

622.692.4  
561  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

**БІЛОБРАН**

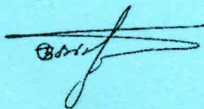
**Богдан Степанович**

УДК 622.692.4

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ  
З УРАХУВАННЯМ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ**

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук



Івано-Франківськ – 2004

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Дата

05.03.04

Реєстр. №

46-27-21

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор

**Шлапак Любомир Степанович,**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м. Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,

професор **Грудз Володимир Ярославович,**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м. Івано-Франківськ;

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор

**Красовський Арнольд Янович,**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,

відділ фізичних основ міцності та руйнування,

головний науковий співробітник, м. Київ;

доктор фізико-математичних наук,

професор **Осадчий**

Національний університет «Львівська політехніка»,

завідувач кафедри

м. Львів.

Провідна установа

науковий і проєктний

Захист від

спеціалізованої

технічній комісії

76019, м. Івано-Франківськ

З дисертації

Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, м. Івано-Франківськ

Автореферат дисертації

Вчений

спеціалізованої

кандидат технічних наук

622.692.4+622.

Б61

Наукові основи оцінки

напружено-деформованого стану

магістральних трубопроводів з

004

ан696

Білобран Б.С.

0.00



талоконструкцій,

«Всеукраїнський

м. Київ.

на засіданні

національному

теці Івано-

за адресою:

та О.В.



ap696

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* Магістральні трубопроводи, як основний засіб транспортування газу, нафти та різних нафтопродуктів на великі відстані, відносяться до особливо відповідальних інженерних споруд. Проблема забезпечення високої експлуатаційної надійності магістральних трубопроводів має важливе значення для народного господарства України, оскільки значна їх частина експлуатується протягом тривалого часу і вже вичерпала свій нормативний ресурс.

Стабільна робота магістрального трубопроводу та його висока економічна ефективність в першу чергу залежить від його технічного стану. При оцінці технічного стану трубопроводу важливе місце займає достовірне визначення напружено-деформованого стану (НДС) його лінійної частини, як одного із основних факторів, від якого залежить рівень експлуатаційної надійності споруди. Особливо гостро ця проблема стосується потенційно небезпечних ділянок, які експлуатуються в складних умовах при значних рівнях напружень, спричинених додатковими до розрахункових навантаженнями. З практики відомі численні випадки перенапружень труб внаслідок осадки опор надземних переходів, переміщень огочуючого ґрунту в зонах зсувів, випинання недостатньо закріплених ділянок газопроводів, що працюють за підвищених температурних перепадів, надмірного згину труби під час укладальних робіт та ін. Достовірна інформація про НДС на таких ділянках є визначальною для прийняття науково обґрунтованих рішень стосовно потреби виконання відновлювальних ремонтних робіт та їх технології.

В окремих випадках ці додаткові навантаження є основною причиною утворення в трубопроводі пластично деформованих зон. До таких випадків також відноситься пластичний згин труб під час спорудження трубопроводу, гідростатичні випробування високими тисками, коли фактичні напруження досягають або навіть перевищують умовну границю текучості матеріалу труб. Практика показує, що за відсутності значних дефектів в стінці, пластично zdeформовані ділянки магістрального трубопроводу продовжують чинити опір навантаженням і виконувати свої експлуатаційні функції.

Визначення НДС ділянки магістрального трубопроводу, що працює в екстремальних умовах, пов'язано з істотними труднощами. Для одержання достовірних результатів, поряд з експериментальними методами, потрібно застосовувати методи механіки стержневих систем, нелінійної теорії оболонок, теорії пластичності, механіки ґрунтів, чисельні методи розв'язування задач.

Науковою основою уточнених розрахунків трубопроводів з урахуванням деформацій поперечного перерізу служать праці з теорії оболонок. Вагомий внесок у розв'язання прикладних задач теорії тонких оболонок зробили такі вчені: М.А. Алфутов, В.А. Баженов, В.З. Власов, О.С. Вольмір, Я.М. Григоренко, В.І. Корольов, В.В. Новожилов, П.М. Огибалов, В.А. Осадчук, С.П. Тимошенко, К. Ф. Черних та багато ін.

Для розвитку досліджень роботи конструкцій за межею пружності та розробки методів їх розрахунку за граничним станом важливе значення мають

праці М.І. Безухова, І.А. Біргера, М.І. Срхова, О.А. Ільюшина, Л.М. Качанова, М.М. Малініна, М.С. Можаровського, Г.С. Писаренка, В.Г. Піскунова, Ю.М. Работнова, К.М. Русинка, Г.Т. Сулима, В.Т. Трошенка, І.А. Цурпала та ін.

Вивченням проблем, пов'язаних з визначенням НДС і розрахунком трубопроводів на міцність та стійкість, займалися такі відомі у цій галузі вчені та спеціалісти: Е.Л. Аксельрад, О.Б. Айнбіндер, М.П. Анучкин, В.Л. Березін, П.П. Бородавкін, С.В. Виноградов, П.А. Вислобіцький, В.П. Ільїн, А.Г. Камерштейн, І.І. Капцов, В.І. Кир'ян, Д.Л. Костовецький, А.Я. Красовський, Є.І. Крижанівський, Л.М. Лобанов, В.І. Махненко, І.В. Орняк, І.П. Петров, Й.В. Перун, К.Е. Ращепкін, О.М. Синюков, І.В. Стасенко, В.В. Харіоновський, О.Б. Шадрін, Л.С. Шлапак, Е.М. Ясін, L. Beskin, L.G. Brazier, D. Bushnell, A. Gresnigt, T. Karman, S. Kyriakides, E. Reissner та ін.

Проте існуючі методи оцінки НДС та несучої здатності магістральних трубопроводів не повністю задовольняють сучасні вимоги інженерної практики. Більшість розв'язаних задач і виконаних досліджень відносяться до роботи трубопроводів в межах пружності. Теоретичні основи та загальна методологія розрахунку основних елементів магістральних трубопроводів з урахуванням пластичних властивостей матеріалу труб потребують подальшого розвитку, особливо стосовно діагностування НДС.

Мало робіт присвячено аналізу і синтезу методів оцінки НДС ділянок магістральних нафтопроводів, що експлуатуються в складних умовах за значних рівнів поздовжніх напружень, в тому числі у разі механізованого капітального ремонту з підкопом під трубу. Отже, теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на розв'язання цих важливих щодо проектування і експлуатації проблем, мають важливе практичне значення і зберігають свою актуальність.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота тематично відповідає національній програмі "Нафта і газ України до 2010 року" та виконана в рамках держбюджетної теми кафедри опору матеріалів НУ "Львівська політехніка" "Розрахунок несучої здатності елементів конструкцій" (№ держ. реєст. 01870095003), Регіональної програми з визначення залишкового ресурсу конструкцій, споруд і машин тривалої експлуатації та розробки заходів щодо продовження терміну їх безаварійної роботи на 2001-2005 р. р. і госпдоговірних тем, керівником яких був автор: з проблем контролю НДС та оцінки міцності потенційно небезпечних ділянок магістральних трубопроводів з метою підвищення надійності експлуатації нафтопроводів "Дружба" (№ № держ. реєст. 75046764, 77033980, 01826022510, 01850047011, 0193U033537, 0196U017615, 0198U002375, 0103U001345); газопроводів ВО "Львівтрансгаз" (№ № держ. реєст. 78076352, 0193U033537); технології ремонту магістральних газопроводів (№ держ. реєст. 0100U003136).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – розробка ефективних методів оцінки технічного стану магістральних трубопроводів на потенційно небезпечних ділянках розрахунково-експериментальними методами з урахуванням пластичних деформацій металу труб.

**Основні задачі дослідження.** 1. Створення теоретичних основ розрахунку магістральних трубопроводів за межею пружності з урахуванням стисливості і зміцнення матеріалу при комбінованому навантаженні внутрішнім (зовнішнім) тиском, поздовжньою силою, згинальним і крутним моментами в рамках безмоментної теорії циліндричних оболонок. Дослідження впливу внутрішнього тиску, поздовжньої сили, згинального і крутного моментів на характеристики жорсткості трубопроводу як стержня та зміну площі його внутрішньої порожнини.

2. Розробка теоретичних основ пружнопластичного згину довгої труби як елемента трубопроводу за одночасної дії внутрішнього (зовнішнього) тиску та поздовжньої сили в рамках півмоментної теорії циліндричних оболонок та створення на цій підставі відповідного програмного забезпечення розрахунку магістральних трубопроводів з урахуванням сплющування поперечного перерізу. Дослідження впливу ефекту сплющування на жорсткість і несучу здатність прямолінійних та криволінійних елементів магістральних трубопроводів.

3. Експериментальні дослідження пружнопластичного деформування труб в лабораторних та натурних умовах з метою обґрунтування прийнятих при теоретичних дослідженнях припущень та перевірки опрацьованих методів розрахунку елементів магістральних трубопроводів за межею пружності.

4. Обґрунтування ефективності нового способу підсилення магістрального трубопроводу за допомогою сталобетонного бандажа на розширювальному бетоні.

5. Розробка розрахунково-експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану надземних трубопроводів, що експлуатуються в екстремальних умовах за наявності значних перенапружень стосовно надземних переходів діючих нафтопроводів у зонах зсувів в Карпатах. Дослідження НДС низки таких ділянок та опрацювання науково обґрунтованих рекомендацій щодо зменшення рівня діючих в трубах поздовжніх напружень.

6. Побудова математичної моделі для визначення НДС і створення методик розрахунку на міцність магістрального нафтопроводу під час капітального ремонту в траншеї без припинення перекачування нафти. Дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу капітального ремонту на рівень ремонтних поздовжніх напружень. Розробка практичних рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів процесу капітального ремонту.

7. Розв'язання задачі про поздовжньо-поперечний згин та втрату стійкості під час випинання відкритої ділянки трубопроводу за границею пружності стосовно виконання ремонтних робіт.

**Об'єкт дослідження** – елементи та надземні і відкриті для ремонту ділянки магістральних нафтогазопроводів.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан, несуча здатність, міцність та стійкість елементів і ділянок магістральних трубопроводів, з урахуванням фактичних умов експлуатації.

**Методи дослідження** – дослідження проведено з застосуванням апробованих практикою методів деформаційної теорії пластичності, теорії циліндричних оболонок, будівельної механіки, опору матеріалів, вимірювання

механічних та геометричних величин у поєднанні з сучасними обчислювальними методами та засобами.

**Наукова новизна одержаних результатів.** 1. Запропоновано новий метод визначення напружень і деформацій в перерізі трубопроводу із зміцнювального матеріалу при дії згинального моменту у поєднанні з внутрішнім (зовнішнім) тиском, поздовжньою силою, крутним моментом, шляхом зведення двовимірної задачі до одновимірної. У порівнянні з відомими метод значно спрощує розрахунки для ділянок трубопроводів зі сталюю товщиною стінки. Одержано розв'язки в замкненому вигляді окремих задач комбінованого навантаження елементів трубопроводів.

2. Вперше розроблено математичну модель та відповідне програмне забезпечення для розрахунку за границею пружності елемента трубопроводу з нерівномірною товщиною стінки в загальному випадку комбінованого навантаження внутрішнім тиском, поздовжньою силою, згинальним і крутним моментами. Досліджено вплив внутрішнього тиску та стержневих внутрішніх силових факторів на характеристики жорсткості труби за границею пружності, а також на зміну площі її внутрішньої порожнини, стосовно випробування трубопроводів високими тисками.

3. Розроблено теоретичні основи та методику дослідження з застосуванням ЕОМ пружнопластичного згину довгої труби як елемента трубопроводу при дії внутрішнього (зовнішнього) тиску та поздовжньої сили в рамках півмоментної теорії оболонки. Вперше з'ясовано характер впливу тиску та явища сплюсчування на несучу здатність прямолінійних ділянок магістральних трубопроводів.

4. Здійснено теоретично-експериментальне обґрунтування ефективності захищеного патентом способу підсилення трубопроводу за допомогою сталобетонного бандажу на спеціальному розширювальному бетоні. Вивчено вплив розширювального ефекту на зменшення кільцевих напружень від робочого тиску.

5. Запропоновано нові підходи до діагностування НДС надземних трубопроводів, які відрізняються від відомих можливістю урахування пластично деформованих зон та визначення опорних навантажень. На їх основі розроблено низку розрахунково-експериментальних методів визначення НДС балкових та висячих трубопровідних переходів.

6. Вперше отримано розрахункові залежності між силою і висотою підйому та початковим значенням поздовжньої стискальної сили при підніманні ділянки трубопроводу з рівної основи та розроблено математичну модель, що враховує вплив пластичних властивостей металу труб на випинання і втрату стійкості відкритих ділянок магістральних трубопроводів.

**Практичне значення одержаних результатів.** 1. Запропонований у роботі метод розв'язання задачі про визначення НДС і характеристик жорсткості елемента трубопроводу при його навантаженні як стержня-оболонки шляхом зведення до одновимірної дозволяє застосовувати відомі методи розрахунку за межею пружності стержневих конструкцій для розрахунку трубопровідних систем.

Створені математичні моделі, алгоритми та програмне забезпечення можуть бути використані для розрахунку за граничним станом напірних трубопроводів різноманітного призначення, а також діагностування їх НДС за допомогою розрахунково-експериментальних методів.

2. Розроблені розрахунково-експериментальні методи визначення НДС надземних трубопроводів застосовано для налагодження періодичного контролю НДС та оцінки міцності надземних переходів магістральних нафтопроводів “Дружба” у зонах зсувів на схилах Карпат та їх висячих переходів. За результатами цього контролю оперативно прийнято низку раціональних технічних рішень, спрямованих на підвищення їх експлуатаційної надійності та своєчасне попередження виникнення аварійних ситуацій і відмов, зменшення вартості профілактичних ремонтних робіт.

3. На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень НДС ділянок трубопроводів під час механізованого капітального ремонту з заміною ізоляційного покриття в траншеї розроблено та впроваджено низку науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору основних технологічних параметрів процесу ремонту і підвищення механічної надійності ремонтваних ділянок.

4. Отримані в дисертації результати можуть бути застосовані також для визначення технологічних параметрів гнuttя труб, капітального ремонту підземних трубопроводів на пружно зігнутих під час спорудження ділянок.

Наукові та практичні результати дисертації відображають узагальнення багаторічних досліджень, виконаних автором згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри опору матеріалів Національного університету “Львівська політехніка”. Значну частину досліджень виконано в рамках госпдоговірних тем, керівником яких був автор у 1975-2003 роках, з метою розв’язання конкретних задач та проблем, які виникали в процесі експлуатації діючих магістральних нафтогазопроводів.

У вигляді практичних рекомендацій та інженерно-технічних розробок результати досліджень впроваджено в Управліннях магістральних нафтопроводів “Дружба” на території України, Білорусії та Росії, в АТ “Львівтрансгаз”. Методика розрахунку на міцність і стійкість відкритої ділянки трубопроводу разом з відповідним програмним забезпеченням використовується в НІИПІнефтегазстроймаш (Брянськ, Росія) при розробці проектів на виконання механізованого капітального ремонту магістральних нафтопроводів. Економічний ефект від впровадження розробок у 1977 – 1989 р. р. становив 1 міль. 146.5 тис. крб. Окремі результати дисертаційної роботи використовувались у навчальному процесі та при виконанні студентських науково-дослідних робіт, дві з яких були відзначені на республіканських і всесоюзному конкурсах.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація узагальнює результати довготривалих теоретичних та експериментальних досліджень автора з проблем експлуатаційної міцності діючих магістральних трубопроводів. Основні результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. У працях [6,9,27], виконаних у співавторстві, автору належить постановка задач досліджень та способів їхнього розв’язування, вибір розрахункових схем, побудова

математичних моделей, аналіз і синтез алгоритмів їх реалізації і програмного забезпечення. В роботах [22,25,32] автору належить постановка задачі та участь у виборі методів її розв'язування і аналізі одержаних результатів. В спільних роботах [13,19,20,21,29-31,34,36,37] співавтори приймали участь у обговоренні постановки задачі, оцінці одержаних результатів та їх апробації в промислових умовах.

Здобувач брав безпосередню участь у плануванні і проведенні всіх експериментальних досліджень і натурних випробувань та аналізі їх результатів, розробці практичних рекомендацій щодо підвищення рівня надійності конкретних ділянок діючих нафтогазопроводів та у їх впровадженні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на I – II Наукових конференціях Африканського центру нафти і текстилю (Бумердес, Алжир, 1969, 1970); Науково-технічній конференції Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування (Кіровоград, 1986); Всесоюзній конференції “Експериментальные методы в механике деформируемого тела” (Калининград, 1987); XV Міжвузівському науково-методичному семінарі “Пути повышения качества подготовки студентов по механике” (Хмельницький, 1990); I – VI Міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003); Науково-практичній конференції “Нафта і газ України” (Львів, 1995); II – V Міжнародних симпозіумах “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій”. (Львів-Дубляни, 1996, Мукачєво, 1998, Тернопіль, 2000, Луцьк, 2002); Другій міжнародній конференції у Львові “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій” (Львів 1999); II Крайовій конференції “Управління ризиком в експлуатації трубопроводів” (Плоцьк, Польща, 1999); VI Міжнародній конференції “Нафта і газ України-2000” (Івано-Франківськ, 2000); 3-ій Науково-технічній конференції “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (Івано-Франківськ, 2002); Науково-технічних конференціях НУ “Львівська політехніка” (Львів, 1974 – 2003).

У повному обсязі дисертація доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри опору матеріалів Національного університету “Львівська політехніка” та на науковому міжкафедральному семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Публікації.** Матеріали дисертації загалом викладено в 64 наукових працях, із них 55 статей, 8 тез доповідей та 1 патент. 30 робіт опубліковано у фахових наукових журналах і збірниках. Значна частина робіт (24 статті і 4 тези доповідей) опублікована одноосібно.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, дев'яти розділів, основних результатів та висновків, списку використаних джерел із 260 найменувань та долатків на 26 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 391 сторінку, в тому числі 103 рисунки і 35 таблиць.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та подано загальну характеристику роботи. Висвітлено наукове і практичне значення отриманих результатів досліджень, наведено дані про їх реалізацію та впровадження на діючих трубопроводах.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану проблеми визначення напружено-деформованого стану трубопроводів, обґрунтовано основні задачі досліджень.

У другому розділі наведено основні співвідношення деформаційної теорії пластичності та методи розв'язування задач, що використовуються в роботі під час досліджень за границею пружності. Викладено новий підхід до розв'язування задач про визначення НДС стану за границею пружності труби з недеформівним контуром поперечного перерізу в загальному випадку комбінованого навантаження внутрішнім (зовнішнім) тиском  $p$  і силовими факторами, характерними для роботи трубопровідних систем: поздовжньою силою -  $N$ , згинальним -  $M$  і крутним  $M_k$  моментами (рис.1) і розроблено графоаналітичну та аналітично-чисельну методику реалізації цього підходу.

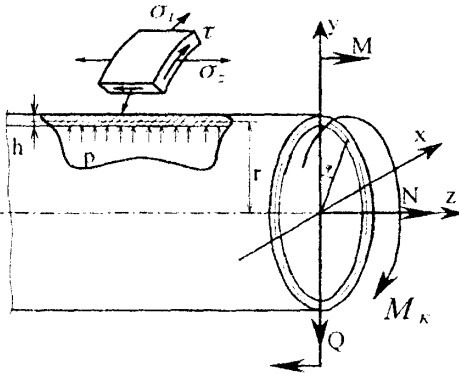


Рис.1. Загальний випадок комбінованого навантаження трубопроводу

Напружений стан труби вважається плоским. Компоненти напружень і деформацій по товщині стінки прийнято сталими і рівними їх значенням посередині товщини стінки. Дотичними напруженнями від поперечної сили знехтувано. Спричинені внутрішнім тиском кільцеві напруження  $\sigma_t$  та крутним моментом дотичні напруження  $\tau$  визначаються з рівнянь рівноваги, а поздовжні деформації  $\epsilon_z$  - на підставі гіпотези плоских перерізів.

Для знаходження закономірностей розподілу поздовжніх напружень, кільцевих та кутових деформацій по кутовій координаті поперечного перерізу труби використано основні співвідношення деформаційної теорії пластичності.

Поздовжні напруження і деформації розкладено на дві частини, одна з яких залежить лише від внутрішнього тиску, а друга пов'язана з роботою труби як стержня. Для розв'язання задачі одержано наступну групу співвідношень:

$$\sigma_t = \frac{pr}{h}; \quad \tau = \frac{M_k}{2\pi r^2 h}; \quad \sigma_z = \frac{1}{2}\sigma_t \pm \sigma_{\kappa}; \quad \sigma_{\kappa} = \sqrt{\sigma_t^2 - \frac{3}{4}\sigma_t^2 - 3\tau^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{zs} + \frac{1-2\mu}{2E} \sigma_r; \quad \varepsilon_{zs} = \frac{\sigma_{zs}}{E^*}; \quad \varepsilon_r = \varepsilon_{rs} - \frac{1}{2} \varepsilon_{zs} + \frac{1-2\mu}{2E} \sigma_r; \quad \varepsilon_{rs} = \frac{3}{4} \frac{\sigma_r}{E^*}; \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_{rs} - \frac{1-2\mu}{E} \tau; \quad \gamma_{rs} = \frac{3\tau}{E^*}; \quad E^* = \sigma_r / \varepsilon_r; \quad \mu^* = \frac{1}{2} - \frac{1-2\mu}{2E} E^*; \quad (3)$$

$$N = 2rh \int_0^{\pi} \sigma_r d\varphi; \quad M = 2r^2 h \int_0^{\pi} \sigma_r \cos \varphi d\varphi; \quad \Delta F_{in} = 2r^2 \int_0^{\pi} \varepsilon_r d\varphi; \quad \theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \gamma d\varphi, \quad (4)$$

де  $p$  - внутрішній тиск;  $r$  - радіус середньої лінії поперечного перерізу;  $h$  - товщина стінки;  $\varepsilon_{zs}$  - поздовжня деформація труби як стержня;  $\varepsilon_{rs}$  і  $\gamma_{rs}$  - складові кільцевої деформації і кута зсуву, змінні в пластичних зонах поперечного перерізу труби;  $E$ ,  $\mu$  - модуль пружності і коефіцієнт Пуассона;  $E^*$  і  $\mu^*$  - змінні модуль пружності і коефіцієнт поперечної деформації;  $\theta$  - відносний кут закручування;  $\Delta F_{in}$  - зміна площі внутрішньої порожнини.

Показано, як для певних значень напружень від внутрішнього тиску  $\sigma_r$  і від кручення  $\tau$  на підставі діаграми деформування матеріалу труби, використовуючи наведені вище співвідношення, будуються графіки залежностей  $\sigma_{zs} = f(\varepsilon_{zs})$ ,  $\varepsilon_{rs} = f(\varepsilon_{zs})$ ,  $\gamma_{rs} = f(\varepsilon_{zs})$  (рис. 2), та знаходяться значення  $N$ ,  $M$ ,  $\Delta F_{in}$  і  $\theta$ .

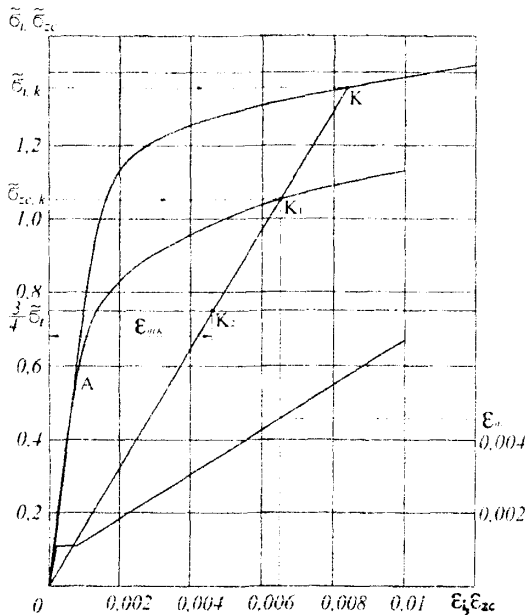


Рис. 2. Знаходження залежностей  $\sigma_{zs} = f(\varepsilon_{zs})$ ,  $\varepsilon_{rs} = f(\varepsilon_{zs})$

В рамках такого підходу розв'язано типові задачі комбінованого навантаження труби: чистий згин труби з днищами під внутрішнім тиском, та сумісний згин з крученням. На прикладі сталевій труби досліджено вплив внутрішнього тиску та кручення на її опірність згинів. З'ясовано, що характер впливу обох цих факторів ідентичний. Із збільшенням напружень від внутрішнього тиску чи від кручення опірність труби на згин зменшується.

Для оцінки впливу поперечної сили  $Q$  на величину згинального моменту  $M$  при поперечному згині труби з ідеально пластичного матеріалу, що перебуває під внутрішнім тиском, одержано рекурентну формулу, що встановлює зв'язок між  $M$  і  $Q$  в граничному стані

$$\left(\frac{M}{M_p}\right)^{2.87} + \left(\frac{Q}{Q_p}\right)^{2.87} = 1,$$

(5)

$$M_{pr} = \pi W \sigma_r r^2 h; \quad Q_{pr} = \frac{\pi W \sigma_r}{\sqrt{3}} r h; \quad \Psi = \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_l}\right)^2},$$

де  $\sigma_l$  - границя текучості матеріалу труби.

Виявлено, що, якщо плече згину  $l > (3 + 4)r$ , з точністю до 5%, впливом дотичних напружень на величину граничного моменту можна знехтувати.

Побудовано математичну модель та розроблено програмне забезпечення розв'язування задач пружнопластичного аналізу в загальному випадку комбінованого навантаження труби з нерівномірною товщиною стінки внутрішнім тиском, згинальним і крутним моментами та поздовжньою силою. При цьому прийнято, що товщина стінки труби змінюється симетрично відносно осі Y, яка співпадає з площиною дії згинального моменту, та відносно її серединної поверхні. В основу математичної моделі покладено безмоментна теорія оболонок, деформаційна теорія пластичності та теорія кручення тонкостінних стержнів замкнутого профілю. Спричинена дією зовнішнього навантаження деформація труби як стержня характеризується відносним кутом закручування  $\theta$  та двома параметрами геометричної осі труби, яка проходить через центри середньої лінії поперечного перерізу: відносною деформацією  $\epsilon_n$  та зміною кривини  $\kappa$ , що зручно при практичних розрахунках. Діаграма деформування матеріалу труби на характерних ділянках задається різними аналітичними залежностями. Параметри схематизованої діаграми визначають з умови, що вона проходить через три точки експериментальної діаграми: точку границі пропорційності  $(\sigma_n, \epsilon_n)$ , точку умовної границі текучості  $(\sigma_{0.2}, \epsilon_{0.2})$  та точку з координатами  $(\sigma_1, \epsilon_1)$ , яка відповідає значенню найбільшої очікуваної деформації. Практика експлуатації магістральних трубопроводів показує, що для ділянок, які працюють в складних умовах, здебільшого можна приймати  $\epsilon_1 = 0.01 - 0.015$ . Інтенсивність деформацій записано у вигляді

$$\epsilon_1 = \frac{1}{1 - \mu^{*2}} \sqrt{(\epsilon_n^2 - \epsilon_n^2)(1 - \mu^{*2} - \mu^{*2}) - \epsilon_n \epsilon_1 (1 - 4\mu^{*2} + \mu^{*2}) + \frac{3}{4}(1 - \mu^{*2})^2 \gamma^2}. \quad (6)$$

Під час визначення функцій розподілу поздовжніх напружень і кільцевої та кутової деформації у поперечному перерізі труби застосовується метод ітерацій. Інтегральні параметри – поздовжня сила і згинальний момент – обчислюються з використанням методу квадратур за виразами

$$N = 2r \int_0^{\pi} \sigma_r h' d\varphi; \quad M = 2r^2 \int_0^{\pi} \sigma_r h' (\cos \varphi - \tilde{\epsilon}) d\varphi, \quad (7)$$

де  $h^*$  - функція товщини стінки;  $\tilde{e}$  - безрозмірне зміщення центральної осі відносно геометричного центра, що співпадає з центром середньої лінії поперечного перерізу труби.

Викладену вище методика, дає можливість знайти закономірність розподілу поздовжніх напружень в поперечному перерізі труби та її характеристики жорсткості при розтягу, згині і крученні за відомими значеннями відносного видовження осі і її кривини та крутного моменту.

Для розв'язання зворотної задачі - визначення параметрів деформації осі труби  $\varepsilon_0, \tilde{\kappa}$ , за відомими значеннями внутрішніх силових факторів  $N$  і  $M$  - потрібно розв'язати систему двох нелінійних інтегральних рівнянь, сформованих на підставі виразів (7).

Розроблена математична модель застосована для вивчення характеру зміни параметрів жорсткості поперечного перерізу труби як стержня та площі внутрішньої порожнини труби під час навантаження за межею пружності. Зміна значень характеристик жорсткості труби при розтягу (стиску), при згині і при крученні залежно від ступеня деформування за межею пропорційності враховується через відповідні коефіцієнти зменшення жорсткості  $\beta_p, \beta_{zt}, \beta_k$  .. Знайшовши, наприклад залежність  $\beta_{zt} = f(M)$  для заданих значень  $N$  і  $\sigma_1$ , за допомогою інтеграла Мора та чисельних методів можна визначити переміщення (прогини і кути повороту) прямолінійної ділянки трубопроводу, що зазнає дії сталих вздовж неї внутрішнього тиску та поздовжньої сили.

Числові дослідження залежності коефіцієнтів  $\beta_p, \beta_{zt}, \beta_k$  від нерозмірного параметра згинального моменту  $\tilde{M} = M / 4\sigma_T r^2 h$  виконано для деяких важливих стосовно магістральних трубопроводів випадків навантаження: для розрахункової схеми труби з днищами, яку застосовують при аналізі напружено-деформованого стану надземних переходів з компенсацією поздовжніх деформацій; для прокладених у стабільних щільних ґрунтах підземних ділянок, що працюють за

$\beta_{zt}, \beta_k, \beta_p$

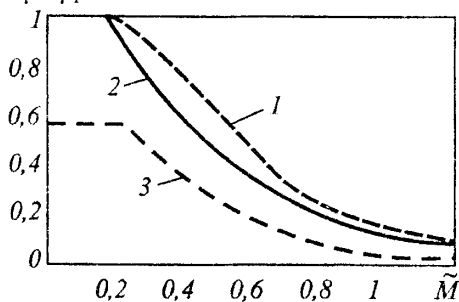


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів жорсткості при згині (1), крученні (2) та стиску (3) від згинального моменту (сталь 17ГС,  $\tilde{\sigma}_T = 0.5$ ;  $\tilde{\sigma}_N = -0.2$ ;  $\tilde{\tau} = 0.25$ )

умов близьких до плоскої деформації ( $\varepsilon_0 = 0$ ); для загального випадку комбінованого навантаження (рис. 3), що характерно для просторових ділянок, що працюють в складних геолого-кліматичних умовах.

Як показує аналіз результатів числових досліджень, криві коефіцієнтів зменшення жорсткості при згині, при крученні та при стиску є дуже близькі за формою між собою. У межах пропорційності всі три коефіцієнти залишаються сталими і не залежать від значення згинального моменту (ступеня деформування).

При цьому коефіцієнти  $\beta_n$  і  $\beta_k$  дорівнюють одиниці, а коефіцієнти поздовжньої деформації при наявності внутрішнього тиску та поздовжньої стискальної сили менший від одиниці, оскільки він враховує як вплив поздовжньої сили, так і внутрішнього тиску. Вплив останнього проявляється через фізичні співвідношення між деформаціями і напруженнями для плоского напруженого стану. За межами пропорційності та при переході матеріалу труби в пластичний стан зі збільшення згинального моменту всі три коефіцієнти жорсткості монотонно зменшуються. При цьому значення кожного із цих коефіцієнтів залежить від усіх навантажувальних факторів, зменшуючись при їх збільшенні.

Порівняння характеру зміни відносного об'єму внутрішньої порожнини труби при збільшенні кільцевого напруження від внутрішнього тиску зроблено для деяких характерних випадків, що являють собою певний інтерес стосовно випробування, а також проектування і експлуатації магістральних трубопроводів. При цьому встановлено, що за рівних значень кільцевого напруження (внутрішнього тиску) найменшою мірою збільнюється об'єм внутрішньої порожнини труби, яка закрита на кінцях днищами, а найбільшою мірою – труби, яка працювала б в умовах лінійного напруженого стану. Для всіх розглянутих випадків розрахунок  $\Delta \tilde{F}_n$  за спрощеною схемою, що враховує лише дію спричинених внутрішнім тиском кільцевих напружень, при переході матеріалу в пластичний стан дає в декілька разів завищені результати.

**Третій розділ** присвячено формулюванню математичної моделі, алгоритму та програмного забезпечення для визначення за границею пружності НДС та несучої здатності при плоскому згині з розтягом (стиском) довгої труби, що знаходиться під дією внутрішнього (зовнішнього) тиску з урахуванням сплющування поперечного перерізу.

Основні розрахункові залежності ґрунтуються на співвідношеннях деформаційної теорії пластичності і нелінійної теорії циліндричних оболонок. При визначенні переміщень точок середньої лінії поперечного перерізу враховано характерне для згину явище сплющування та зміну довжини цієї лінії внаслідок дії тиску. Вирази для складових переміщень задано у вигляді

$$w = c_0 r + r \sum_{n=2}^N c_n \cos n\varphi + r \varepsilon_n; \quad v = r \sum_{n=2}^N d_n \sin n\varphi, \quad (8)$$

де у виразі для радіальної складової  $w$  перші два члени враховують ефект сплющування, а останній враховує зміну розмірів поперечного перерізу внаслідок дії мембранних напружень, зумовлених тиском. Невідомі коефіцієнти  $c_n$  знаходяться за допомогою принципу мінімуму повної енергії системи, записаної для елемента труби одиничної довжини

$$P = 2r \int_0^{\pi/2} \int_{-h/2}^{h/2} u \, d\varphi \, dt - \frac{\pi p r^2}{2} \left[ 4c_0 + \sum (c_n^2 - d_n^2) \right] + A_{mem}, \quad (9)$$

де  $u$  - потенціал деформації;  $d_n$  - постійні коефіцієнти, що визначаються через коефіцієнти  $c_n$  з умови рівності нулю частини кільцевої деформації середньої поверхні, пов'язаної з складовою переміщень, спричинених сплющуванням;  $A_{\text{сумар}} -$  сумарна робота згинального моменту і поздовжньої сили, що прикладені на торцях елемента труби на відповідних їм переміщеннях, та внутрішнього тиску за рахунок збільшення площі, обмеженої середньою лінією, що зумовлене деформаціями розтягу середньої лінії.

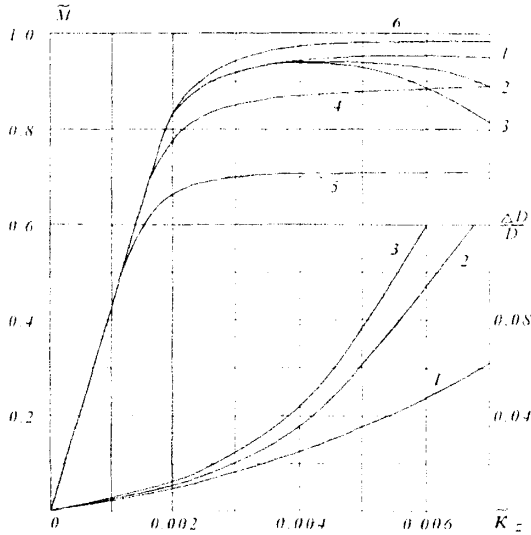


Рис. 4. Залежність параметрів згинального моменту і сплющування від параметрів кривини та тиску: 1,6 -  $\bar{\sigma}_i = 0$ ;  
2 -  $\bar{\sigma}_i = -0.0135$ ; 3 -  $\bar{\sigma}_i = -0.02$ ; 4 -  $\bar{\sigma}_i = 0.5$ ; 5 -  $\bar{\sigma}_i = 0.8$  ( $\sigma_i = 370$  МПа,  $\bar{h} = 0.02$ )

сплющування (крива 1). При згині в пружній області сплющування перерізу неістотне і практично не впливає на величину згинального моменту. Опірність труб згину за границею пружності значною мірою залежить від величини і типу тиску. Зовнішній тиск (криві - 2,3) збільшує сплющування, що зумовлює зменшення граничного моменту, при якому вичерпується несуча здатність труби як балки і відповідної цьому моменту значення поздовжньої кривини  $\bar{\kappa}_{cr}$ . Внутрішній тиск, навпаки, зменшуючи сплющування, сприяє збільшенню кривини, за якої настає вичерпання несучої здатності. Проте внутрішній тиск зменшує граничний момент, який може витримати трубопровід як балкова конструкція за рахунок спричинених ним кільцевих напружень.

Побудовану математичну модель застосовано для дослідження НДС та несучої здатності труб стосовно прямолінійних ділянок магістральних трубопроводів, що зазнають надмірного згину (рис. 4). Верхні криві зображують залежність згинального моменту  $\bar{M} = M / 4\sigma_i r^2 h$ , а нижні - залежності відносного зменшення діаметра в площині згину від безрозмірної кривини поздовжньої осі  $\bar{\kappa}_z = r/\rho$  та безрозмірного кільцевого напруження  $\bar{\sigma}_i$  (віднесеного до границі текучості). Dodatні значення  $\bar{\sigma}_i$  спричинені дією внутрішнього тиску, а від'ємні - дією зовнішнього тиску. Для порівняння на цьому рисунку також показано діаграму згину за відсутності тиску, побудовану без врахування

За результатами числових досліджень виявлено, що для труб, які застосовують у магістральних трубопроводах, за відсутності тиску та нехтування зміцнення матеріалу, величину граничного моменту можна знаходити за формулою

$$M_{cr} = 4(1 - 0.0016/\tilde{h})\sigma_1 r^2 h. \quad (10)$$

Викладену вище методику розрахунку за границею пружності прямих труб з урахуванням деформації контуру поперечного перерізу узагальнено на криві труби, ввівши відповідні доповнення у вирази для деформацій і напружень. Це дало змогу врахувати співрозмірність радіуса середньої лінії поперечного перерізу  $r$  з радіусом кривини поздовжньої осі  $R$  та характерне для стержнів великої кривини явище зміщення нейтрального шару.

Виконані числові дослідження показали, що при згині кривої труби в межах пружності вплив зазначеного уточнення залежить переважно від внутрішнього тиску. За відсутності внутрішнього тиску, незалежно від параметра товщини стінки ( $\tilde{h} = h/r$ ), результати розрахунків коефіцієнта жорсткості Кармана і найбільших поздовжніх напружень за уточненою методикою та відомими формулами відрізняються між собою неістотно. Найбільші мембранні напруження, спричинені взаємним натискуванням поздовжніх волокон, що виникають на нейтральному шарі поздовжніх напружень згину і якими знехтувано в задачі Кармана, при  $\tilde{\kappa}_0'' = 0.5$  становлять приблизно 20% від найбільших поздовжніх напружень.

Що стосується найбільшого значення інтенсивності напружень, які виникають на нейтральній осі, то спрощення Кармана призводять до їх заниження при  $\tilde{\kappa}_0'' = 0.5$  приблизно на 12%. З допустимим для практичних розрахунків ступенем точності під час розрахунків кривих довгих труб, які використовують в магістральних трубопроводах ( $\tilde{\kappa}_0'' \leq 0.5$ ), у випадку відсутності внутрішнього тиску можна застосовувати методики, які ґрунтуються на спрощеннях Кармана, а криву трубу характеризувати єдиним параметром  $\lambda = Rh/r^2$ . Для значень параметрів кривини і внутрішнього тиску  $\tilde{\kappa}_0'' > 0.2$  і  $\tilde{p}_0 = \frac{pr}{h\sigma_1} > 0.3$  кривина істотно впливає на характер розподілу і величину поздовжніх напружень, а, отже, і жорсткість при згині. Тому розрахунки за методиками, які ґрунтуються на спрощеннях Кармана, можуть призвести до значних похибок. Відповідно НДС труби великої кривини навіть за малих деформацій залежатиме від трьох окремих параметрів: кривини -  $\tilde{\kappa}_0''$ , товщини стінки -  $\tilde{h}$  і внутрішнього тиску -  $\tilde{p}_0$ .

**У четвертому розділі** наведено основні результати експериментальних досліджень пружнопластичного деформування труб в лабораторних та натурних умовах з метою перевірки запропонованих математичних моделей.

Лабораторні дослідження здійснено для трьох типів навантаження трубних зразків діаметром 51-76 мм під тиском: на чистий згин, на позацентровий стиск, на сумісну дію поздовжньої стискальної сили і згинального моменту. Під час цих випробувань внутрішній тиск підтримувався сталим. Деформації крайніх (у

площині згину) волокон вимірювались важливо-індикаторними тензометрами базою 25 мм. Довжина зразків  $l \geq 40$  см вибиралась з урахуванням того, щоб крайовий ефект від дна не розповсюджувався на середню частину зразка труби, в якій досліджувався НДС. Стрілка прогину зразків вимірювалась індикаторними прогиномірами. Зміну овальності контуру поперечного перерізу труби під час згину знаходили за результатами вимірювань радіальних переміщень чотирьох діаметрально протилежних точок зовнішньої поверхні за допомогою спеціального індикаторного пристрою, встановленого поряд з тензометрами.

Дослідження пружнопластичного деформуванням труб діаметром 51-57 мм при чистому згині проводились з розвитком пластичних деформацій до 5%. Результати цих досліджень використано для перевірки теорії пружнопластичного згину труб з урахуванням ефекту сплющування (розділ 3). Виявлено, що коефіцієнт поперечної деформації під час чистого згину труб близький за величиною до коефіцієнта поперечної деформації для лінійного напруженого стану. Це підтверджує прийняте у математичній моделі пружнопластичного згину труби з урахуванням сплющування поперечного перерізу (розділ 3) допущення, що у разі відсутності внутрішнього тиску кільцевої деформація серединної поверхні труби  $\epsilon_{\theta 0}$  дорівнює  $-\mu \epsilon_{z 0}$  ( $\epsilon_{z 0}$  - поздовжня деформація серединної поверхні). Також з'ясовано, що під час згину труби спричинюване явищем сплющування зменшення її діаметра, розташованого в площині згину ( $D_{\min}$ ), дещо випереджує збільшення діаметра, перпендикулярного до цієї площини ( $D_{\max}$ ).

Порівняння розрахункових даних з експериментальними виконано для згинального моменту, зміни максимального і мінімального діаметрів середньої лінії поперечного перерізу та його овальності, зменшення кривини поздовжньої осі при розвантаженні. Порівняльний аналіз показує, що теорія розділу 3 добре узгоджується з експериментом на всьому проміжку кривини від 0 аж до  $\bar{\kappa}_{\text{пр}}$  - кривини, за якої настає втрата несучої здатності (різниця не перевищує 5-8 %).

Два інші типи випробувань виконано для труб діаметром 76мм в області невеликих пластичних деформацій (<2%) для перевірки можливості застосування розроблених в другому розділі методик для розрахунку труб з поздовжнім зварним швом у стані поставки стосовно прямолінійних ділянок трубопроводів, що працюють в умовах поздовжньо-поперечного згину.

Під час обробки результатів цих випробувань порівнювались теоретичні та експериментальні дані для значень згинального моменту і відносної деформації осі за фіксованих значень кривини та поздовжньої сили. Аналіз одержаних результатів також засвідчує про достатньо високу точність розробленої методики (розділ 2) розрахунку елементів трубопроводів під тиском, що працюють в умовах поздовжньо-поперечного згину, зазначаючи дії значних рівнів осьових стискальних напружень. До найбільшої поздовжньої деформації 2% відхилення між обчисленими і фактичними значеннями згинальних моментів не перевищує 11 %.

Експериментальні дослідження НДС та резервів несучої здатності відтинків трубопроводів діаметром 1020 мм і 1220 мм у разі сумісної дії внутрішнього тиску та поперечного навантаження виконано на спеціальних стендах (рис. 5).



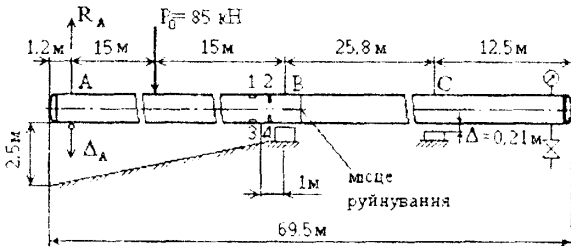


Рис. 5. Схема випробувального стенда,  $D = 1220 \text{ мм}$   
( $p = 4 \dots 6 \text{ МПа}$ )

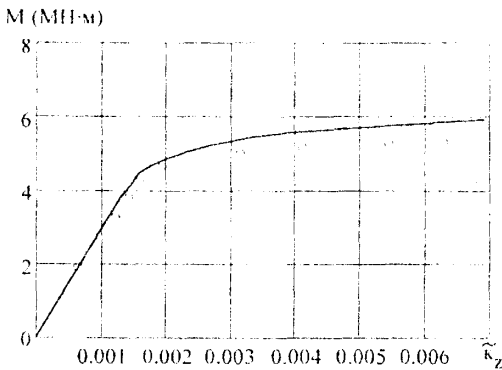


Рис. 6. Зіставлення теоретичних (ліній) і експериментальних (точки) даних

**П'ятий розділ** стосується розробки нового методу підсилення трубопроводу бандажем типу "труба на трубу" із заповненням міжтрубного простору розширювальним бетоном, що складається з меленого негашеного вапна, золи виносу теплових станцій, портландцементу та полімерних добавок.

Теоретичні дослідження виконано з застосуванням для основної і бандажної труб безмоментної теорії оболонок та трьох моделей наповнювача: 1) наповнювач вважається ізотропним матеріалом і здатний чинити опір дії як стискальних, так і розтягальних напружень; 2) наповнювач може сприймати лише напруження стиску; 3) наповнювач не сприймає кільцевих напружень. Експериментальні дослідження проведено в широкому діапазоні внутрішніх тисків та при різних співвідношеннях складників бетонного наповнювача на трубах діаметром 76 мм, 102 мм і 529 мм з накладеними бандажами відповідно з труб 132 мм, 156 мм і 630 мм.

Виконані дослідження підтвердили можливість істотно зменшувати в трубопроводі спричинювані внутрішнім тиском кільцеві напруження внаслідок

При цьому враховано особливості роботи відкритої ділянки нафтопроводу під час виконання ремонтних робіт механізованим способом у траншеї без припинення перекачування нафти.

На рис. 6 подано зіставлення теоретичної та експериментальної діаграм згину для контрольованого перерізу перед проміжною опорою. Різниця не перевищує 12%. Отже, за результатами виконаних експериментальних досліджень можна зробити висновок, що при розрахунках за границею пружності магістральних трубопроводів у докритичній стадії (перед місцевою втратою стійкості стінки в стиснутій зоні поперечного перерізу) можна використовувати методи, що не враховує явище сплющування.



ділянки трубопроводу на підставі результатів вимірювання геометричних і механічних параметрів при натурних обстеженнях та випробуваннях.

Напруження у стінці трубопроводу визначаються за допомогою чисельних методів шляхом розв'язання змішаної задачі будівельної механіки, коли відоме частково діюче на розглядувану ділянку навантаження та переміщення окремих точок її поздовжньої осі.

В основу математичної моделі покладено розрахункову схему, згідно з якою надземний трубопровід вважається багатопроговою балкою-оболонкою з недеформованим контуром поперечного перерізу, що знаходиться під дією внутрішнього тиску, поперечних зосереджених сил і розподіленого навантаження та поздовжньої сили. Взаємодію труби з ґрунтом на прилеглих до надземного переходу ділянках представлено за допомогою моделі ідеального пружнопластичного тіла. Для розкриття статичної невизначеності системи використано метод сил. При визначенні переміщень надземну ділянку розбито на скінченні прямолінійні елементи. Геометрія поздовжньої осі задається дискретно координатами вузлових точок.

Для розрахунку з використанням ЕОМ надземних балкових переходів магістральних трубопроводів стосовно діагностування напруженого стану в процесі експлуатації розроблено програму "НДСБП". Основою для задання вихідних даних служать результати вимірювань відповідних параметрів надземного переходу при натурних обстеженнях

Досліджено вплив піддатливості ґрунту, температурного перепаду та робочого тиску на напружено-деформований стан однопрогового балкового переходу. Виявлено, що розташування небезпечного перерізу, в якому виникає найбільший згинальний момент, здебільшого залежить від піддатливості ґрунту. Для щільних ґрунтів з підвищеними коефіцієнтами постелі небезпечний переріз знаходиться скраю підземної ділянки і тим ближче до її початку, чим щільніший ґрунт. Для надземних трубопроводів, що обпираються на піддатливі ґрунтові основи, найбільш небезпечним є переріз посередині прогону.

Для спостереження за характером зміни напруженого стану досліджуваних ділянок періодично вимірюються поздовжні деформації, температура стінки та просторове розташування характерних точок поздовжньої осі, а також стріли прогину окремих перерізів та реакції опор. Поздовжні деформації вимірюються за допомогою тензорезисторів та компаратора. Величина робочого тиску на контрольованій ділянці знаходиться розрахунковим шляхом за результатами вимірювання тиску на сусідніх насосних станціях. Горизонтальні та вертикальні відхилення окремих точок поздовжньої осі трубопроводу вимірюються геодезичними приладами, а також способом натягування струни. Реакції опор вимірюються за допомогою гідравлічного домкрата, дообладнаного динамометричним пристроєм.

В основу розроблених у другому розділі теоретичних положень сформульовано метод оцінки НДС прогонів ділянок надземних балкових переходів при урахуванні пластичних деформацій за фактичним висотним

положенням вузлових точок та стрілами прогину окремих початково прямих відтинків.

В останньому підрозділі розглянуто розрахунково-експериментальний метод визначення напружень в основних несучих елементах висячого протяжного трубопровідного переходу, розрахункову схему якого являє собою статично невизначувану балку на двох опорах (пілонах), що знаходиться під дією рівномірно розподіленого експлуатаційного навантаження, зусиль у підвісках та опорних моментів, що виражають дію прилеглих до нього з обох боків ділянок.

Зусилля у підвісках визначаються за результатами вимірювання висотного розташування вузлів їх кріплення до канату. Для визначення горизонтальної складової натягу канату та розкриття статичної невизначності системи використано рівняння переміщень (прогинів) для тих точок осі балки, де їх значення встановлено під час натурних обстежень.

Запропонований метод використано для діагностування технічного стану трьох однотипних висячих переходів нафтопроводу "Дружба-1" з двома трубами діаметром 529 мм і числом підвісок  $n = 11.0$ . На переході через р. Дністер зусилля у підвісках також вимірювали за допомогою спеціального динамометричного пристрою. Порівняння показало, що значення зусиль, одержані за висотним розташуванням вузлів кріплення, добре корелюють з експериментальними даними. Різниця не перевищувала 10 %. За результатами теоретичних і експериментальних дослідженнях з'ясовано, що на всіх трьох переходах підвіски завантажені достатньо нерівномірно. Коефіцієнт завантаження підвісок змінювався від 0,7 до 1,4. При цьому найбільш навантаженими виявилися крайні підвіски. Внаслідок цього частина прогонового навантаження, яка повинна сприйматися безпосередньо опорами пілонів, передається на несучі канати, а труба в місцях кріплення цих підвісок зазнає зайвого згину.

У сьомому розділі наведено результати довготривалих досліджень умов роботи та НДС низки потенційно небезпечних переходів нафтопроводів "Дружба", укладених на схилах Карпат. На підставі аналізу та узагальнення цих результатів

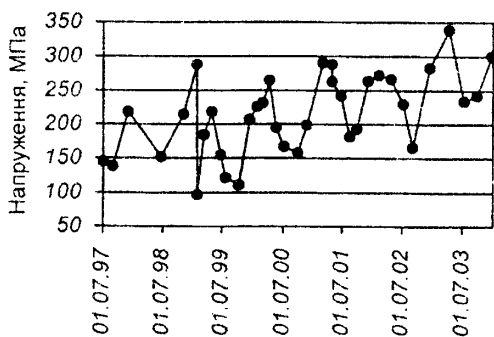


Рис. 8. Графік зміни з часом максимальних поздовжніх розтягальних напружень у надземному трубопроводі діаметром 720 мм в зоні зсуву

виявлено основні чинники, які впливають на зміну НДС надземних переходів у часі. Надземні переходи, що розташовані у верхній частині схилу над зоною зсувів, зазнають дії поздовжньої розтягальної сили. Оскільки на цьому відтинку траси нафта тече здебільшого самопливом, не заповнюючи всю порожнину, то це призводить до значного зниження температури

стілки у разі зупинки перекачки під час морозу. Тому в зимовий період (рис. 8) надземні переходи працюють в значно складніших умовах, зазнаючи розтягу як від впливу поздовжнього зсуву, так і внаслідок зменшення температури стінки труб.

У надземних безкомпенсаторних переходах, які знаходяться у нижній частині схилу зсув ґрунту, навпаки, викликає поздовжню стискальну силу і вони зазнають перевантажень відповідно під час зупинок роботи нафтопроводів у спекотні дні. Такі зупинки спричинили утворення гофр на однопрогонових переходах та втрату поздовжньої стійкості у горизонтальній площині чотирипрогонового переходу.

Вимірювання поздовжніх напружень, знятих під час розвантаження надземного трубопроводу одного з цих переходів внаслідок його розрізання, підтвердили передбачені розрахунковим шляхом за допомогою запропонованої нами розрахунково-експериментальної методики їх значення. Різниця між дослідними і теоретичними значеннями поздовжніх напружень не перевищувала 10-15%, що підтверджує коректність використаних при розробці цієї методики підходів та її задовільну для трасових умов вірогідність.

Виконано також оцінку міцності надземного переходу нафтопроводу "Дружба-1", що зазнав значних перевантажень з утворенням пластичних деформацій внаслідок сповзання ґрунту під час будівництва газопроводу "Прогрес", у місці їх перетину. Дослідження НДС проведено з застосуванням опрацьованої у другому розділі теорії та методу скінчених різниць на підставі результатів вимірювань фактичних відхилень вузлових точок від прямолінійного положення. З'ясовано, що внаслідок відвалювання ґрунту відбулося істотне розвантаження труб зі зменшенням найбільшого значення інтенсивності напружень з  $\sigma_1$  до  $0,368\sigma_T$ . Отже, незважаючи на роботу металу труб за границею пружності, після відвалювання ґрунту міцність надземного трубопроводу забезпечується.

**Восьмий розділ** присвячений розв'язанню важливих задач, пов'язаних з капітальним ремонтом магістральних нафтопроводів великих діаметрів. На основі аналізу експериментальних досліджень в експлуатаційних умовах обґрунтовано вибір розрахункової схеми (рис. 9) та математичних моделей для визначення НДС трубопроводу під час механізованого капітального ремонту в траншеї без зупинки транспортування нафти.

На відміну від відомих розробок враховано піддатливість ґрунту, на який опираються ділянки ремонтного трубопроводу, суміжні з підкопаним відтинком, та ефекту поздовжньо-поперечного згину. Розрахункові залежності одержано у разі підтримки підкопаного відтинку у двох точках окремо без урахування впливу на згин трубопроводу поздовжньої стискальної сили та з її врахуванням. У першому випадку – на підставі універсального рівняння зігнутої осі балки, у другому – на підставі загального розв'язку диференціального рівняння поздовжньо-поперечного згину стержня.

Під час урахуванні взаємодії трубопроводу з ґрунтом на суміжних з середньою частиною розрахункової схеми ділянках застосовано лінійно пружну модель з різними коефіцієнтами постелі злежаного та підсипаного ґрунту. З метою

спрощення математичної моделі впливом деформативності труби під час ремонту на величину еквівалентної поздовжньої сили  $S$  знехтувано, що призводить при розрахунках до незначного перебільшення значень згинальних моментів в запас міцності. В цьому разі еквівалентна поздовжня сила залишається сталою вздовж всіх трьох ділянок розрахункової схеми і залежить лише від температурного перепаду та робочого тиску.

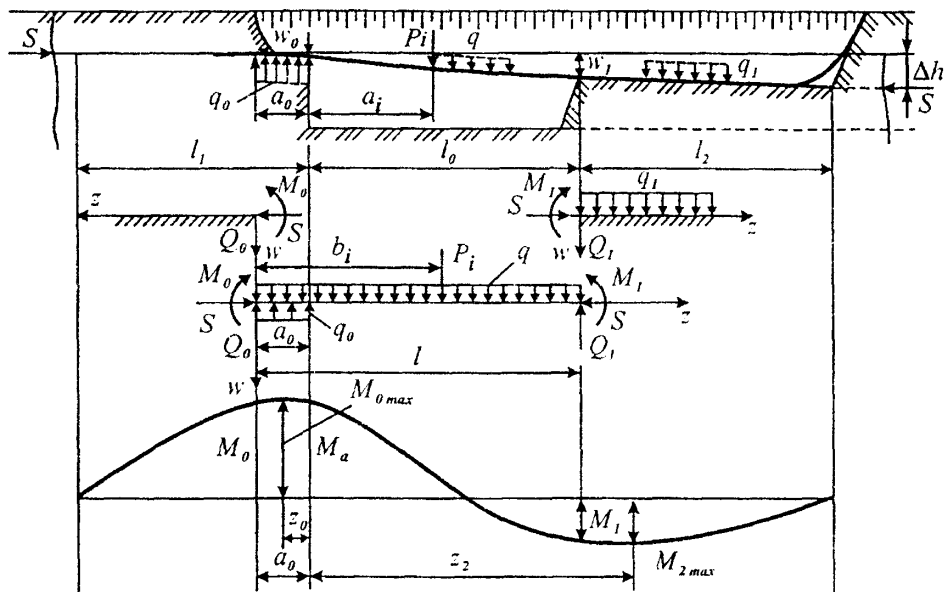


Рис. 9. Розрахункова схема та епюра згинальних моментів при капітальному ремонті підземного трубопроводу в траншеї

Для визначення основних невідомих зусиль  $Q_0$ ,  $Q_L$  та  $M_0$ ,  $M_L$  використано два рівняння сумісності переміщень на кінці вирізаної частини і початку півбезмежного трубопроводу, що опирається на свіжопідсищений ґрунт, та два рівняння статки для вирізаної частини.

У разі ремонту без використання підтримуючих підкопану ділянку вантажопідійомних механізмів небезпечний переріз знаходиться над ґрунтовою призмою на відстані  $z_0$  від початку координат. Значення цієї відстані та відповідного її згинального моменту визначаються за формулами

$$z_0 = \frac{1}{\beta_0} \arctg \frac{1}{1 - 2\beta_0 \frac{M_0}{Q_0}}; \quad (11)$$

$$M_{o\max} = e^{-\beta_0 z_0} \left[ \left( -\frac{Q_0}{\beta_0} + M_0 \right) \sin \beta_0 z_0 + M_0 \cos \beta_0 z_0 \right], \quad (12)$$

де  $\beta = \sqrt{\frac{c_{\text{н}} D}{4EI}}$ ;  $c_{\text{н}}$  - коефіцієнт нормального опору ґрунту;  $D$  - зовнішній діаметр трубопроводу;  $EI$  - жорсткість перерізу труби при згині.

На підставі отриманої математичної моделі розроблено відповідне програмне забезпечення для визначення з застосуванням ЕОМ основних характеристик НДС трубопроводу при механізованому ремонті в траншеї з заміною ізоляційного покриття. Розробку застосовано для дослідження та контролю напруженого стану під час капітального ремонту та заглиблення магістральних нафтопроводів "Дружба"  $D = 1020$  мм і  $1220$  мм.

Дослідження НДС трубопроводу для випадку ремонту без підтримки підкопаної ділянки показали, що найбільший згинальний момент  $M_{0\max}$  і просідання відремонтованого трубопроводу  $\Delta h$  (рис 9) істотно зростають зі збільшенням осадки підсипаного ґрунту  $\Delta = \Delta h - w_1$  і кроку переміщення ремонтних машин (довжини підкопаного відтинку  $l_0$ ). У разі значних величин  $\Delta$  і  $l_0$  ізоляційна машина сідає на дно траншеї, що утрудняє її роботу.

Важливим технологічним параметром, від якого залежать значення найбільшого згинального моменту та підсадки трубопроводу  $\Delta h$  є осадка підсипаного ґрунту. Так, наприклад, для нафтопроводу  $D = 1220$  мм, зменшення осадки ґрунту підсипки з 10 см до 2 см, що можна досягнути, підсипаючи відремонтований трубопровід подрібненим ґрунтом та його ущільненням, дозволяє зменшити величину  $M_{0\max}$  приблизно в 1.6 рази, а  $\Delta h$  в 2 рази. За інших однакових умов збільшення поздовжньої стискальної сили супроводжується зростанням  $M_{0\max}$ . Це явище проявляється тим інтенсивніше, чим більші довжина підкопаного відтинку (кроку ремонтних машин) та величина осадки підсипаного ґрунту.

Дослідження впливу зміни основних технологічних параметрів ремонтної колони на НДС виконано також для нафтопроводу  $D = 1220$  мм з використанням двох проміжних опор. У цьому разі крок переміщення ремонтної колони змінювався в межах 8-11 м. Вимірювання висотного розташування характерних точок трубопроводу під час ремонту показало, що його положення над опорами може змінюватись в межах від -12 до 15 см, а повне осідання відремонтованої ділянки - від 10 см до 27 см. При цьому підняттю труби на опорах вище свого початкового розташування на злежаному ґрунті (від'ємний прогин) відповідають менші значення підсадки трубопроводу.

Виконані з урахуванням цих вимірювань числові дослідження показали, що при зміщенні трубопроводу на опорі вище початкового положення найбільший згинальний момент виникає в опорному перерізі і його величина тим більша, чим більше підняття трубопроводу. При зміщенні трубопроводу від початкового розташування вниз відбувається перерозподіл згинальних моментів – зменшення в

опорному перерізі та збільшення у небезпечному перерізі над ґрунтовою призмою. При певній величині зміщення опорної точки вниз моменти у цих перерізах рівні між собою. Такому висотному розташуванню опори відповідає мінімальне значення найбільшого згинального моменту, що виникає при ремонті трубопроводу для заданого кроку пересування ремонтної колони. Потрібно зазначити, що в цьому разі підсадка трубопроводу може бути суттєвою. Збереження розташування трубопроводу після ремонту на попередній глибині потребує його підйому опорним пристроєм вище початкового рівня, що призводить до істотного збільшення опорного згинального моменту. Якщо при виконанні ремонту можливо допустити певне заглиблення трубопроводу, то підбираючи відповідні значення кроку ремонтної колони і зміщення опорної точки вниз можна досягнути суттєвого пониження згинальних моментів, що виникають в трубопроводі під час виконання ремонтних робіт.

Спостереження за ходом виконання ремонтних робіт також показали, що відстань від краю підсіпки до ізоляційної машини може змінюватися в достатньо широких границях, від 1.5-2м до 8-10м. Як показали числові дослідження, зі збільшенням цієї відстані величина опорного згинального моменту зростає.

На підставі виконаних досліджень НДС з урахуванням пластичних деформацій та несучої здатності прямолінійних елементів магістральних трубопроводів обґрунтовано, що за відсутності дефектів стінки труб допустимі значення параметрів ремонтної колони можна визначати з розрахунку на міцність, задовольняючи лише регламентовану СНиП 2.05.06-85 умову деформативності. Це дає можливість збільшувати крок ремонтної колони та підвищувати економічну ефективність її роботи.

Для експериментальної перевірки запропонованих математичних моделей виконано експериментальні дослідження ремонтних поздовжніх напружень та вергикальних зміщень під час механізованого і ручного способів ремонту. Найбільша різниця між дослідними і теоретичними значеннями цих параметрів не перевищувала 12%.

У дев'ятому розділі розв'язано пружні і пружнопластичні задачі поздовжньо-поперечного згину та втрати стійкості відкритої ділянки трубопроводу, що пов'язані з виконанням ремонтних робіт та технічною експлуатацією трубопроводів в екстремальних умовах.

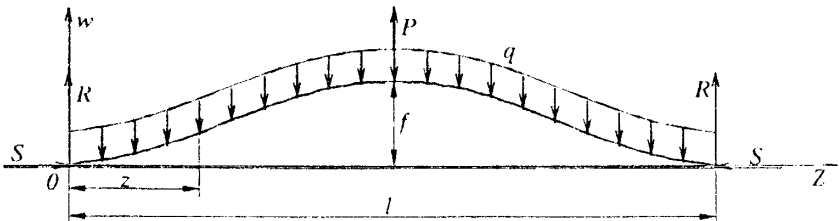


Рис. 10. Розрахункова схема піднятої ділянки трубопроводу



На підставі диференціального рівняння поздовжньо-поперечного згину піднятої з жорсткої основи первісно прямої ділянки трубопроводу (рис. 10) одержано залежності для сили  $P$  та висоти піднімання  $f$  ( $f < 0,1l$ ):

$$\tilde{P} = \frac{P}{ql} = \frac{\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0}; \quad f = \left[ 1 + (0.5 - \tilde{P})\alpha_0^2 - (1 - \tilde{P})\alpha_0 \sin \alpha_0 - \cos \alpha_0 \right] \frac{qEI}{S^2}, \quad (13)$$

де  $\alpha_0 = \frac{kl}{2} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{S}{EI}}$  - параметр поздовжнього згину піднятої ділянки трубопроводу;  $EI$  - жорсткість труби при згині;  $l$  - початкова довжина піднятої ділянки;  $q$  - інтенсивність вагового навантаження;  $S$  - поздовжня стискальна сила, яка залежить від внутрішнього тиску та температурного перепаду.

Характерні особливості задачі досліджено на прикладі підняття незаповненого трубопроводу розміром 1020x12 мм (рис. 11).

Як бачимо, характер залежності  $P$  від  $f$  здебільшого визначається початковим значенням стискальної сили  $S$ . Під час підйому вільно лежачого трубопроводу ( $S_0 = 0, \Delta t = 0$ ) сила  $P$  монотонно зростає із збільшенням висоти  $f$ .

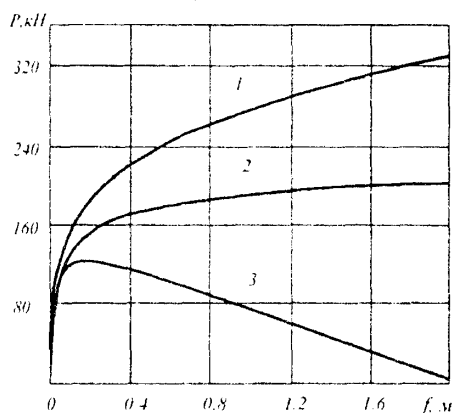


Рис. 11. Залежність  $P(f)$  за різних значень температурного перепаду:

1 -  $\Delta t = 0^\circ \text{C}$ ; 2 -  $\Delta t = 30^\circ \text{C}$ ;  $\Delta t = 60^\circ \text{C}$

За наявності в трубопроводі значної поздовжньої сили (наприклад при  $\Delta t = 60^\circ \text{C}$ ) із зростанням  $f$  сила підняття на початку раптово збільшується, досягає максимуму, а далі поступово зменшується до нуля. При підніманні стиснутого трубопроводу на критичну висоту  $f_c$  ( $P = 0$ ) він втрачає стійкість, що відповідає  $S = 3.96 \sqrt{qEI/f_c}$ ;  $M_{\text{max}} = 1.41 \sqrt{EI f_c q}$ . Отже,

контролюючи значення сили піднімання, можна встановити, чи існує небезпека втрати стійкості. Зменшення сили підняття вказуватиме, що при  $P = 0$  наступить стрибкоподібний перехід викривленої ділянки на новий стійкий стан з одночасним зменшенням стискальної сили. Аналіз напруженого стану трубопроводу показав, що втрата стійкості у разі піднімання трубопроводів великих діаметрів настає за границею пропорційності.

Викладений вище підхід застосовано також для дослідженні впливу нерівностей основи (початкових стріл прогину вверх  $f_0$ ) на пружну стійкість відкритих ділянок магістральних трубопроводів.

Для вивчення явища втрати стійкості випнутої ділянки трубопроводу з урахуванням пластичних деформацій застосовано метод початкових параметрів у

поєднанні з методом скінченних елементів. За розрахункову модель прийнято балковий елемент трубчастого перерізу з недеформівним контуром, що зазнає дії внутрішнього тиску та згину із стиском. З огляду на симетричність обрису випнутої ділянки розглядається лише її половина. Прикладена на початку координат поперечна сила визначається з рівняння рівноваги. Три інші початкові параметри – прогин, кут повороту і згинальний момент – дорівнюють нулю. При визначенні кута повороту і прогину елемента через кривину застосовано розклад її функцій у ряд Маклорена з точністю до четвертих похідних.

Внутрішній тиск та поздовжня сила в межах випнутої ділянки прийняті сталими і відповідно зміна кривини трубопроводу на цій ділянці визначається "сдиною" діаграмою згину, яка знаходяться з застосуванням викладеної у розділі 2 методики. Для доведення розв'язку до числових результатів розроблено відповідне програмне забезпечення, тестування якого виконано для випадку випинання труб в межах пружності. Розроблену методику розрахунку застосовано для дослідження випинання та втрати стійкості за границею пружності трубопроводу перерізом 1020×12 мм із сталі 17Г1С з урахуванням початкових відхилень. Виявлено, що застосування при розрахунках на стійкість методик, побудованих на лінійно-пружній моделі, може призвести до істотних похибок. Так для розглянутого випадку при температурному перепаді  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$  різниця між значеннями найбільшого згинального моменту  $M_{\text{max}}$  та довжини випинання  $l$ , знайденими при пружному і пружнопластичному розрахунках складає відповідно 1.9 і 1.4 рази.

Окрім цього, пружній розв'язок завжди дає завищені значення критичної поздовжньої сили, що може призвести до неправильних конструктивних рішень при проектуванні трубопроводів чи неправильних висновків при оцінці технічного стану випнутих ділянок діючих трубопроводів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

На основі виконаних комплексних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу науково-технічну проблему з підвищення надійності експлуатації магістральних трубопроводів шляхом розробки нових підходів до оцінки технічного стану потенційно небезпечних ділянок розрахунково-експериментальними методами з урахуванням пластичних деформацій металу труб.

1. Запропоновано новий підхід до розв'язання задачі про визначення напружено-деформованого стану труби з пружнопластичного матеріалу в загальному випадку комбінованого навантаження внутрішнім тиском, розтягом (стиском), згином та крученням, що ґрунтується на безмоментній теорії циліндричних оболонки і деформаційній теорії пластичності. Зазначений підхід включає: а) графоаналітичний метод розв'язання цієї задачі у разі графічно заданої діаграми деформування; б) аналітично-чисельний метод визначення розподілу напружень в поперечному перерізі труби з нерівномірною товщиною стінки, залежностей між внутрішніми силовими факторами і відповідними їм

параметрами деформації та характеристик жорсткості. Одержані за допомогою цих методів розрахункові моделі застосовано для дослідження впливу внутрішнього тиску, стиску та кручення на жорсткість при згині труби із сталі 17ГС та площі її внутрішньої порожнини під час навантаження за межею пружності.

2. Розроблено аналітично-чисельну методику розрахунку довгої труби за межею пружності з урахуванням деформації поперечного перерізу за одночасній дії внутрішнього (зовнішнього) тиску, розтягу (стиску) та згину. Вперше досліджено вплив сплющування поперечного перерізу труб, що використовуються в магістральних трубопроводах, на їх несучу здатність у разі згину. Виявлено, що при згині в пружній області сплющування поперечного перерізу неістотне і практично не впливає на результати розрахунку. Опірність труб згину за границею пружності значною мірою залежить від величини і типу тиску. Зовнішній тиск збільшує сплющування, що зумовлює зменшення граничного моменту та критичної кривини, за яких вичерпується несуча здатність труби як балки. Внутрішній тиск, зменшуючи сплющування, сприяє збільшенню значення критичної кривини. При оцінці несучої здатності труби, яка перебуває під значним внутрішнім тиском, ефект сплющування можна не враховувати.

Розроблену методику розрахунку прямої труби з урахуванням ефекту сплющування узагальнено на труби великої кривини. Вивчено вплив зміщення нейтральної осі на результати розрахунків при чистому згині. З'ясовано, що за наявності внутрішнього тиску, нехтування вказаним зміщенням може призвести до суттєвої похибки при визначенні поздовжніх напружень і коефіцієнта жорсткості.

3. На підставі результатів експериментальних досліджень пружнопластичного деформування труб в лабораторних і натурних умовах підтверджено задовільну для практики точність опрацьованих методів розрахунку трубопроводів за межею пружності. В області малих пластичних деформацій за відсутності місцевої втрати стійкості стінки різниця між експериментальними і теоретичними значеннями згинального моменту, овальності поперечного перерізу та осової деформації не перевищувала здебільшого 10-12 %.

4. Створено науково-практичні основи розрахунку напруженого стану ділянки трубопроводу, підсиленої бандажем типу "труба на трубу" із заповненням міжтрубного простору спеціальним бетоном. Вивчено характер впливу розширювального ефекту бетону під час отвердіння на зменшення кільцевих напружень від робочого тиску в трубопроводі. Обґрунтовано доцільність застосування розробленого способу для підсилення дефектних зон МТ.

5. Розроблено нові розрахунково-експериментальні методи оцінки НДС, в тому числі вперше з урахуванням наявності пластично-деформованих зон, за результатами вимірювання механічних та геометричних параметрів. Опрацьовано розрахункові моделі та програмне забезпечення для діагностування напруженого стану балкових переходів у гористій місцевості та висячих переходів великої довжини, які застосовано для оцінки технічного стану нафтопроводів "Дружба". На основі аналізу результатів теоретичних і тривалих експериментальних

досліджень виявлено, що зміна на протязі року НДС надземних переходів в зонах зсувів ґрунту на схилах Карпат має циклічний характер. У зимово-весняний період вплив зсувних процесів та пониження температури спричиняють збільшення поздовжньої сили розтягу в розташованих зверху схилів переходах. Середні та нижні переходи працюють за наявності поздовжньої стискальної сили, найбільші значення якої мають місце під час зупинок перекачування нафти у спекотні дні, що недопустимо, оскільки призводить до поздовжньої втрати стійкості та утворення гофр і вм'ятин.

6. Уточнено методику визначення НДС ділянок трубопроводів під час механізованого капітального ремонту з заміною ізоляційного покриття в траншеї з підтримкою і без підтримки вантажопідйомними механізмами, шляхом урахування піддатливості ґрунту на суміжних з підкритою частиною ділянках та впливу поздовжньої стискальної сили. На основі цієї методики, що підтверджується дослідями в натурних умовах, розроблено розрахунково-експериментальний спосіб контролю рівнів додаткових поздовжніх напружень, які виникають під час виконання ремонтних робіт, та опрацьовано практичні рекомендації щодо їх зменшення.

7. Розв'язано задачу про поздовжньо-поперечний згин та втрату стійкості ділянки трубопроводу, що працює за наявності поздовжньої стискальної сили, під час її підйому з рівної основи. Одержано розрахункові залежності між основними параметрами задачі - силою і висотою підйому - та початковим значенням поздовжньої стискальної сили. Встановлено умови, за яких підйом переходить у подальше самовипинання трубопроводу. Вперше досліджено вплив пластичних деформацій на випинання та втрату стійкості відкритих ділянок магістральних трубопроводів. З'ясовано, що застосування методик, побудованих на лінійно-пружній моделі, для трубопроводів великих діаметрів може призвести до небезпечних похибок, оскільки дає завищені значення критичної сили.

За результатами виконання теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та впроваджено низку заходів, спрямованих на зменшення рівнів поздовжніх напружень в потенційно небезпечних ділянках магістральних нафтогазопроводів та підвищення рівня їх експлуатаційної надійності: на надземних і висячих переходах та при виконанні ремонтних робіт нафтопроводів "Дружба" (Самарське і Брянське управління, Росія; Гомельське управління, Білорусія; Рівненське управління та Закарпатська дільниця, Україна); на надземних переходах газопроводів КЗУ-II та Івацевичі-Долина. Економічний ефект від впровадження розробок у 1977 - 1989 р. р. становив 1 міль. 146.5 тис. крб.

## ПУБЛІКАЦІ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Білобран Б.С. Пружнопластичний згин тонкостінної труби із стискувального матеріалу при наявності внутрішнього тиску // Вісник Львів. політехн. ін-ту. Сучасні питання теплотехніки. - 1978. - №120. - С. 102 - 107.

2. Білобран Б.С. Упругопластическое состояние тонкостенной трубы // Изв. вузов. Машиностроение. - 1978. - №8. - С. 17 - 21.

3. Билобран Б.С. Оваллизация тонкостенной трубы за пределом упругости при действии изгиба и внутреннего давления // Изв. вузов. Машиностроение. - 1979. - №7. - С. 82 - 86.

4. Обыденный А.А., Андреев А.А., Билобран Б.С., Слюсаренко М.И. Проверочные испытания на прочность трубопровода диаметром 1220 мм при капитальном ремонте изоляции // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. ВНИИОЭНГ. - М: 1983. - №8. - С. 8 - 10.

5. Билобран Б.С. Экспериментальные исследования чистого изгиба труб за пределом упругости // Изв. вузов. Машиностроение. - 1984. - №4. - С. 3 - 6.

6. Билобран Б.С., Слюсаренко М.И. Исследование напряженно-деформированного состояния нефтепровода при капитальном ремонте без использования грузоподъемных устройств // Нефтепромысловое дело и транспорт нефти. ВНИИОЭНГ. - М: 1984. - Вып.8. - С. 36 - 38.

7. Билобран Б.С. Несущая способность тонкостенной кривой трубы при изгибе за пределом упругости // Пробл. прочности. - 1984. - №12. - С. 77 - 80.

8. Билобран Б.С. Расчет деформаций при кручении подземных трубопроводов // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Резервы прогресса в архитектуре и строительстве. - 1985. - №193. - С. 13 - 15.

9. Билобран Б.С., Пискозуб Л.И., Слюсаренко М.И. Продольно-поперечный изгиб магистрального трубопровода при ремонте в траншее // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: ВНИИОЭНГ. - М: 1987. - Вып.3. - С. 5 - 9.

10. Билобран Б.С. О поперечном изгибе тонкостенной трубы из идеально пластического материала // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. - 1987. - №217. - С.8 - 9.

11. Билобран Б.С. О потере устойчивости открытого участка трубопровода при подъеме // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. ВНИИОЭНГ. - М: 1987. - Вып.7. - С. 7 - 10.

12. Билобран Б.С., Слюсаренко М.И., Андреев А.А., Обыденный А.А. Оценка прочности магистрального трубопровода при капремонте // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. ВНИИОЭНГ. - М: 1987. - Вып.9. - С.6 -8.

13. Билобран Б.С., Слюсаренко М.И., Шклярук З.П. Испытание тонкостенных труб при действии изгиба и внутреннего давления // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. - 1988. - №227. - С. 5 - 8.

14. Билобран Б.С., Слюсаренко М.И. Расчетно-экспериментальный способ определения усилий в подвесках трубопроводного перехода // Транспорт нефти, защита от коррозии и охрана окружающей среды. ВНИИОЭНГ. - М: 1989. - Вып.2. - С. 4 - 5.

15. Билобран Б.С. Расчетно-экспериментальный способ контроля напряжений в магистральном трубопроводе, работающем за пределом упругости // Транспорт нефти, защита от коррозии и охрана окружающей среды. ВНИИОЭНГ. - М: 1989. - Вып.5. - С. 3 - 4.

16. Білобран Б.С. Несущая способность испытываемых изгиб прямолинейных участков магистральных трубопроводов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. ВНИИОЭНГ. – М: 1989.- Вып.10. - С.4 - 6.

17. Білобран Б.С. Решение при помощи ЭВМ задачи выпучивания трубопровода за пределом упругости // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. ВНИИОЭНГ. – М: 1992. - Вып.2. - С. 5 - 10.

18. Білобран Б.С., Піскозуб Л.Й. Напружено-деформований стан трубопроводу при його заглибленні // Вісник Львів. політехн. ін-ту. Теплоенергетичні системи та пристрої. - 1992. - №266. - С. 5 - 7.

19. Білобран Б.С., Василюк В.М., Кінаш О.Б. Розрахунково-експериментальний метод діагностики напруженого стану балкових переходів магистральних трубопроводів // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. - 1996. - № 311. - С. 3 - 5.

20. Білобран Б.С., Василюк В.М. Контроль напруженого стану магистрального трубопроводу за допомогою компаратора // Зб. наук. ст. Проблеми теорії і практики будівництва. Т. IV. – ДУ "Львівська політехніка". – Львів, 1997. - С. 7 - 10.

21. Білобран Б.С., Василюк В.М., Кінаш О.Б. Діагностика напруженого стану надземного переходу нафтопроводу в зоні зсуву // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. - Львів: Каменяр, - 1998. - Вип.3. - С. 580 - 584.

22. Білобран Б.С., Кінаш О.Б. Пружнопластичний стан тонкостінної труби під тиском при згині з розтягом (стиском) // Пробл. прочності. - 1998. - №6. - С. 99 - 105.

23. Білобран Б., Кінаш О. Експериментальні дослідження пружно-пластичного стану позациндрово стиснутих тонкостінних труб, які перебувають під внутрішнім тиском // Машинознавство. - 1999. - №7. - С. 20 - 23.

24. Білобран Б. Вплив поздовжніх напружень на міцність діючих магистральних трубопроводів // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. - Львів: Каменяр, - 2000. - Вип.2. - С. 9 - 14.

25. Білобран Б., Кінаш О. Вплив внутрішнього тиску на жорсткість тонкостінної труби під час згину з розтягом (стиском) за границею пропорційності // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Львів: Каменяр, - 2000. - Вип.4. - С. 553 - 560.

26. Якимечко Я.Б., Білобран Б.С. Специальный расширяющийся портландцемент // Цемент и его применение. – 2001. - №4. – С. 32-35.

27. Білобран Б.С. Кінаш О.Б. Пружнопластичний стан труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні // Пробл. прочності. - 2002. - №2. - С. 110-120.

28. Білобран Б.С., Мельник Н.Б. Вплив сплющування на несучу здатність тонкостінних труб під тиском при згині з розтягом (стиском) // Машинознавство. – 2002. - №5. - С. 17 - 21.

29. Білобран Б.С., Кир'ян В.І., Хай М.В. Аналіз напруженого стану балкового переходу магістрального нафтопроводу в складних умовах експлуатації // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. Львів: Каменяр, - 2002. - Вип.4. - С. 21 - 29.

30. Білобран Б.С., Шлапак Л.С. Методика визначення напруженого стану трубопроводу при ремонті в траншеї // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2002. - № 4(5) . С.67-72.

31. Білобран Б.С, Лучко Й.Й, Климончук Р.В. Особливості роботи надземних переходів магістральних нафтопроводів у гірських умовах // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. - Львів: Каменяр, - 2002. - Вип.5. - С.455-462.

32. Білобран Б.С., Мельник Н.Б. Вплив розтягу (стиску), згину та кручення на роздуття трубопроводу під час випробувань високими тисками // Методи та прилади контролю якості. - 2002. - № 9 . С.32-34.

33. Білобран Б.С. Вплив нерівностей основи на стійкість відкритих ділянок магістральних трубопроводів // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2003. - № 1 (5). С.51-54.

34. Білобран Б.С., Шлапак Л.С. Напружено-деформований стан трубопроводу при його підсадці // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2003. - № 1(6) . С.107-110.

35. Спосіб ремонтування магістрального трубопроводу.: Пат. 38190 А, Україна // Дрогомирецький М.М., Петровський Б.С., Рильніков Б.С., Білобран Б.С., Якимечко Я.Б.(UA). - №2000063271. Заявлено 06.06.00. Опубл. 15.05.01. Бюл. №4. - 2с.

36. Bilobran B., Wasyluk W. Diagnostyka stanu naprezen odkrytych odcinkow ropociagow eksploatowanych w warunkach skomplikowanych // Materiały II Krajowej Konferencji Technicznej "Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów". Plock. - 1999. Str. 129 - 132.

37. Дрогомирецький М., Петровський Б., Рильніков Б., Білобран Б., Якимечко Я. Напружено-деформований стан трубопроводу підсиленого сталобетонним бандажем// 6-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові.: Тези допов. – Львів: Кінпатрі ЛТД. -2003. – С. 27.

### *Анотація*

Білобран Б.С. Наукові основи оцінки напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів з урахуванням пластичних деформацій. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2004.

Розроблено математичні моделі та методи оцінки напружено-деформованого стану (НДС) потенційно небезпечних ділянок магістральних нафтогазопроводів, що експлуатуються в складних умовах і за наявності пластичних деформацій. Застосовано новий підхід до розв'язання задачі про пружнопластичний стан труб у загальному випадку комбінованого навантаження внутрішнім тиском, розтягом

(стиском), згином та крученням, що ґрунтується на безмоментній теорії циліндричних оболонок і деформаційній теорії пластичності. Запропоновано ефективні методи визначення НДС та характеристик жорсткості за межею пружності прямолінійних елементів трубопроводів, у тому числі з урахуванням сплюснення поперечного перерізу. Проведено експериментальну перевірку розроблених моделей у лабораторних та натурних умовах.

Створено комплексні розрахунково-експериментальні методи оцінки НДС балкових переходів у гористій місцевості та висячих переходів великої довжини, у тому числі з урахуванням наявності пластично-деформованих зон, за результатами вимірювання їх статичних і геометричних параметрів.

Уточнено методика визначення НДС ділянок підземних трубопроводів під час механізованого капітального ремонту з заміною ізоляційного покриття в траншеї, шляхом урахування піддатливості ґрунту на суміжних з підкопаною частиною ділянках та впливу поздовжньої стискальної сили.

Поставлено та розв'язано задачу про поздовжньо-поперечний згин та втрату стійкості ділянки трубопроводу, що працює за наявності поздовжньої стискальної сили, під час її підняття з рівної основи. Досліджено вплив пластичних деформацій на випинання та втрату стійкості відкритих ділянок магістральних трубопроводів.

**Ключові слова:** магістральний трубопровід, надземний перехід, натурні вимірювання, напружений стан, пластична деформація, міцність, стійкість.

#### *Аннотація*

Билобран Б.С. Научные основы оценки напряженно-деформированного состояния магистральных трубопроводов с учетом пластических деформаций. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2004.

На основе комплексного подхода разработаны и апробированы на действующих нефтегазопроводах расчетно-экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) потенциально опасных участков магистральных трубопроводов, работающих при повышенных уровнях напряжений.

Применен новый подход к решению задач упругопластического состояния труб при действии внутреннего давления, растяжения (сжатия), изгиба и кручения в рамках безмоментной теории цилиндрических оболочек и деформационной теории пластичности. Предложены эффективные методы определения НДС и характеристик жесткости прямолинейных элементов трубопроводов. Указанный подход включает: графоаналитический метод при графически заданной диаграмме деформирования; аналитически-числовой метод для трубы с неравномерной толщиной стенки; формулы для изгибающего момента при изгибе трубы с днищами и при изгибе с кручением для случая степенной аппроксимации;



рекуррентные формулы, описывающие предельное состояние трубы с днищами под давлением при поперечном изгибе.

На основании полумоментной нелинейной теории цилиндрических оболочек, деформационной теории пластичности и принципа минимума полной энергии разработана аналитически-числовая методика расчета за пределом упругости длинной трубы при совместном действии внутреннего (внешнего) давления, растяжения (сжатия) и изгиба. Исследовано влияние сплющивания поперечного сечения труб магистральных трубопроводов на их несущую способность при изгибе. Методика обобщена на случай труб большой кривизны. Изучено влияние смещения нейтральной оси на результаты расчетов.

Проведены экспериментальные исследования упругопластического деформирования труб в лабораторных и натурных условиях с целью обоснования принятых при теоретических исследованиях допущений и проверки предложенных методов расчета элементов магистральных трубопроводов с учетом пластических деформаций.

На основании теоретических и экспериментальных исследований на лабораторных образцах и натурных трубах подтверждена эффективность защищенного патентом способа усиления дефектных участков магистральных нефтегазопроводов при помощи бандажа на специальном расширяющемся бетоне.

Разработаны расчетно-экспериментальные методы оценки НДС балочных переходов в горной местности и висящих переходов большой длины, в том числе с учетом пластических деформаций. Расположение опасных сечений и возникающих в них напряжений определяются при помощи математического моделирования НДС участка трубопровода на основании результатов натурных измерений геометрических и механических параметров путем решения смешанной задачи строительной механики.

Разработки использованы для контроля напряженного состояния и оценки прочности надземных переходов магистральных нефтепроводов “Дружба” в оползневых зонах на склонах Карпат, через р. р. Днестр и Латорица, газопроводов ПО “Львовтрансгаз”.

На основе анализа результатов теоретических исследований и долговременных натурных измерений установлено, что изменение на протяжении года НДС надземных переходов нефтепроводов “Дружба” в зонах оползней имеет циклический характер. Расположенные в верхней части склона переходы функционируют при наличии продольной растягивающей силы, а в нижней – продольной сжимающей силы. Особую опасность представляют длительные остановки работы нефтепроводов в морозное зимнее время для верхних переходов и в жаркую летнюю погоду для нижних переходов.

Уточнена методика определения НДС участков подземных трубопроводов при механизированном капремонте с заменой изоляционного покрытия в траншее, путем учета податливости грунта на смежных с подкопанной зоной участках и влияния продольной сжимающей силы. На основе этой методики, которая хорошо подтверждается натурными опытами, создан расчетно-экспериментальный метод

контроля дополнительных продольных напряжений, возникающих при выполнении ремонтных работ.

Поставлена и решена задача продольно-поперечного изгиба и потери устойчивости участка трубопровода, работающего при наличии продольной сжимающей силы, при подъеме с равного основания. Получены расчетные зависимости между силой и высотой подъема и исходным значением продольной силы. Определены условия, при которых подъем переходит в самовыпучивание.

Исследовано влияние пластических деформаций на потерю устойчивости открытых участков магистральных трубопроводов. Установлено, что применение линейно-упругой модели при расчетах на устойчивость трубопроводов больших диаметров дает завышенные значения критической силы.

**Ключевые слова:** магистральный трубопровод, надземный переход, натурные измерения, напряженное состояние, пластическая деформация, несущая способность, прочность, устойчивость.

### *Summary*

Bilobran B.S. Scientific Basis of Stress-Strain State Assessment of Trunk Pipelines Taking Into Account Plastic Deformations. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of doctoral of technical sciences in specialty 05.15.13 – Oil and Gas Pipelines, Bases and Depositories. Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivs'k, 2004.

Mathematical models and methods of stress-strain state assessment for hazardous oil and gas pipeline sections were developed when plastic deformations occurred.

A new approach was proposed for solving problems concerning the elastic-plastic state of pipes subjected to combined loads such as internal pressure, tension (compression), and bending with torsion. That approach was based on the membrane theory of cylindrical shells and the deformational theory of plasticity. Effective methods were proposed for evaluation stress-strain state and stiffness characteristics beyond limit of elasticity for straight pipeline elements taking into account cross section flattening. Experimental tests on the developed methods were conducted in the laboratory and in the field.

Complex methods of stress-strain state assessment for pipeline spans in highlands and pipeline spans were developed using calculation and experimentation. Plastically deformed zones were included in these methods and calculations by using results of static and geometric parameters. The method of determining the stress-strain state of underground pipeline sections during major repair operations, including the replacement of the insulating covering in the trench, was improved by ascertaining soil resistance on adjacent sections and by verifying the influence of longitudinal force. The bending and collapse problems of the pipeline sections which operate under longitudinal compressive force during their elevation from the plane base were set and solved. The influence of plastic deformations on buckling of the open sections of the trunk pipelines was investigated.

**Key words:** Trunk pipeline, above-ground pipeline, in-situ measurements, plastic deformation, capacity, stress state, plastic deformation, strength, stability.