Т. Трощенко ; Академия наук Украинской ССР. – К. : Наукова думка, 1966. – 796 с.
76. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М. : ГИФМЛ, 1962. – 456 с.

77. Разработка режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением / [Я.И. Буран, В.Х. Галюк, А.С. Джарджиманов и др.]. – М.: ВНИИОЭНГ, 1981. – Вып. 1. – с. 13-16. – (Экспресс-информ. Сер. "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов).
78. Расчет температурных полей в пластинах при электросварке плавлением / [А.А. Казимиров, А.Е. Недосека, Л.М. Лобанов и др.]. – К. : Наукова думка, 1968. – 832 с.
79. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа / П.И. Романовский. – 4-е изд. – М. : Наука, 1964. – 304 с.
80. Рудкевич Е.А. Функции комплексного переменного и операционное исчисление : учебное пособие. / Е.А. Рудкевич. – Тула : Тул. Гос. Ун-т, 2004. – 64 с.
81. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : ГНТИМЛ, 1951. – 297 с.
82. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз : [учеб. для вузов] / Р.А. Алиев, И.В. Березина, Л.Г. Телегин, Е.И. Яковлев – М. : Недра, 1987. – 271 с.
83. Сопротивление материалов / [Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. – К. : Вища школа, 1979. – 665 с.
84. Таран В.Д. Сварка магистральных трубопроводов и конструкций / В.Д. Таран. – М. : Недра, 1970. – 384 с.
85. Термоупругость тел при переменных коэффициентах теплоотдачи / Я.С. Подстригач, Ю.М. Коляно, В.И. Громовы к, В.Л. Лозбень. – К.: Наукова думка, 1977. – 160 с.
86. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением : под ред. Б.Е.Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
87. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер; под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М. : Наука, 1966. –

- 636 с.
88. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов / С.П. Тимошенко. – 2-е изд. – М. : Наука, 1965 –. Т.1. – 1965. – 364 с.
Т.2. – 1965. – 480 с.
 89. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
 90. Третьяков А.В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании (справочник) / А.В. Третьяков, Г.К. Трофимов, М.К. Гурьянова. – М. : Машиностроение, 1971. – 65 с.
 91. Фролов В.В. Теоретические основы сварки / В.В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1970. - 591 с.
 92. Халлыев Н.Х. Ремонт магистральных газонефтепроводов : [учеб. пособ]/ Н.Х. Халлыев, Б.В. Будзуляк, М.А. Лежнев. – 2-е изд., исправ. и доп. – М. : 2005. – 144 с. – ISBN 5-7264-0326-8
 93. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.
 94. Щербинский В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с. – ISBN 5-274-00604-3.
 95. Экспериментальные исследования сварочных напряжений и деформаций / [В.С. Касаткин, Л.М. Лобанов, В.В. Волков и др.]. – К. : Наукова думка, 1976. – 147 с.
 96. API 1104. Standard for Welding Pipelines and Related Facilities. USA
 97. API.1107. API-AGA Joint Committee on Oil and Gas Pipeline Field Welding Practices. Pipeline Maintenance Welding Practices
 98. API 2201. Committee on Safety and Fire Protection, USA. Procedures for Welding or Hot Tapping on Equipment Containing Flammables. Fire and Safety Coordination
 99. De Hertogh J., Illegghems H., Welding natural gas – filled pipelines // Metal construction and British Welding V. – 1974. – N 7. – P. 224-227.

- 100 Gassie B.A. Hot tap connections on gas pipelines operation at high pressure // Gas Engineering and Management. – 1974. – N 10. – P. 309-313.
- 101 Guidelines for Repair and Hot Tap Welding on Pressurised Pipelines. Design Curve Supplement for Natural Gas Pipelines. Battelle Columbus Division, USA, 1981
- 102 Guidelines for Welding onto In-Service Pipelines. EWI Project No j 5459. Edison Welding Institute Columbus, USA, 1991
- 103 Hicks Dave J. Guidelines for welding on pressurized pipe // Pipeline and Gas J. – 1983. – N 3. – P. 17-19.
- 104 High-Pressure Tapping and Plugging Equipment. Engineered Equipment for Pipelines, Gas Mains and Plant Piping. T.D. Williamson, Inc., USA
- 105 IIW XI-E-14-85. Questionnaire on welding of pipelines under pressure. – P. 34.
- 106 Kiefner J.F. Criteria set for pipeline repair // Oil and Gas J. – 1978. – N 32. – P. 104-118.
- 107 Kiefner J.F. Repair of Line Pipe Defects – by Full – Encirclement sleeves // Weld J. – 1977. - N 6. - P. 26-34.
- 108 Mishler W., Kiefner J. Study compares hottap welding methods for pressurized pipelines // Oil and Gas J. – 1981. – N 24. – P. 84-93.
- 109 Phelps B., Gossie B.A., Evans N.H. Welding on to live natural gas pipelines // Metal Construction. – 1976. – N 8. – P. 350-354.
- 110 Rietjens P. Procedures for Damage Assessment. I In- Service Weeding and Repair of pipelines. J– 16 th World Gas conference. - Munich, 24-27.06.85.
- 111 Boreman D., Wimmer B., Lewis K. Repair technologies for gas transmission pipelines // Pipeline and Gas J. – 2000. – № 3. – P. 46–49.
- 112 Rhea S., Grimes K. Epoxy-filled repair sleeve installs without shutdown // Pipeline end Gas J. – 1995. – № 6. – P. 30–33.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
ПРОГРАМА ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ
РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА В СТІНЦІ
ДЮЧОГО ГАЗОПРОВОДУ $D_3=1420$ ММ ПІД
ЧАС ПРИВАРЮВАННЯ
ПАТРУБКА З ФЛАНЦЕМ $D_3=529$ ММ


```

PROGRAM PR10
DIMENSION XNN(400),AG(7),T(7),R(12),FI(13),TAY(5),TE(5,12,13), FIG(13)
REAL LAMBDA, KAP2
OPEN(UNIT=10,FILE='REZPR10')
A=7.5E-06;KAP2=59.102; OMEGA=1.0502E-02; R0=0.2645;R(1)=0.2
R(2)=0.21; R(3)=0.22; R(4)=0.23; R(5)=0.25; R(6)=0.25; R(7)=0.26
R(8)=0.264; R(9)=0.266; R(10)=0.27;R(11)=0.28; R(12)=0.3
FI(1)=0.; DF=5.2359874E-01
PI=3.14159265; LAMBDA=37.6;Q=187500.0; TAY(1)=120.
TAY(2)=240.; TAY(3)=360.; TAY(4)=480.; TAY(5)=600.
DO 4 I=1,12
FI(I+1)=FI(I)+DF
4 CONTINUE
T(1)=-0.94910791; T(2)=-0.74153119; T(3)=-0.40584515; T(4)=0.
T(5)=0.40584515; T(6)=0.74153119; T(7)=0.94910791
AG(1)=0.12948497; AG(2)=0.27970539; AG(3)=0.38183005
AG(4)=0.41795918; AG(5)=0.38183005; AG(6)=0.27970539
AG(7)=0.12948497; OMEG2=OMEGA*OMEGA; A2=A*A; N=0
DO 5 I=1,5; TAY0=TAY(I)
DO 6 J=1,12; RS=R(J); STEN=0.
DO 7 M=1,13
20 CALL BFN(R0,RS,N,XNN,P0); B0=P0; SUMN1=0.; SUMN2=0.
SUMN3=0.; SUMN4=0.
DO 8 L=1,400
C0=XNN(L); SUM1=0.;SUM2=0.;SUM3=0.;SUM4=0.
DO 9 K=1,7
XK=0.5*(C0+B0)+0.5*(C0-B0)*T(K); XK2=XK*XK;Z0=XK*R0
Z1=XK*RS; Y1=BESJN(N,Z0); Y2=BESJN(N,Z1); U0=Y1*Y2; EN=REAL(N)
XK2K=XK2+KAP2; EN2=EN*EN; EN2OM=EN2*OMEG2
XK2K2=XK2K*XK2K; ZN=A2*XK2K2+EN2OM; PF1=A2*XK*XK2K*U0/ZN
PF2=A*EN*OMEGA*XK*U0/ZN;V=A*TAY0*XK2K; U=EXP(-V)
PF3=PF1*U; PF4=PF2*U; SUM1=SUM1+PF1*AG(K)
SUM2=SUM2+PF2*AG(K); SUM3=SUM3+PF3*AG(K); SUM4=SUM4+PF4*AG(K)
9 CONTINUE
D0=0.5*(C0-B0); SUM11=D0*SUM1; SUM21=D0*SUM2; SUM31=D0*SUM3
SUM41=D0*SUM4; SUMN1=SUMN1+SUM11; SUMN2=SUMN2+SUM21
SUMN3=SUMN3+SUM31; SUMN4=SUMN4+SUM41; B0=C0
8 CONTINUE
FI0=FI(M); FX=EN*FI0; FX1=EN*(FI0-OMEGA*TAY0)
IF(N .EQ. 0) THEN
TEN=0.5*(COS(FX1)*SUMN1-COS(FX)*SUMN3)
ELSE
TEN=COS(FX1)*SUMN1-SIN(FX1)*SUMN2-COS(FX)*SUMN3+SIN(FX)*SUMN4
ENDIF
STEN=STEN+TEN
IF((N .EQ. 20) .AND. (STEN .GT. 0.)) THEN
TE(I,J,M)=STEN*Q/(PI*LAMBDA)
ENDIF
IF((N .EQ. 20) .AND. (STEN .LT. 0.)) THEN
TE(I,J,M)=0.
ENDIF
IF(N .LT. 20) THEN
N=N+1; GOTO 20
ENDIF
IF(N .GT. 20) THEN
GOTO 30
ENDIF
30 N=0; STEN=0.
7 CONTINUE
6 CONTINUE
5 CONTINUE
WRITE(10,100)
100 FORMAT(/25X, 'ВХІДНІ ДАНІ ПРОГРАМИ PR10'/)
WRITE(10,101) A, KAP2, OMEGA,R0
101 FORMAT(10X, 'A=', E8.2, 2X, 'KAP2=', F6.3, 2X, 'OMEGA=', E11.5, 2X, 'R0=', F6.4)
DO 60 K=1,13
FIG(K)=FI(K)*180./PI
60 CONTINUE
WRITE(10,107)
107 FORMAT(10X, 'K', 5X, 'TAY', 5X, 'R', 7X, 'FI', 6X, 'TE')
! ЗАПИС РЕЗУЛЬТАТІВ У ФАЙЛ REZPR10

```

```

N=1
DO 92 I=1,5
DO 93 J=1,12
DO 94 M=1,13
WRITE(10,106) N, TAY(I), R(J), FIG(M), TE(I,J,M)
N=N+1
94 CONTINUE
93 CONTINUE
92 CONTINUE
106 FORMAT(10X,I3,3X,F5.1,3X,F5.3,3X,F5.1,3X,E12.6)
CLOSE(10)
STOP
END
! ПІДПРОГРАМА ВИЗНАЧЕННЯ НУЛІВ ДОБУТКУ БЕССЕЛЕВИХ ФУНКЦІЙ
SUBROUTINE BFN(R0,R,L,XN,P0)
PARAMETER(I=400)
DIMENSION XN(I)
IF(L .LT. 4) THEN
  P0=0.
ELSE
  IF(R0 .GT. R) THEN
    RB=R0
  ELSE
    RB=R
  ENDIF
  P=0.
  11 P=P+0.05; X=RB*P; Y=BESJN(L,X)
  IF(Y .GT. 1.0E-06) THEN
    P0=P
  ELSE
    GOTO 11
  ENDIF
ENDIF
P=P0; X1=R0*P; X2=R*P
DO 2 K=1,I
Y1=BESJN(L,X1); Y2=BESJN(L,X2); Z1=Y1*Y2
4 P=P+0.05; X1=R0*P; X2=R*P; Y1=BESJN(L,X1); Y2=BESJN(L,X2)
Z2=Y1*Y2; U=Z1/Z2
IF(U) 6,3,3
6 B=P; A=P-0.05; GOTO 7
3 Z1=Z2; GOTO 4
7 P1=(Z2*A-Z1*B)/(Z2-Z1); X1=R0*P1; X2=R*P1
Y1=BESJN(L,X1); Y2=BESJN(L,X2); Z3=Y1*Y2
IF(ABS(Z3)-1.0E-06) 8,8,5
5 U1=Z3/Z1
IF(U1) 10,9,9
10 B=P1; Z2=Z3; GOTO 7
9 A=P1; Z1=Z3; GOTO 7
8 XN(K)=P1; P=P1+0.05; X1=R0*P; X2=R*P
2 CONTINUE
RETURN
END

```

ВХІДНІ ДАНІ ПРОГРАМИ PR10

A= .75E-05 KAP2=59.102 OMEGA= .10502E-01 R0= .2645

K	TAY	R	FI	TE
1	120.0	.200	.0	.189624E+02
2	120.0	.200	30.0	.262003E+02
3	120.0	.200	60.0	.156264E+01
4	120.0	.200	90.0	.123722E-01
5	120.0	.200	120.0	.677526E-02
6	120.0	.200	150.0	.000000E+00
7	120.0	.200	180.0	.175703E-01
8	120.0	.200	210.0	.000000E+00
9	120.0	.200	240.0	.000000E+00
10	120.0	.200	270.0	.363942E-03
11	120.0	.200	300.0	.446019E-03
12	120.0	.200	330.0	.962305E-01
13	120.0	.200	360.0	.189624E+02
14	120.0	.210	.0	.268750E+02
15	120.0	.210	30.0	.440661E+02
16	120.0	.210	60.0	.543220E+01
17	120.0	.210	90.0	.404601E-01
18	120.0	.210	120.0	.000000E+00
19	120.0	.210	150.0	.000000E+00
20	120.0	.210	180.0	.493195E-02
21	120.0	.210	210.0	.000000E+00
22	120.0	.210	240.0	.782036E-02
23	120.0	.210	270.0	.499888E-02
24	120.0	.210	300.0	.000000E+00
25	120.0	.210	330.0	.912198E-01
26	120.0	.210	360.0	.268749E+02
27	120.0	.220	.0	.358023E+02
28	120.0	.220	30.0	.682761E+02
29	120.0	.220	60.0	.172495E+02
30	120.0	.220	90.0	.000000E+00
31	120.0	.220	120.0	.000000E+00
32	120.0	.220	150.0	.382645E-01
33	120.0	.220	180.0	.296955E-02
34	120.0	.220	210.0	.000000E+00
35	120.0	.220	240.0	.174169E-01
36	120.0	.220	270.0	.269212E-01
37	120.0	.220	300.0	.000000E+00
38	120.0	.220	330.0	.950091E-01
39	120.0	.220	360.0	.358022E+02
40	120.0	.230	.0	.448268E+02
41	120.0	.230	30.0	.967613E+02
42	120.0	.230	60.0	.493279E+02
43	120.0	.230	90.0	.000000E+00
44	120.0	.230	120.0	.154553E+00
45	120.0	.230	150.0	.726160E-01
46	120.0	.230	180.0	.000000E+00
47	120.0	.230	210.0	.000000E+00
48	120.0	.230	240.0	.108412E+00
49	120.0	.230	270.0	.234861E-02
50	120.0	.230	300.0	.000000E+00
51	120.0	.230	330.0	.181584E+00
52	120.0	.230	360.0	.448266E+02
53	120.0	.250	.0	.559559E+02
54	120.0	.250	30.0	.149478E+03
55	120.0	.250	60.0	.229246E+03
56	120.0	.250	90.0	.646544E+01
57	120.0	.250	120.0	.118978E+01
58	120.0	.250	150.0	.000000E+00
59	120.0	.250	180.0	.112089E+00
60	120.0	.250	210.0	.130911E+01
61	120.0	.250	240.0	.000000E+00
62	120.0	.250	270.0	.000000E+00
63	120.0	.250	300.0	.123157E+01
64	120.0	.250	330.0	.513960E+00
65	120.0	.250	360.0	.559557E+02
66	120.0	.250	.0	.559559E+02
67	120.0	.250	30.0	.149478E+03
68	120.0	.250	60.0	.229246E+03
69	120.0	.250	90.0	.646544E+01
70	120.0	.250	120.0	.118978E+01
71	120.0	.250	150.0	.000000E+00
72	120.0	.250	180.0	.112089E+00

REZPR10

73	120.0	.250	210.0	.130911E+01
74	120.0	.250	240.0	.000000E+00
75	120.0	.250	270.0	.000000E+00
76	120.0	.250	300.0	.123157E+01
77	120.0	.250	330.0	.513960E+00
78	120.0	.250	360.0	.559557E+02
79	120.0	.260	.0	.565824E+02
80	120.0	.260	30.0	.172907E+03
81	120.0	.260	60.0	.300061E+03
82	120.0	.260	90.0	.272583E+02
83	120.0	.260	120.0	.000000E+00
84	120.0	.260	150.0	.000000E+00
85	120.0	.260	180.0	.536206E+01
86	120.0	.260	210.0	.101182E+01
87	120.0	.260	240.0	.000000E+00
88	120.0	.260	270.0	.151682E+01
89	120.0	.260	300.0	.444188E+01
90	120.0	.260	330.0	.000000E+00
91	120.0	.260	360.0	.565821E+02
92	120.0	.264	.0	.597888E+02
93	120.0	.264	30.0	.182555E+03
94	120.0	.264	60.0	.274070E+03
95	120.0	.264	90.0	.354700E+02
96	120.0	.264	120.0	.000000E+00
97	120.0	.264	150.0	.000000E+00
98	120.0	.264	180.0	.102290E+02
99	120.0	.264	210.0	.000000E+00
100	120.0	.264	240.0	.000000E+00
101	120.0	.264	270.0	.574404E+01
102	120.0	.264	300.0	.474895E+01
103	120.0	.264	330.0	.000000E+00
104	120.0	.264	360.0	.597886E+02
105	120.0	.266	.0	.581643E+02
106	120.0	.266	30.0	.179180E+03
107	120.0	.266	60.0	.284079E+03
108	120.0	.266	90.0	.338347E+02
109	120.0	.266	120.0	.000000E+00
110	120.0	.266	150.0	.000000E+00
111	120.0	.266	180.0	.876168E+01
112	120.0	.266	210.0	.000000E+00
113	120.0	.266	240.0	.000000E+00
114	120.0	.266	270.0	.431274E+01
115	120.0	.266	300.0	.485924E+01
116	120.0	.266	330.0	.000000E+00
117	120.0	.266	360.0	.581641E+02
118	120.0	.270	.0	.551432E+02
119	120.0	.270	30.0	.167079E+03
120	120.0	.270	60.0	.293518E+03
121	120.0	.270	90.0	.243316E+02
122	120.0	.270	120.0	.000000E+00
123	120.0	.270	150.0	.000000E+00
124	120.0	.270	180.0	.438698E+01
125	120.0	.270	210.0	.131782E+01
126	120.0	.270	240.0	.000000E+00
127	120.0	.270	270.0	.908889E+00
128	120.0	.270	300.0	.407083E+01
129	120.0	.270	330.0	.000000E+00
130	120.0	.270	360.0	.551429E+02
131	120.0	.280	.0	.526182E+02
132	120.0	.280	30.0	.138845E+03
133	120.0	.280	60.0	.206123E+03
134	120.0	.280	90.0	.496240E+01
135	120.0	.280	120.0	.132327E+01
136	120.0	.280	150.0	.000000E+00
137	120.0	.280	180.0	.000000E+00
138	120.0	.280	210.0	.115508E+01
139	120.0	.280	240.0	.000000E+00
140	120.0	.280	270.0	.000000E+00
141	120.0	.280	300.0	.943506E+00
142	120.0	.280	330.0	.593614E+00
143	120.0	.280	360.0	.526179E+02
144	120.0	.300	.0	.386397E+02
145	120.0	.300	30.0	.822229E+02
146	120.0	.300	60.0	.380955E+02
147	120.0	.300	90.0	.000000E+00
148	120.0	.300	120.0	.729556E-01
149	120.0	.300	150.0	.109791E+00

150	120.0	.300	180.0	.000000E+00
151	120.0	.300	210.0	.000000E+00
152	120.0	.300	240.0	.671642E-01
153	120.0	.300	270.0	.524969E-02
154	120.0	.300	300.0	.000000E+00
155	120.0	.300	330.0	.717154E-01
156	120.0	.300	360.0	.386395E+02
157	240.0	.200	.0	.250188E+02
158	240.0	.200	30.0	.499618E+02
159	240.0	.200	60.0	.471595E+02
160	240.0	.200	90.0	.351054E+02
161	240.0	.200	120.0	.995216E+01
162	240.0	.200	150.0	.135738E-01
163	240.0	.200	180.0	.000000E+00
164	240.0	.200	210.0	.000000E+00
165	240.0	.200	240.0	.000000E+00
166	240.0	.200	270.0	.000000E+00
167	240.0	.200	300.0	.000000E+00
168	240.0	.200	330.0	.114106E+01
169	240.0	.200	360.0	.250187E+02
170	240.0	.210	.0	.292590E+02
171	240.0	.210	30.0	.603016E+02
172	240.0	.210	60.0	.609525E+02
173	240.0	.210	90.0	.526278E+02
174	240.0	.210	120.0	.228343E+02
175	240.0	.210	150.0	.482180E-01
176	240.0	.210	180.0	.000000E+00
177	240.0	.210	210.0	.000000E+00
178	240.0	.210	240.0	.807847E-02
179	240.0	.210	270.0	.564085E-02
180	240.0	.210	300.0	.000000E+00
181	240.0	.210	330.0	.117249E+01
182	240.0	.210	360.0	.292589E+02
183	240.0	.220	.0	.331963E+02
184	240.0	.220	30.0	.703284E+02
185	240.0	.220	60.0	.753388E+02
186	240.0	.220	90.0	.738262E+02
187	240.0	.220	120.0	.471202E+02
188	240.0	.220	150.0	.179749E-01
189	240.0	.220	180.0	.000000E+00
190	240.0	.220	210.0	.000000E+00
191	240.0	.220	240.0	.332504E-01
192	240.0	.220	270.0	.230499E-02
193	240.0	.220	300.0	.000000E+00
194	240.0	.220	330.0	.118229E+01
195	240.0	.220	360.0	.331962E+02
196	240.0	.230	.0	.365029E+02
197	240.0	.230	30.0	.791739E+02
198	240.0	.230	60.0	.890325E+02
199	240.0	.230	90.0	.966507E+02
200	240.0	.230	120.0	.853273E+02
201	240.0	.230	150.0	.000000E+00
202	240.0	.230	180.0	.000000E+00
203	240.0	.230	210.0	.859920E-01
204	240.0	.230	240.0	.798426E-01
205	240.0	.230	270.0	.000000E+00
206	240.0	.230	300.0	.000000E+00
207	240.0	.230	330.0	.123448E+01
208	240.0	.230	360.0	.365028E+02
209	240.0	.250	.0	.395895E+02
210	240.0	.250	30.0	.920158E+02
211	240.0	.250	60.0	.108510E+03
212	240.0	.250	90.0	.130325E+03
213	240.0	.250	120.0	.183509E+03
214	240.0	.250	150.0	.000000E+00
215	240.0	.250	180.0	.306739E+01
216	240.0	.250	210.0	.113606E+01
217	240.0	.250	240.0	.000000E+00
218	240.0	.250	270.0	.000000E+00
219	240.0	.250	300.0	.128023E+01
220	240.0	.250	330.0	.423849E+00
221	240.0	.250	360.0	.395894E+02
222	240.0	.250	.0	.395895E+02
223	240.0	.250	30.0	.920158E+02
224	240.0	.250	60.0	.108510E+03
225	240.0	.250	90.0	.130325E+03
226	240.0	.250	120.0	.183509E+03

227	240.0	.250	150.0	.000000E+00
228	240.0	.250	180.0	.306739E+01
229	240.0	.250	210.0	.113606E+01
230	240.0	.250	240.0	.000000E+00
231	240.0	.250	270.0	.000000E+00
232	240.0	.250	300.0	.128023E+01
233	240.0	.250	330.0	.423849E+00
234	240.0	.250	360.0	.395894E+02
235	240.0	.260	.0	.420940E+02
236	240.0	.260	30.0	.972264E+02
237	240.0	.260	60.0	.105826E+03
238	240.0	.260	90.0	.134267E+03
239	240.0	.260	120.0	.232062E+03
240	240.0	.260	150.0	.251472E+02
241	240.0	.260	180.0	.149203E+02
242	240.0	.260	210.0	.000000E+00
243	240.0	.260	240.0	.000000E+00
244	240.0	.260	270.0	.464949E+01
245	240.0	.260	300.0	.138451E+01
246	240.0	.260	330.0	.000000E+00
247	240.0	.260	360.0	.420939E+02
248	240.0	.264	.0	.461493E+02
249	240.0	.264	30.0	.976659E+02
250	240.0	.264	60.0	.989725E+02
251	240.0	.264	90.0	.137740E+03
252	240.0	.264	120.0	.251161E+03
253	240.0	.264	150.0	.964109E+02
254	240.0	.264	180.0	.204060E+02
255	240.0	.264	210.0	.000000E+00
256	240.0	.264	240.0	.000000E+00
257	240.0	.264	270.0	.924428E+01
258	240.0	.264	300.0	.000000E+00
259	240.0	.264	330.0	.000000E+00
260	240.0	.264	360.0	.461492E+02
261	240.0	.266	.0	.445279E+02
262	240.0	.266	30.0	.972888E+02
263	240.0	.266	60.0	.100579E+03
264	240.0	.266	90.0	.135582E+03
265	240.0	.266	120.0	.245117E+03
266	240.0	.266	150.0	.713121E+02
267	240.0	.266	180.0	.191670E+02
268	240.0	.266	210.0	.000000E+00
269	240.0	.266	240.0	.000000E+00
270	240.0	.266	270.0	.783883E+01
271	240.0	.266	300.0	.000000E+00
272	240.0	.266	330.0	.000000E+00
273	240.0	.266	360.0	.445278E+02
274	240.0	.270	.0	.406553E+02
275	240.0	.270	30.0	.949820E+02
276	240.0	.270	60.0	.104645E+03
277	240.0	.270	90.0	.131144E+03
278	240.0	.270	120.0	.222678E+03
279	240.0	.270	150.0	.152111E+02
280	240.0	.270	180.0	.131951E+02
281	240.0	.270	210.0	.000000E+00
282	240.0	.270	240.0	.000000E+00
283	240.0	.270	270.0	.375346E+01
284	240.0	.270	300.0	.161328E+01
285	240.0	.270	330.0	.000000E+00
286	240.0	.270	360.0	.406552E+02
287	240.0	.280	.0	.372127E+02
288	240.0	.280	30.0	.865477E+02
289	240.0	.280	60.0	.101917E+03
290	240.0	.280	90.0	.122119E+03
291	240.0	.280	120.0	.168508E+03
292	240.0	.280	150.0	.000000E+00
293	240.0	.280	180.0	.225125E+01
294	240.0	.280	210.0	.117327E+01
295	240.0	.280	240.0	.000000E+00
296	240.0	.280	270.0	.000000E+00
297	240.0	.280	300.0	.113020E+01
298	240.0	.280	330.0	.308677E+00
299	240.0	.280	360.0	.372126E+02
300	240.0	.300	.0	.316818E+02
301	240.0	.300	30.0	.691024E+02
302	240.0	.300	60.0	.766241E+02
303	240.0	.300	90.0	.825829E+02

REZPR10

304	240.0	.300	120.0	.708106E+02
305	240.0	.300	150.0	.000000E+00
306	240.0	.300	180.0	.000000E+00
307	240.0	.300	210.0	.327375E-01
308	240.0	.300	240.0	.931344E-01
309	240.0	.300	270.0	.000000E+00
310	240.0	.300	300.0	.000000E+00
311	240.0	.300	330.0	.525835E+00
312	240.0	.300	360.0	.316817E+02
313	360.0	.200	.0	.241926E+02
314	360.0	.200	30.0	.479562E+02
315	360.0	.200	60.0	.519727E+02
316	360.0	.200	90.0	.520221E+02
317	360.0	.200	120.0	.495257E+02
318	360.0	.200	150.0	.413675E+02
319	360.0	.200	180.0	.214630E+02
320	360.0	.200	210.0	.279326E+00
321	360.0	.200	240.0	.000000E+00
322	360.0	.200	270.0	.597742E-02
323	360.0	.200	300.0	.375897E-01
324	360.0	.200	330.0	.251563E+01
325	360.0	.200	360.0	.241926E+02
326	360.0	.210	.0	.265824E+02
327	360.0	.210	30.0	.534986E+02
328	360.0	.210	60.0	.590658E+02
329	360.0	.210	90.0	.612930E+02
330	360.0	.210	120.0	.618224E+02
331	360.0	.210	150.0	.575307E+02
332	360.0	.210	180.0	.387485E+02
333	360.0	.210	210.0	.122740E+01
334	360.0	.210	240.0	.259066E-01
335	360.0	.210	270.0	.931538E-02
336	360.0	.210	300.0	.167888E-01
337	360.0	.210	330.0	.251948E+01
338	360.0	.210	360.0	.265823E+02
339	360.0	.220	.0	.286287E+02
340	360.0	.220	30.0	.584091E+02
341	360.0	.220	60.0	.655492E+02
342	360.0	.220	90.0	.700763E+02
343	360.0	.220	120.0	.741546E+02
344	360.0	.220	150.0	.756066E+02
345	360.0	.220	180.0	.640875E+02
346	360.0	.220	210.0	.525510E+01
347	360.0	.220	240.0	.942483E-01
348	360.0	.220	270.0	.000000E+00
349	360.0	.220	300.0	.142944E-01
350	360.0	.220	330.0	.252318E+01
351	360.0	.220	360.0	.286287E+02
352	360.0	.230	.0	.301630E+02
353	360.0	.230	30.0	.624591E+02
354	360.0	.230	60.0	.710427E+02
355	360.0	.230	90.0	.776539E+02
356	360.0	.230	120.0	.853922E+02
357	360.0	.230	150.0	.939510E+02
358	360.0	.230	180.0	.961870E+02
359	360.0	.230	210.0	.211856E+02
360	360.0	.230	240.0	.000000E+00
361	360.0	.230	270.0	.000000E+00
362	360.0	.230	300.0	.771807E-01
363	360.0	.230	330.0	.249699E+01
364	360.0	.230	360.0	.301630E+02
365	360.0	.250	.0	.318000E+02
366	360.0	.250	30.0	.683556E+02
367	360.0	.250	60.0	.766499E+02
368	360.0	.250	90.0	.858576E+02
369	360.0	.250	120.0	.101950E+03
370	360.0	.250	150.0	.122216E+03
371	360.0	.250	180.0	.153846E+03
372	360.0	.250	210.0	.207252E+03
373	360.0	.250	240.0	.000000E+00
374	360.0	.250	270.0	.186857E+01
375	360.0	.250	300.0	.111006E+01
376	360.0	.250	330.0	.743495E+00
377	360.0	.250	360.0	.318000E+02
378	360.0	.250	.0	.318000E+02
379	360.0	.250	30.0	.683556E+02
380	360.0	.250	60.0	.766499E+02

REZPR10

381	360.0	.250	90.0	.858576E+02
382	360.0	.250	120.0	.101950E+03
383	360.0	.250	150.0	.122216E+03
384	360.0	.250	180.0	.153846E+03
385	360.0	.250	210.0	.207252E+03
386	360.0	.250	240.0	.000000E+00
387	360.0	.250	270.0	.186857E+01
388	360.0	.250	300.0	.111006E+01
389	360.0	.250	330.0	.743495E+00
390	360.0	.250	360.0	.318000E+02
391	360.0	.260	.0	.360195E+02
392	360.0	.260	30.0	.690648E+02
393	360.0	.260	60.0	.726114E+02
394	360.0	.260	90.0	.887026E+02
395	360.0	.260	120.0	.108621E+03
396	360.0	.260	150.0	.120595E+03
397	360.0	.260	180.0	.162200E+03
398	360.0	.260	210.0	.444241E+03
399	360.0	.260	240.0	.000000E+00
400	360.0	.260	270.0	.104766E+02
401	360.0	.260	300.0	.000000E+00
402	360.0	.260	330.0	.000000E+00
403	360.0	.260	360.0	.360195E+02
404	360.0	.264	.0	.402670E+02
405	360.0	.264	30.0	.664230E+02
406	360.0	.264	60.0	.691369E+02
407	360.0	.264	90.0	.926590E+02
408	360.0	.264	120.0	.109620E+03
409	360.0	.264	150.0	.112348E+03
410	360.0	.264	180.0	.166731E+03
411	360.0	.264	210.0	.536870E+03
412	360.0	.264	240.0	.157105E+02
413	360.0	.264	270.0	.149927E+02
414	360.0	.264	300.0	.000000E+00
415	360.0	.264	330.0	.000000E+00
416	360.0	.264	360.0	.402669E+02
417	360.0	.266	.0	.387617E+02
418	360.0	.266	30.0	.670970E+02
419	360.0	.266	60.0	.696712E+02
420	360.0	.266	90.0	.907938E+02
421	360.0	.266	120.0	.109007E+03
422	360.0	.266	150.0	.114382E+03
423	360.0	.266	180.0	.164019E+03
424	360.0	.266	210.0	.513143E+03
425	360.0	.266	240.0	.994382E+01
426	360.0	.266	270.0	.138899E+02
427	360.0	.266	300.0	.000000E+00
428	360.0	.266	330.0	.000000E+00
429	360.0	.266	360.0	.387615E+02
430	360.0	.270	.0	.345423E+02
431	360.0	.270	30.0	.679941E+02
432	360.0	.270	60.0	.717879E+02
433	360.0	.270	90.0	.863173E+02
434	360.0	.270	120.0	.105873E+03
435	360.0	.270	150.0	.119236E+03
436	360.0	.270	180.0	.158319E+03
437	360.0	.270	210.0	.410968E+03
438	360.0	.270	240.0	.000000E+00
439	360.0	.270	270.0	.917872E+01
440	360.0	.270	300.0	.000000E+00
441	360.0	.270	330.0	.000000E+00
442	360.0	.270	360.0	.345422E+02
443	360.0	.280	.0	.297888E+02
444	360.0	.280	30.0	.646869E+02
445	360.0	.280	60.0	.723307E+02
446	360.0	.280	90.0	.807201E+02
447	360.0	.280	120.0	.954527E+02
448	360.0	.280	150.0	.114578E+03
449	360.0	.280	180.0	.143510E+03
450	360.0	.280	210.0	.177762E+03
451	360.0	.280	240.0	.000000E+00
452	360.0	.280	270.0	.134517E+01
453	360.0	.280	300.0	.109159E+01
454	360.0	.280	330.0	.460015E+00
455	360.0	.280	360.0	.297887E+02
456	360.0	.300	.0	.262195E+02
457	360.0	.300	30.0	.551883E+02

458	360.0	.300	60.0	.615689E+02
459	360.0	.300	90.0	.671897E+02
460	360.0	.300	120.0	.736566E+02
461	360.0	.300	150.0	.805319E+02
462	360.0	.300	180.0	.812736E+02
463	360.0	.300	210.0	.147013E+02
464	360.0	.300	240.0	.384457E-01
465	360.0	.300	270.0	.000000E+00
466	360.0	.300	300.0	.156810E-01
467	360.0	.300	330.0	.129319E+01
468	360.0	.300	360.0	.262194E+02
469	480.0	.200	.0	.222226E+02
470	480.0	.200	30.0	.426796E+02
471	480.0	.200	60.0	.483631E+02
472	480.0	.200	90.0	.502982E+02
473	480.0	.200	120.0	.516751E+02
474	480.0	.200	150.0	.522246E+02
475	480.0	.200	180.0	.509998E+02
476	480.0	.200	210.0	.457093E+02
477	480.0	.200	240.0	.314304E+02
478	480.0	.200	270.0	.528999E+01
479	480.0	.200	300.0	.149937E+00
480	480.0	.200	330.0	.356595E+01
481	480.0	.200	360.0	.222225E+02
482	480.0	.210	.0	.236789E+02
483	480.0	.210	30.0	.459622E+02
484	480.0	.210	60.0	.524009E+02
485	480.0	.210	90.0	.553315E+02
486	480.0	.210	120.0	.580823E+02
487	480.0	.210	150.0	.605074E+02
488	480.0	.210	180.0	.619302E+02
489	480.0	.210	210.0	.602395E+02
490	480.0	.210	240.0	.492822E+02
491	480.0	.210	270.0	.143154E+02
492	480.0	.210	300.0	.157559E+00
493	480.0	.210	330.0	.355553E+01
494	480.0	.210	360.0	.236789E+02
495	480.0	.220	.0	.248377E+02
496	480.0	.220	30.0	.487591E+02
497	480.0	.220	60.0	.558917E+02
498	480.0	.220	90.0	.597371E+02
499	480.0	.220	120.0	.637965E+02
500	480.0	.220	150.0	.682323E+02
501	480.0	.220	180.0	.726494E+02
502	480.0	.220	210.0	.756656E+02
503	480.0	.220	240.0	.718653E+02
504	480.0	.220	270.0	.349205E+02
505	480.0	.220	300.0	.163013E+00
506	480.0	.220	330.0	.353798E+01
507	480.0	.220	360.0	.248376E+02
508	480.0	.230	.0	.256099E+02
509	480.0	.230	30.0	.510178E+02
510	480.0	.230	60.0	.586568E+02
511	480.0	.230	90.0	.632031E+02
512	480.0	.230	120.0	.685270E+02
513	480.0	.230	150.0	.748936E+02
514	480.0	.230	180.0	.821784E+02
515	480.0	.230	210.0	.903935E+02
516	480.0	.230	240.0	.972968E+02
517	480.0	.230	270.0	.745088E+02
518	480.0	.230	300.0	.748074E+00
519	480.0	.230	330.0	.336639E+01
520	480.0	.230	360.0	.256099E+02
521	480.0	.250	.0	.277888E+02
522	480.0	.250	30.0	.542747E+02
523	480.0	.250	60.0	.599460E+02
524	480.0	.250	90.0	.666658E+02
525	480.0	.250	120.0	.751572E+02
526	480.0	.250	150.0	.822764E+02
527	480.0	.250	180.0	.931268E+02
528	480.0	.250	210.0	.113061E+03
529	480.0	.250	240.0	.141529E+03
530	480.0	.250	270.0	.191273E+03
531	480.0	.250	300.0	.000000E+00
532	480.0	.250	330.0	.000000E+00
533	480.0	.250	360.0	.277887E+02
534	480.0	.250	.0	.277888E+02

535	480.0	.250	30.0	.542747E+02
536	480.0	.250	60.0	.599460E+02
537	480.0	.250	90.0	.666658E+02
538	480.0	.250	120.0	.751572E+02
539	480.0	.250	150.0	.822764E+02
540	480.0	.250	180.0	.931268E+02
541	480.0	.250	210.0	.113061E+03
542	480.0	.250	240.0	.141529E+03
543	480.0	.250	270.0	.191273E+03
544	480.0	.250	300.0	.000000E+00
545	480.0	.250	330.0	.000000E+00
546	480.0	.250	360.0	.277887E+02
547	480.0	.260	.0	.345632E+02
548	480.0	.260	30.0	.510103E+02
549	480.0	.260	60.0	.566641E+02
550	480.0	.260	90.0	.705864E+02
551	480.0	.260	120.0	.762109E+02
552	480.0	.260	150.0	.782650E+02
553	480.0	.260	180.0	.962763E+02
554	480.0	.260	210.0	.122162E+03
555	480.0	.260	240.0	.142326E+03
556	480.0	.260	270.0	.217551E+03
557	480.0	.260	300.0	.000000E+00
558	480.0	.260	330.0	.993377E+00
559	480.0	.260	360.0	.345630E+02
560	480.0	.264	.0	.384427E+02
561	480.0	.264	30.0	.453320E+02
562	480.0	.264	60.0	.560756E+02
563	480.0	.264	90.0	.745650E+02
564	480.0	.264	120.0	.737913E+02
565	480.0	.264	150.0	.743684E+02
566	480.0	.264	180.0	.100447E+03
567	480.0	.264	210.0	.124036E+03
568	480.0	.264	240.0	.131736E+03
569	480.0	.264	270.0	.225991E+03
570	480.0	.264	300.0	.000000E+00
571	480.0	.264	330.0	.936833E+01
572	480.0	.264	360.0	.384423E+02
573	480.0	.266	.0	.372938E+02
574	480.0	.266	30.0	.469884E+02
575	480.0	.266	60.0	.557024E+02
576	480.0	.266	90.0	.729230E+02
577	480.0	.266	120.0	.743094E+02
578	480.0	.266	150.0	.750194E+02
579	480.0	.266	180.0	.984548E+02
580	480.0	.266	210.0	.123141E+03
581	480.0	.266	240.0	.134525E+03
582	480.0	.266	270.0	.221689E+03
583	480.0	.266	300.0	.000000E+00
584	480.0	.266	330.0	.620540E+01
585	480.0	.266	360.0	.372935E+02
586	480.0	.270	.0	.329482E+02
587	480.0	.270	30.0	.509521E+02
588	480.0	.270	60.0	.557965E+02
589	480.0	.270	90.0	.684662E+02
590	480.0	.270	120.0	.747918E+02
591	480.0	.270	150.0	.773696E+02
592	480.0	.270	180.0	.937196E+02
593	480.0	.270	210.0	.118917E+03
594	480.0	.270	240.0	.140716E+03
595	480.0	.270	270.0	.211633E+03
596	480.0	.270	300.0	.000000E+00
597	480.0	.270	330.0	.000000E+00
598	480.0	.270	360.0	.329480E+02
599	480.0	.280	.0	.258253E+02
600	480.0	.280	30.0	.516839E+02
601	480.0	.280	60.0	.566577E+02
602	480.0	.280	90.0	.626516E+02
603	480.0	.280	120.0	.705236E+02
604	480.0	.280	150.0	.775672E+02
605	480.0	.280	180.0	.875078E+02
606	480.0	.280	210.0	.105684E+03
607	480.0	.280	240.0	.132278E+03
608	480.0	.280	270.0	.176188E+03
609	480.0	.280	300.0	.000000E+00
610	480.0	.280	330.0	.000000E+00
611	480.0	.280	360.0	.258253E+02

REZPR10

612	480.0	.300	.0	.222370E+02
613	480.0	.300	30.0	.454323E+02
614	480.0	.300	60.0	.509854E+02
615	480.0	.300	90.0	.548250E+02
616	480.0	.300	120.0	.593558E+02
617	480.0	.300	150.0	.648323E+02
618	480.0	.300	180.0	.710260E+02
619	480.0	.300	210.0	.777588E+02
620	480.0	.300	240.0	.827994E+02
621	480.0	.300	270.0	.608154E+02
622	480.0	.300	300.0	.434533E+00
623	480.0	.300	330.0	.196172E+01
624	480.0	.300	360.0	.222370E+02
625	600.0	.200	.0	.202405E+02
626	600.0	.200	30.0	.375127E+02
627	600.0	.200	60.0	.436383E+02
628	600.0	.200	90.0	.459136E+02
629	600.0	.200	120.0	.478224E+02
630	600.0	.200	150.0	.496146E+02
631	600.0	.200	180.0	.511900E+02
632	600.0	.200	210.0	.521416E+02
633	600.0	.200	240.0	.518074E+02
634	600.0	.200	270.0	.485858E+02
635	600.0	.200	300.0	.391159E+02
636	600.0	.200	330.0	.204644E+02
637	600.0	.200	360.0	.202405E+02
638	600.0	.210	.0	.211737E+02
639	600.0	.210	30.0	.395992E+02
640	600.0	.210	60.0	.461679E+02
641	600.0	.210	90.0	.489139E+02
642	600.0	.210	120.0	.514928E+02
643	600.0	.210	150.0	.542118E+02
644	600.0	.210	180.0	.569728E+02
645	600.0	.210	210.0	.595889E+02
646	600.0	.210	240.0	.615593E+02
647	600.0	.210	270.0	.615636E+02
648	600.0	.210	300.0	.559356E+02
649	600.0	.210	330.0	.362840E+02
650	600.0	.210	360.0	.211737E+02
651	600.0	.220	.0	.221250E+02
652	600.0	.220	30.0	.414058E+02
653	600.0	.220	60.0	.482356E+02
654	600.0	.220	90.0	.513825E+02
655	600.0	.220	120.0	.545952E+02
656	600.0	.220	150.0	.581842E+02
657	600.0	.220	180.0	.621051E+02
658	600.0	.220	210.0	.663745E+02
659	600.0	.220	240.0	.708826E+02
660	600.0	.220	270.0	.748219E+02
661	600.0	.220	300.0	.753195E+02
662	600.0	.220	330.0	.617711E+02
663	600.0	.220	360.0	.221250E+02
664	600.0	.230	.0	.250548E+02
665	600.0	.230	30.0	.429694E+02
666	600.0	.230	60.0	.497152E+02
667	600.0	.230	90.0	.531423E+02
668	600.0	.230	120.0	.570407E+02
669	600.0	.230	150.0	.613682E+02
670	600.0	.230	180.0	.662136E+02
671	600.0	.230	210.0	.720691E+02
672	600.0	.230	240.0	.791284E+02
673	600.0	.230	270.0	.870966E+02
674	600.0	.230	300.0	.952451E+02
675	600.0	.230	330.0	.970703E+02
676	600.0	.230	360.0	.250548E+02
677	600.0	.250	.0	.116367E+03
678	600.0	.250	30.0	.433250E+02
679	600.0	.250	60.0	.484694E+02
680	600.0	.250	90.0	.558005E+02
681	600.0	.250	120.0	.603570E+02
682	600.0	.250	150.0	.633768E+02
683	600.0	.250	180.0	.704886E+02
684	600.0	.250	210.0	.801436E+02
685	600.0	.250	240.0	.889151E+02
686	600.0	.250	270.0	.102106E+03
687	600.0	.250	300.0	.128094E+03
688	600.0	.250	330.0	.175323E+03

689	600.0	.250	360.0	.116367E+03
690	600.0	.250	.0	.116367E+03
691	600.0	.250	30.0	.433250E+02
692	600.0	.250	60.0	.484694E+02
693	600.0	.250	90.0	.558005E+02
694	600.0	.250	120.0	.603570E+02
695	600.0	.250	150.0	.633768E+02
696	600.0	.250	180.0	.704886E+02
697	600.0	.250	210.0	.801436E+02
698	600.0	.250	240.0	.889151E+02
699	600.0	.250	270.0	.102106E+03
700	600.0	.250	300.0	.128094E+03
701	600.0	.250	330.0	.175323E+03
702	600.0	.250	360.0	.116367E+03
703	600.0	.260	.0	.374888E+03
704	600.0	.260	30.0	.266681E+02
705	600.0	.260	60.0	.482459E+02
706	600.0	.260	90.0	.614257E+02
707	600.0	.260	120.0	.576096E+02
708	600.0	.260	150.0	.600353E+02
709	600.0	.260	180.0	.743055E+02
710	600.0	.260	210.0	.818242E+02
711	600.0	.260	240.0	.849613E+02
712	600.0	.260	270.0	.105872E+03
713	600.0	.260	300.0	.141365E+03
714	600.0	.260	330.0	.183050E+03
715	600.0	.260	360.0	.374890E+03
716	600.0	.264	.0	.575967E+03
717	600.0	.264	30.0	.104312E+02
718	600.0	.264	60.0	.533968E+02
719	600.0	.264	90.0	.648828E+02
720	600.0	.264	120.0	.525277E+02
721	600.0	.264	150.0	.590592E+02
722	600.0	.264	180.0	.782813E+02
723	600.0	.264	210.0	.796932E+02
724	600.0	.264	240.0	.805345E+02
725	600.0	.264	270.0	.110413E+03
726	600.0	.264	300.0	.144631E+03
727	600.0	.264	330.0	.167603E+03
728	600.0	.264	360.0	.575969E+03
729	600.0	.266	.0	.514389E+03
730	600.0	.266	30.0	.152445E+02
731	600.0	.266	60.0	.511370E+02
732	600.0	.266	90.0	.636474E+02
733	600.0	.266	120.0	.539030E+02
734	600.0	.266	150.0	.587981E+02
735	600.0	.266	180.0	.766039E+02
736	600.0	.266	210.0	.801097E+02
737	600.0	.266	240.0	.813325E+02
738	600.0	.266	270.0	.108227E+03
739	600.0	.266	300.0	.143305E+03
740	600.0	.266	330.0	.171991E+03
741	600.0	.266	360.0	.514391E+03
742	600.0	.270	.0	.329834E+03
743	600.0	.270	30.0	.291015E+02
744	600.0	.270	60.0	.467712E+02
745	600.0	.270	90.0	.593835E+02
746	600.0	.270	120.0	.571118E+02
747	600.0	.270	150.0	.591291E+02
748	600.0	.270	180.0	.720380E+02
749	600.0	.270	210.0	.802339E+02
750	600.0	.270	240.0	.839953E+02
751	600.0	.270	270.0	.103066E+03
752	600.0	.270	300.0	.137338E+03
753	600.0	.270	330.0	.180728E+03
754	600.0	.270	360.0	.329836E+03
755	600.0	.280	.0	.958430E+02
756	600.0	.280	30.0	.419000E+02
757	600.0	.280	60.0	.458767E+02
758	600.0	.280	90.0	.522608E+02
759	600.0	.280	120.0	.568270E+02
760	600.0	.280	150.0	.598277E+02
761	600.0	.280	180.0	.662763E+02
762	600.0	.280	210.0	.752195E+02
763	600.0	.280	240.0	.837638E+02
764	600.0	.280	270.0	.958885E+02
765	600.0	.280	300.0	.119393E+03

REZPR10				
766	600.0	.280	330.0	.162255E+03
767	600.0	.280	360.0	.958438E+02
768	600.0	.300	.0	.204535E+02
769	600.0	.300	30.0	.384237E+02
770	600.0	.300	60.0	.433767E+02
771	600.0	.300	90.0	.461349E+02
772	600.0	.300	120.0	.494837E+02
773	600.0	.300	150.0	.532867E+02
774	600.0	.300	180.0	.574590E+02
775	600.0	.300	210.0	.624335E+02
776	600.0	.300	240.0	.684064E+02
777	600.0	.300	270.0	.750898E+02
778	600.0	.300	300.0	.814179E+02
779	600.0	.300	330.0	.803924E+02
780	600.0	.300	360.0	.204535E+02

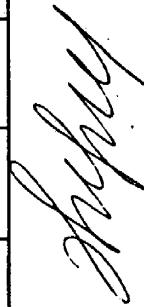
ДОДАТОК Б

ПРОТОКОЛ № 1

випробування на розтяг циліндричних взірців на машині АИМА-ТС-1

Марка сталі	Температура випробування	Маркування	Початковий діаметр d_0 , мм	Діаметр після розриву d_r , мм	Початкова розрахункова довжина l_0 , мм	Кінцева розрахункова довжина l_k , мм	Максимальне зусилля R_{max} , Н	Зусилля при межі пластичності $R_{0,2}$, Н	Тимчасовий опір σ_s , Н/мм ² (МПа)	Межа пластичності $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² (МПа)	Модуль пружності E , Н/мм ² (МПа)	Відносне видовження δ , %	Відносне зсування ψ , %	Примітка
14Г2АФ	20	1	10	7,6	100	135	46080	37366	587	476	210	35	73	
14Г2АФ	100	2	10	7,6	100	129	46001	33598	586	428	195	29	73	
14Г2АФ	200	3	10	7,7	100	127	42783	30223	545	385	198	27	69	
14Г2АФ	300	4	10	7,8	100	127	45216	26847	576	342	191	27	64	
14Г2АФ	400	5	10	7,5	100	130	42547	24571	542	313	184	30	76	
14Г2АФ	500	6	10	7,4	100	129	31165	20646	397	263	175	29	82	
14Г2АФ	600	7	10	7,3	100	136	20410	14444	260	184	164	36	89	
14Г2АФ	700	8	10	7,3	100	142	9106	7693	116	98	142	42	88	
14Г2АФ	800	9	10	7,5	100	141	7379	5417	94	69	119	41	80	
14Г2АФ	900	10	10	7,1	100	158	6908	3768	88	48	98	58	96	
17ГС	20	11	10	7,6	100	132	38308	25277	488	322	209	32	71	
17ГС	100	12	10	7,6	100	128	38230	21823	487	278	194	28	72	
17ГС	200	13	10	7,8	100	129	32656	17741	416	226	196	29	66	
17ГС	300	14	10	7,7	100	126	34697	17192	442	219	188	26	68	
17ГС	400	15	10	7,6	100	130	31871	16485	406	210	179	30	72	
17ГС	500	16	10	7,5	100	134	23472	13424	299	171	168	34	78	
17ГС	600	17	10	7,3	100	141	17898	9185	228	117	153	41	88	
17ГС	700	18	10	7,3	100	142	7615	6830	97	87	126	42	87	
17ГС	800	19	10	7,3	100	144	6123	4475	78	57	95	44	89	
17ГС	900	20	10	7,2	100	150	5417	3376	69	43	63	50	92	

Виконав:



В.Б. Запудляк




ДОДАТОК В

НАЦІОНАЛЬНА АКЦІОНЕРНА КОМПАНІЯ
 “НАФТОГАЗ УКРАЇНИ”
 ВРТП УКРГАЗЕНЕРГОСЕРВІС
 ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ


ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи
 ІФНТУНГ, д.т.н., проф.


 О. Карпаш
 “ 25 ” 2009 р

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор
 ВРТП УКРГАЗЕНЕРГОСЕРВІС


 Р. Флюнт
 “ ” 2009 р

КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА

ТИПОВІ РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ
 СИСТЕМ ГАЗОНАФТОПОСТАЧАННЯ

МЕТОДИКУ РОЗРОБИЛИ

Науковий керівник
докт. техн. наук,
проф. ІФНТУНГ

В.Я. Грудз

канд. техн. наук,
доц. ІФНТУНГ

Л.Т.Гораль

заступник директора з виробництва
УМГ «Прикарпаттрансгаз»
ДК «Укртрансгаз»

М.Д.Степ'юк

асистент кафедри
СРГГ ІФНТУНГ

Р.Т.Мартинюк

асистент кафедри
СРГГ ІФНТУНГ

В.Б.Запукхляк

аспірант кафедри
СРГГ ІФНТУНГ

Я.Р.Порада

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	5
1 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ	7
1.1 АНАЛІЗ ПОЧАТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ	7
1.2 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ З'ЄДНАНЬ ГПА	20
1.3 СПОСОБИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ БАГАТОЦЕХОВИХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ	28
1.4 ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО НАДІЙНОСТІ ГПА ВЕЛИКОЇ ОДИНИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	36
2 ПРОГНОЗУВАННЯ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБОПРОВODІВ ПІД ТИСКОМ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ	41
2.1 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ ТА ЇЇ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ	41
2.2 РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ЗАКРИТТЯ ТРІЩИНИ ДЛЯ ВРАХУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ	49
3 ПРОВЕДЕННЯ БЕЗВОГНЕВОГО ВРІЗАННЯ В ДІЮЧІ ГАЗОПРОВODИ	57
3.1 ПРОВЕДЕННЯ БЕЗВОГНЕВОГО ВРІЗАННЯ В ДІЮЧІ ГАЗОПРОВODИ ПІД ТИСКОМ	57
3.2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА В СТІНЦІ ДІЮЧОГО ГАЗОПРОВODУ ПІД ЧАС ПРИВАРЮВАННЯ ПАТРУБКА З ФЛАНЦЕМ	66
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	73

ДОДАТОК Д

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор ІФНТУНГ
О.М. Карпаш
« 09 » 2010 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заст. директора УМГ Прикарпаттрансгаз
В.В Костів
2010 р.

А К Т

промислового впровадження наукової розробки «Пристрій для безвогневого врізання відводу в діючий трубопровід» (Пат. 81332, Україна) в УМГ Прикарпаттрансгаз

Ми, що підписалися нижче, представники Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, л.т.н., проф. Грудз В.Я. і аспірант Запухляк В.Б. та начальник виробничо-технічного відділу УМГ Прикарпаттрансгаз Пеньківський В.Ю. склали даний акт в наступному:

17.09.2008 р проводилась безвогнева врізка відгалуження діаметром 108 мм від перемички діаметром 529 мм між газопроводами Шебелинка-Дніпропетровськ-Кривий Ріг-Ізмаїл (ШДКРІ) та Роздільна-Ізмаїл (РІ) з використанням наукової розробки «Пристрій для безвогневого врізання відводу в діючий трубопровід» (Пат. 81332, Україна, авт. Грудз В.Я., Запухдяк В.Б., Клов А.К.)

Процес безвогневого врізання відгалуження здійснювався при робочому тиску в газопроводі-перемичці 3 МПа з використанням технологічного обладнання, яке виготовлене в УМГ Прикарпаттрансгаз. Процес розпочато з приварювання патрубка до газопроводу-перемички о 9 год.20 хв. і закінчено демонтажем обладнання о 14 год. 44 хв. Загальна тривалість фрезювання отвору в трубопроводі склала 25 хв. Процес відбувся без порушень технологічного регламенту і правил техніки безпеки.

Від ІФНТУНГ

Грудз В.Я.
Запухляк В.Б.

Від УМГ Прикарпаттрансгаз

Пеньківський В.Ю.

ДОДАТОК Е
ТЕХНОЛОГІЧНЕ КРЕСЛЕННЯ ПРИБРОЮ
ДЛЯ БЕЗВОГНЕВОГО ВРІЗАННЯ

