

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

ДЕЙНЕГА РУСЛАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 622.691.4:622.692.4

**ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ
З ВРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

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

Івано-Франківськ – 2021

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Івасів Василь Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, професор кафедри
нафтогазових машин та обладнання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Марущак Павло Орестович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук, доцент
Болонний Василь Тарасович,
Державний вищий навчальний заклад
"Дрогобицький коледж нафти і газу",
заступник директора з навчальної роботи

Захист відбудеться «12» травня 2021 року о 13⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий 10 квітня 2021 року

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



А. П. Джус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Трубопроводи – найекономічніший спосіб транспортування нафти, нафтопродуктів і газу з місць видобутку та первинної підготовки на великі відстані найкоротшим шляхом з найменшими втратами до районів їх використання і переробки.

Значні терміни експлуатації та експлуатаційні чинники (вібраційне, статичне та динамічне навантаження, пошкодження ізоляційного покриття, просідання ґрунту, виникнення розмитих ділянок) викликають втомні та корозійно-втомні пошкодження елементів трубопроводів, що, у свою чергу, призводить до їх руйнування, завдає значних економічних втрат та є небезпечним явищем з точки зору безпеки і екології.

Аналізуючи аварії, які відбулися на трубопроводах, можна зазначити, що їх основними причинами у більшості випадків є втомні та корозійно-втомні пошкодження. Щодо аварій морських трубопроводів, то більшість з них (75%) викликані дією хвиль та течій на їх розмитих ділянках. Вплив цих факторів є не тільки найнебезпечнішим, але і найменш прогнозованим. Під час експлуатації трубопроводів також спостерігаються пульсації тиску перекачуваного середовища. Їх дія призводить до збільшення впливу втомних та корозійно-втомних пошкоджень, і, як наслідок, до руйнування трубопроводу.

Оскільки трубопроводи експлуатуються переважно у постійному режимі, то для проведення поточних і капітальних ремонтів необхідно їх зупиняти, що не завжди можливо. Тому актуальним залишається питання прогнозування втомної та корозійно-втомної довговічності трубопроводів з врахуванням експлуатаційних факторів та розроблення заходів для подовження терміну їх експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась: в рамках наукового напрямку Національної програми “Нафта і газ України до 2010 року” (постанова Кабінету Міністрів від 08.10.04 р. № 1331); відповідно до “Енергетичної стратегії України на період до 2030 року” (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.13 р. № 1047 р) та базується на результатах науково-дослідних тематик:

– 11-102-6 “Розробка методу прогнозування залишкового ресурсу та критичних деформацій трубопроводів за допомогою індикаторів навантаження після ремонту його ділянок” (Державний реєстраційний № 0103U001613);

– 27/2003 “Розроблення СОУ “Оцінка фактичної навантаженості і прогнозування залишкового ресурсу підводного трубопроводу” ДАТ “Чорноморнафтогаз” (Державний реєстраційний № 0103U007204);

– Д-1-07-Ф “Дослідження нових енергоресурсозберігаючих, екологічно-безпечних технологій видобування та транспортування вуглеводнів” (Державний реєстраційний № 0107U001558);

– 28/2008 “Розроблення науково-методологічних основ оцінки міцності ділянки нафтопроводу за результатами випробування вирізаних котушок з експлуатаційними дефектами” (Державний реєстраційний № 0108 U 010003);

– Д-13-17-П “Розробка нових методів оцінювання технологічно стану металоконструкцій довготривалої експлуатації з використанням засобів фізичної мезомеханіки” (Державний реєстраційний № 0117U004217).

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у прогнозуванні втомної та корозійно-втомної довговічності ділянок трубопроводів шляхом врахування експлуатаційних факторів та розроблення заходів для підвищення терміну їх експлуатації.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– провести аналіз умов роботи, сучасних досліджень напружено-деформованого стану та довговічності трубопроводів з врахуванням експлуатаційних факторів;

– сформулювати комплекс методів та методик для дослідження тріщиностійкості, прогнозування довговічності, імітаційного моделювання та експериментального дослідження натурних взірців елементів трубопроводів;

– дослідити вплив дії циклічного хвильового навантажування на розміту ділянку підводного трубопроводу;

– оцінити довговічність ділянок трубопроводів із врахуванням експлуатаційних факторів;

– розробити пристрої для підвищення довговічності дефектних ділянок трубопроводів та промислово їх випробувати.

Об’єкт досліджень – процес накопичення втомних та корозійно-втомних пошкоджень у трубопроводах.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, втомна та корозійно-втомна довговічність трубопроводу.

Методи досліджень: комплексне застосування фізичного, математичного та комп’ютерного моделювання об’єктів дослідження для підтвердження адекватності отриманих результатів. Основні положення дисертаційної роботи, що складають наукову новизну, науково обґрунтовано із залученням математичних методів. Для підтвердження адекватності отриманих результатів застосовано експериментальні методи досліджень з допомогою лабораторних установок та натурні випробування.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше розроблено і науково обґрунтовано математичну модель впливу морських хвиль на довговічність розмітої ділянки підводного трубопроводу з врахуванням дії сумарного хвильового навантаження у горизонтальній та вертикальній площинах;

– отримали подальший розвиток методи оцінки довговічності трубопроводу з урахуванням пульсацій перекачуваного продукту;

– отримав подальший розвиток метод оцінювання довговічності дефектної ділянки трубопроводу, зміцненої бандажем, за допомогою методу кінцевих елементів, що реалізуються в САЕ-системах.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено методикку оцінювання фактичної навантаженості і прогнозування залишкового ресурсу підводного трубопроводу (впроваджена в ДАТ “Чорноморнафтогаз”);

– розроблено пристрій для герметизації та зміцнення трубопроводу (Патент України на винахід № 100455);

– розроблено конструкцію пристрою для герметизації наскрізних дефектів трубопроводу (Патент України на корисну модель № 89225), яку використано на трубопроводі “Пасічна-Тисмениця” Богородчанського лінійного виробничного управління магістральних газопроводів.

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автором особисто:

– оцінено вплив коливань розмитої ділянки підводного трубопроводу під дією циклічного хвильового навантаження на його довговічність [3, 8, 9, 11, 13];

– визначено опір втомі трубопроводів із локальними корозійними дефектами на основі досліджень кінетики поширення тріщин і оцінки параметрів кривих втоми із врахуванням експлуатаційних навантажень та розроблено заходи для підвищення терміну їх експлуатації [2, 10, 12, 14-16, 20];

– встановлено довговічність трубопроводу з урахуванням висоти і циклічності хвиль та пульсацій перекачуваного продукту [2, 3, 8, 9, 11, 13, 14];

– визначено напружено-деформований стан дефектної ділянки трубопроводу, зміцненої бандажем [1, 4-7, 17-19, 21].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях і колоквиумах: “Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2005” (м. Харків, 2005 р.); “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития” (м. Одеса, 2005 р.); “Механічна втома металів” (м. Тернопіль, 2006 р.); “Проблеми нафтогазової промисловості” (м. Київ, 2006 р.); “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці “ІФНТУНГ-40” (м. Івано-Франківськ, 2007 р.)”; “Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії” (м. Івано-Франківськ, 2008 р.); “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій” (м. Львів, 2009 р.); “Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта”, VII междунар. науч.-техн. конф. (г. Новополюцк, 2011 г); “Нафтогазова енергетика” (м. Івано-Франківськ, 2011 р); “Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу (ПШТНГ-12)” (м. Івано-Франківськ, 2012 р); “Машины, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу ІІМ-2016” (м. Івано-Франківськ, 2016 р.); “Актуальні задачі сучасних технологій” (м. Тернопіль, 2016 р.); “Машины, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу РGE – 2018” (м. Івано-Франківськ, 2018).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на наукових семінарах кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Публікації. За результатами викладених в дисертаційній роботі досліджень опублікована 21 наукова праця, з яких 4 статті у фахових виданнях, 1 стаття в закордонному виданні, яке входить до наукометричних баз даних, 1

патент України на винахід, 1 патент України на корисну модель та 14 тез у збірниках праць міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота містить 11 таблиць та 57 рисунків. Список використаної літератури вміщує 112 найменувань. Роботу викладено на 170 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту складає 116 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано мету роботи, завдання та методи дослідження, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, а також зазначено місця апробації роботи.

У першому розділі проаналізовано аварії, які відбулися на трубопроводах. Їх основними причинами у більшості випадків є втомні та корозійно-втомні пошкодження. Інші причини (порушення правил експлуатації, помилки на стадії проектування, механічні пошкодження та пошкодження під час монтажних робіт, дефект труби тощо) складають 32% від загальної кількості аварій.

Щодо аварій на морських трубопроводах, то більшість з них (75%) спричинені дією хвиль та течій на їх розмитих ділянках. Також встановлено, що існуючі методики визначення напружено-деформованого стану підводних трубопроводів на розмитих ділянках не враховують сумарну дію навантажень від вертикальних та горизонтальних коливань.

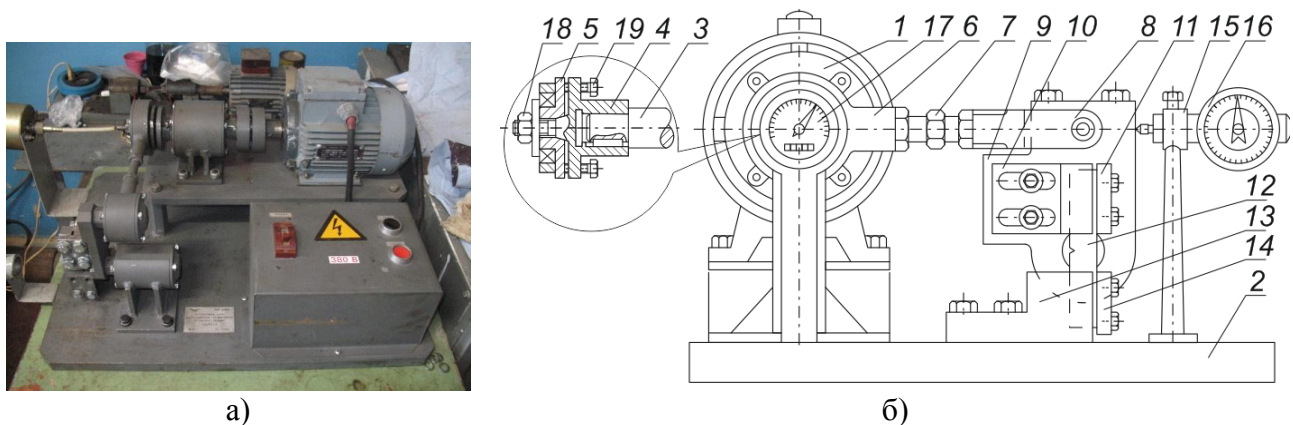
У трубопроводах також спостерігається пульсація тиску перекачуваного продукту, що призводить до інтенсифікації розвитку втомних та корозійно-втомних пошкоджень, і, як наслідок, до його руйнування.

На стінках трубопроводів у процесі їх експлуатації можуть виникнути такі дефекти: тріщини, корозійні та ерозійні пошкодження, подряпини, розшарування металу, вм'ятини, гофри. Для послаблення їх впливу на довговічність та подовження терміну експлуатації пошкоджених ділянок трубопроводів як закордоном, так і в Україні, використовують різноманітні способи: встановлення пластикових муфт; намотування пружної композиційної стрічки "Clock Spring"; застосування обтискної склопластикової муфти РСМ; використання сталевих муфт, (кільцевий зазор між муфтою та трубою заповнюється композитним матеріалом); застосування підсилюючої композиційної муфти (ПКМТ).

Аналіз цих способів виявив їх недосконалість у критичних ситуаціях, тому доцільним було розроблення нових способів та конструкцій бандажів (муфт) для забезпечення їх швидкого монтажу без застосування вогневих робіт.

Проте незалежно від способу ремонту трубопроводу, в процесі його подальшої експлуатації відбуватиметься перерозподіл напружень як у дефектній частині, так і у бандажі, що, у свою чергу, і продовжить термін його експлуатації.

У другому розділі наведено методику оцінки тріщиностійкості матеріалу елементів трубопроводів із використанням установки УДПТ-1 (рис. 1).

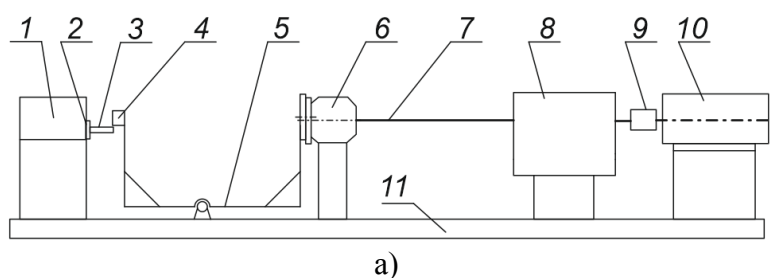


- а) – загальний вигляд; б) – схема установки;
- 1 – електродвигун; 2 – плита; 3 – вал; 4 – кривошип; 5 – ексцентрикова втулка; 6 – шатун;
7 – тяга; 8 – вилка; 9 – планшайба; 10 – рухомий затискач; 11 – планка;
12 – зразок для дослідження; 13 – нерухомий затискач; 14 – гайка; 15 – стійка;
16 – індикатор; 17 – лічильник; 18 – гайка; 19 – болти

Рисунок 1 – Установка для дослідження поширення тріщин

Застосування методики дає змогу отримати залежність кількості циклів навантажування від швидкості поширення тріщини, побудувати кінетичну діаграму втомного руйнування та отримати параметри тріщиностійкості, які можуть бути використані при прогнозуванні довговічності трубопроводу.

Описано методику для прогнозування довговічності та залишкового ресурсу за допомогою кінетичних діаграм втоми, яка дозволяє проводити розрахунки з урахуванням імовірності неруйнування, що є необхідною умовою як при плануванні періоду діагностики ділянок трубопроводів, так і при прийнятті рішення про їх ремонт чи заміну. За цією методикою необхідні дані визначалися за допомогою установки (рис. 2) для проведення втомних досліджень моделей-“вирізків”.



- а) – схема; б) – загальний вигляд;
- 1 – опора; 2 – затискні пластини; 3 – зразок; 4 – блок; 5 – важіль;
6 – навантажувальний блок з ексцентриситетом; 7 – кардан; 8 – редуктор;
9 – муфта; 10 – електродвигун; 11 – рама

Рисунок 2 – Установка для проведення втомних досліджень моделей-“вирізків”

На рисунку 3 наведено ескіз моделі-“вирізки” із ділянки трубопроводу, що містить локальний дефект.

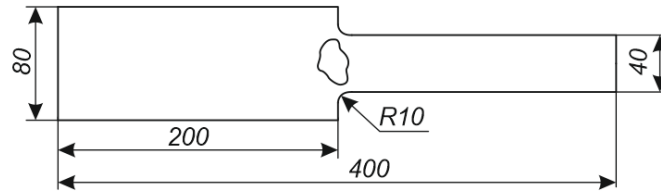


Рисунок 3 – Ескіз моделі - “вирізки”

Для випробування пошкодженої ділянки трубопроводів на статичну міцність розроблено методику для визначення величини напружень, що виникають у стінці труби, зміцненої бандажами. Для її реалізації застосовано установку УІ1/200 ЦК (рис 4).

Для оцінювання напружено-деформованого стану дослідних зразків та прогнозування їх довговічності за допомогою імітаційного моделювання розроблено алгоритм розрахунку, що базується на методі кінцевих елементів.



Рисунок 4 – Загальний вигляд установки УИ1/200 ЦК

В третьому розділі розроблено методику оцінювання фактичної навантаженості і прогнозування залишкового ресурсу підводного трубопроводу, яка враховує сумарну дію горизонтальних та вертикальних складових швидкості та прискорення частинок рідини. Для оцінювання впливу експлуатаційних факторів, що діють на розмитій ділянці підводного трубопроводу, використано теорію хвиль кінцевої амплітуди.

Вимушені коливання розмитої ділянки трубопроводу у вертикальній площині під дією морських хвиль описуються рівнянням:

$$EI \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{4} C_i \rho \pi D^2 \left(\frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} - a_y(t) \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} C_v \rho D \left(\frac{\partial y(z,t)}{\partial t} - v_y(z,t) \right) \left(\left| \frac{\partial y(z,t)}{\partial t} - v_y(z,t) \right| \right) + \frac{1}{2} C_y \rho D \left(\frac{\partial x(z,t)}{\partial t} - v_x(t) \right)^2 = 0 ,$$

де E – модуль пружності матеріалу, Па; I – момент інерції поперечного перерізу труби, м^4 ; m – маса труб з урахуванням ваги транспортованого продукту, кг; ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_x і v_y – складові швидкості частинок рідини, $\text{м}/\text{с}$; a_x і a_y – складові прискорення частинок рідини, $\text{м}/\text{с}^2$; D – зовнішній діаметр трубопроводу, м; C_i , C_v – відповідно інерційний та швидкісний коефіцієнти; C_y – підйомний коефіцієнт.

У формулі (1) введено доданок, що враховує дію виштовхувальної сили води на підводний трубопровід.

Напруження у трубопроводі зводяться до максимальних (рис. 5) з умови одержання максимальних амплітуд для найбільш руйнівній ступені блоку навантаження:

$$\sigma_{азв} = \sigma_{ax} \cos(\alpha) + \sigma_{ay} \sin(\alpha), \quad (2)$$

де $\sigma_{азв}$ – зведене амплітудне напруження; σ_{ax} , σ_{ay} – амплітудне напруження у горизонтальній та вертикальній площині відповідно; α – кут між горизонталлю та вектором зведеного амплітудного напруження.

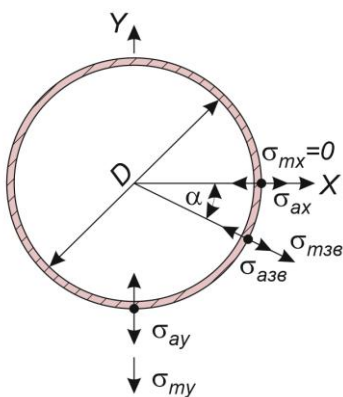
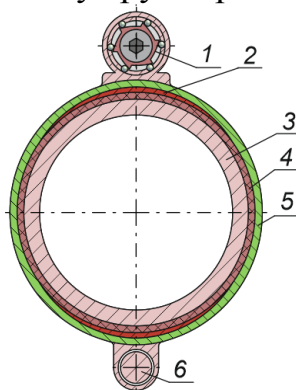


Рисунок 5 – Розрахункова схема зведених напружень

Застосування розробленої методики оцінювання параметрів циклічного навантажування розмитій ділянці підводного трубопроводу з урахуванням впливу ураганних хвиль та виштовхувальної сили води дає змогу розраховувати навантаження і точніше оцінювати довговічність.

Одним із способів підвищення довговічності дефектних ділянок трубопроводу, як зазначалося, є встановлення бандажу на його зовнішній поверхні. Тому для зміцнення дефектних ділянок трубопроводів розроблено конструкції пристроїв, зображених на рисунках 6 та 7.

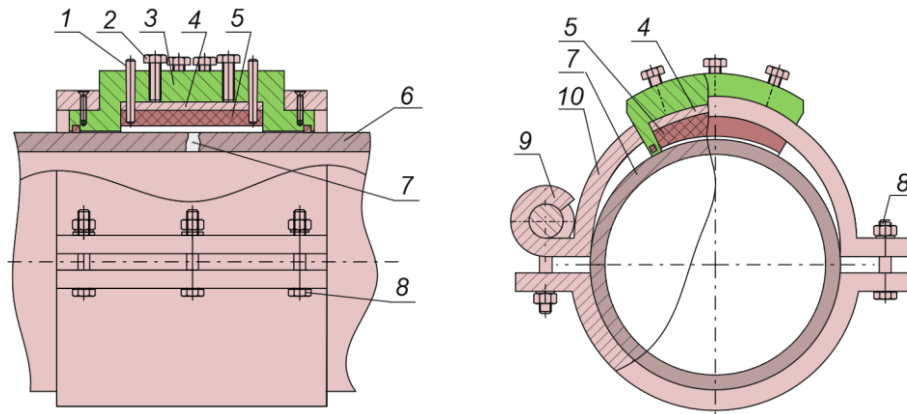
Особливістю пристрою (рис. 6) є здатність забезпечувати точне значення розрахункової та контрольної сил за рахунок використання протекторної серпоподібної прокладки 2, що рівномірно обтискає дефектну ділянку трубопроводу за периметром.



- 1 – храповий механізм; 2 – протекторна серпоподібна прокладка; 3 – дефектна ділянка труби; 4 – сталеві підкладки; 5 – металева стрічка; 6 – поворотний механізм

Рисунок 6 – Пристрій для герметизації та зміцнення трубопроводу

Пристрій для герметизації наскрізних дефектів (рис. 7) надійно фіксується на трубопроводі та підвищує безпеку проведення робіт з усунення витoku вибухонебезпечного продукту, що транспортується. Гвинтовий притискний механізм, створюючи активне притискне силове поле на пружне ущільнення 5, надійно герметизує наскрізний дефект 7 у трубопроводі, а можливість зміни положення силових гвинтів 2 цього механізму дає змогу герметизувати дефекти різноманітної форми.



- 1 – напрямна; 2 – гвинти; 3 – корпус; 4 – металева притискна пластина;
 5 – пружне ущільнення; 6 – трубопровід; 7 – дефект; 8 – болтові з'єднання;
 9 – шарнірний вузол; 10 – хомут

Рисунок 7 – Пристрій для герметизації наскрізних дефектів трубопроводу

Застосування запропонованих пристроїв дає змогу подовжити термін експлуатації дефектних ділянок трубопроводів без зупинки роботи та без проведення монтажних вогневих робіт.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження швидкості поширення тріщини матеріалу трубопроводу під дією циклічного навантаження. В результаті отримано залежність глибини тріщини від кількості циклів навантажування (рис. 8) при різній величині амплітуди a (0,79; 0,9; 1,07; 1,2; 1,65 мм).

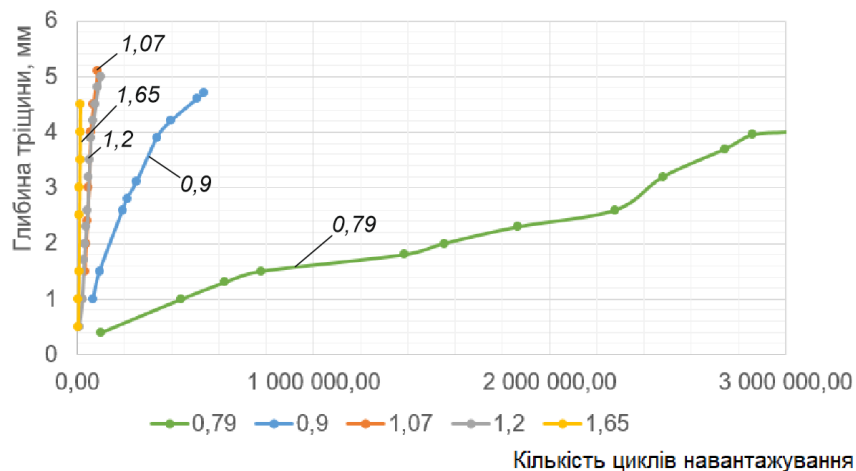


Рисунок 8 – Залежність глибини тріщини від кількості циклів навантажування

Для визначення швидкості поширення втомної тріщини використали відому залежність $V = \Delta l / \Delta N$. Відповідне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) для конкретної геометрії зразка визначають за формулою:

$$K = \frac{1,35 \cdot G \cdot \theta \cdot x_0^{3/2}}{y_0}, \quad (3)$$

де G – модуль зсуву, МПа ($G = 8 \cdot 10^4$, МПа); x_0 і y_0 – геометричні розміри зразка, м; θ – кут повороту кінців зразка, рад.

Отримано значення КІН та швидкості поширення тріщини від амплітуд навантажування:

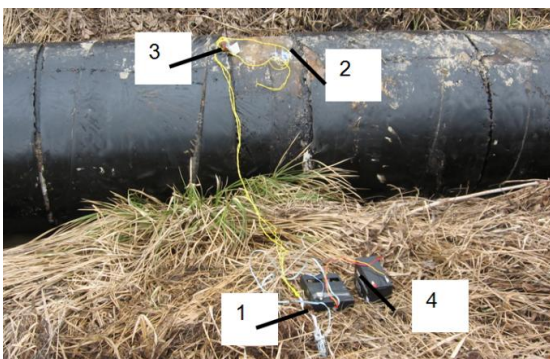
- при $a = 0,79$ мм: $K = 14,23$ МПа м^{1/2}; $V = 13,22 \cdot 10^{-10}$ м/цикл;
- при $a = 0,90$ мм: $K = 16,22$ МПа м^{1/2}; $V = 10,12 \cdot 10^{-9}$ м/цикл;
- при $a = 1,07$ мм: $K = 19,27$ МПа м^{1/2}; $V = 61,94 \cdot 10^{-9}$ м/цикл;
- при $a = 1,20$ мм: $K = 21,62$ МПа м^{1/2}; $V = 57,78 \cdot 10^{-9}$ м/цикл;
- при $a = 1,65$ мм: $K = 29,73$ МПа м^{1/2}; $V = 29,98 \cdot 10^{-8}$ м/цикл.

За результатами проведених досліджень визначено параметри тріщиностійкості для матеріалу труби ($C=3,5 \cdot 10^{-16}$ м⁷/Н⁴, $n=6,88$, $K^*=23,65$ МПа м^{1/2}), які можуть бути використані при прогнозуванні довговічності.

Для визначення міцності дефектної ділянки трубопроводу “Дружба” ПАТ “Укртранснафта” після її ремонту шляхом бандажування (рис. 9) проведено експериментальні дослідження за допомогою установки УИ1/200 ЦК. До досліджуваної труби (матеріал – сталь 17ГС) діаметром 720 мм із товщиною стінки 9 мм, було приварено еліптичні днища та різьбові з’єднувальні штуцери для подачі води.

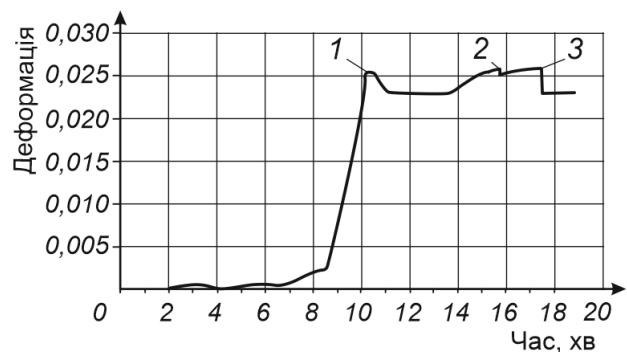
На рисунку 9 зображено розміщення тензодавачів на трубі та під’єднання їх до АЦП. На рисунку 10 – отриманий графік деформацій тензодавача, що характеризує процес руйнування спочатку бандажу, а потім і самої труби (рис.11).

Руйнування дослідного зразка труби відбулося за тиску 14 МПа.



1 – АЦП; 2 – тензодавач; 3 – тензометричний міст; 4 – акумулятор

Рисунок 9 – Розміщення тензодавачів на трубі та під’єднання їх до АЦП



1, 2 – відриву бандажу;
3 – руйнування труби

Рисунок 10 – Графік деформації



Рисунок 11 – Зруйнована труба

Розраховані аналітично величини напружень (577 МПа) в стінці труби, виявились вищими від нормативного значення границі міцності для сталі 17ГС (530 МПа). Отже, використання ремонтних муфт (бандажів) підвищує міцність нафтопроводу та забезпечує необхідну надійність.

Для більш точного та ґрунтовного аналізу надійності та довговічності нафтопроводу проведено дослідження його дефектних ділянок. Для цього із зруйнованої труби було вирізано зразки з локальними ерозійними дефектами внутрішньої поверхні (рис. 12).

Для визначення профілю дефекту зразка труби застосовано розроблений стенд, що містить закріплений на пересувному штативі індуктивний давач малих переміщень, який під'єднано до комп'ютера через АЦП (рис. 13).



Рисунок 12 – Зразок з локальними ерозійними дефекти внутрішньої поверхні труби



Рисунок 13 – Стенд для сканування дефектів внутрішньої поверхні зразка

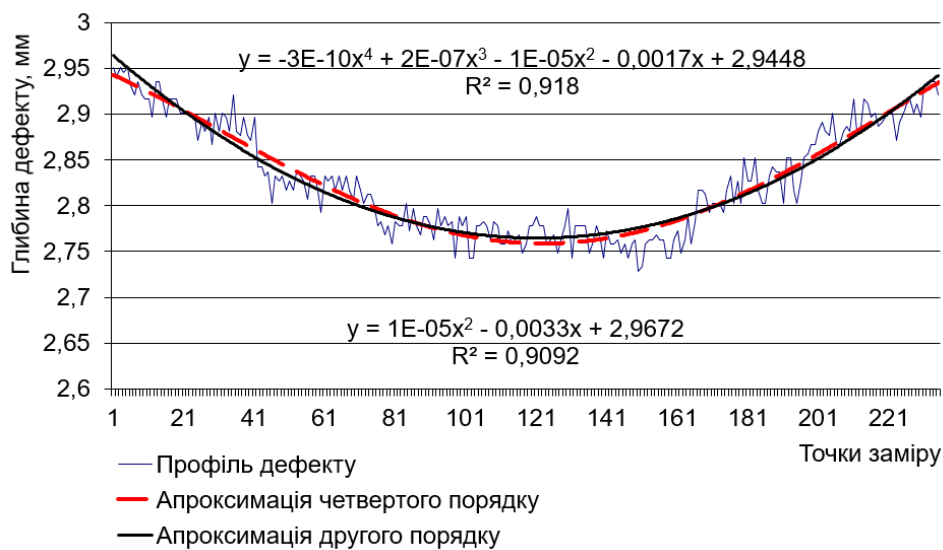


Рисунок 14 – Профіль дефекту моделі-"вирізки"



Рисунок 15 – Зруйновані зразки

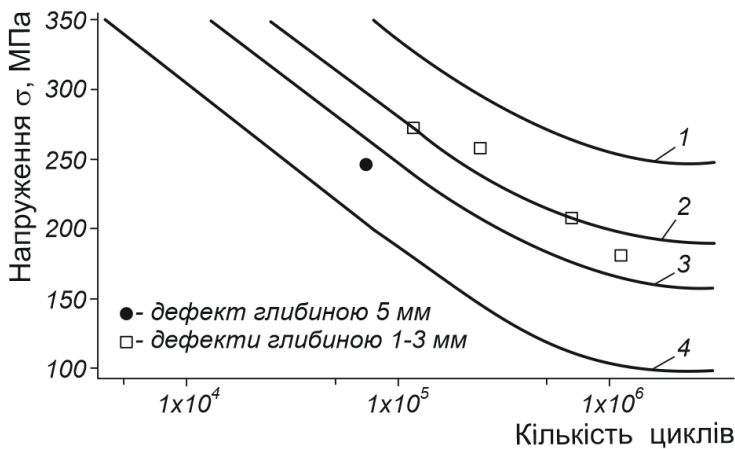
Результати сканування дефекту опрацьовувались програмно і визначались його фактичні розміри. На рисунку 14 наведено профіль дефекту моделі-"вирізки" з апроксимаціями.

Подальші випробовування зразків проводилися на установці втомних досліджень моделей-"вирізків". На рисунку 15 зображено зруйновані зразки.

Для побудови кінетичних кривих використано рівняння:

$$N = \frac{N_0 \sigma_{rR}}{\sigma} \ln \left[1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{\sigma - \sigma_{rR}}{V_0}\right) - 1} \right], \quad (4)$$

де N – кількість циклів до руйнування деталі; N_0 – параметр, який характеризує число циклів до точки нижнього перегину кривої втоми; σ_{rR} – границя витривалості; σ – максимальне напруження циклу регулярного навантаження з постійним значенням коефіцієнта асиметрії; V_0 – параметр з розмірністю напруження.



1 – медіанна крива втоми труби без дефектів;
2 – медіанна крива втоми дослідних зразків з дефектами 1-3 мм; 3 – медіанна крива втоми труби з дефектом 5 мм; 4 – крива втоми труби з дефектом із ймовірністю неруйнування 0,9
Рисунок 16 – Криві втоми дослідних зразків

За отриманими даними випробовувань побудовано криві втоми сталі 17ГС для зразків з різними параметрами дефектів (рис. 16).

Однією з невирішених задач забезпечення надійності магістральних газопроводів є визначення ресурсу їх лінійних частин з урахуванням пульсацій тиску. Для аналізу взято дані, що відносяться до діючого газопроводу (рис. 17). Пульсації внутрішнього тиску за рік апроксимовані полігармонічним процесом:

$$P(t) = 40 + 2\sin(\pi t / 1,52) + 3\sin(\pi t / 3,56) + 5\sin(\pi t / 18,2) + 7\sin(\pi t / 120). \quad (5)$$

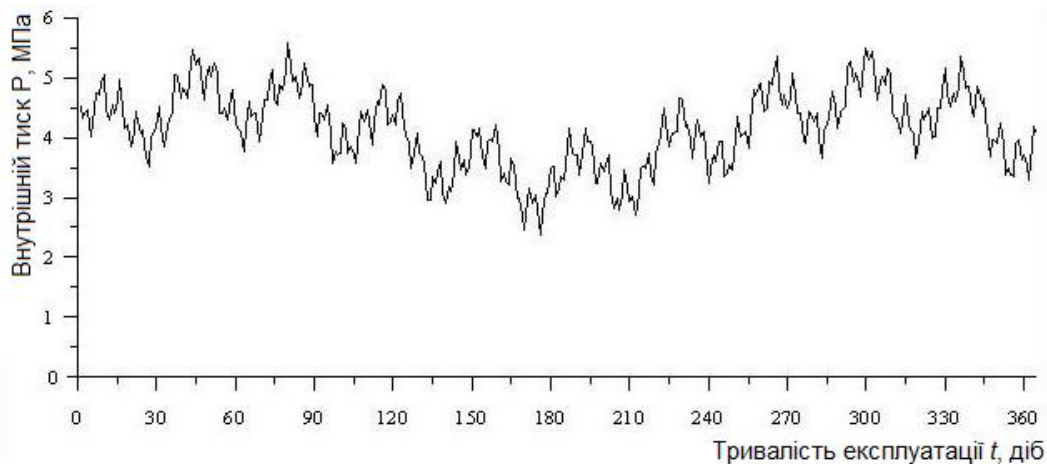


Рисунок 17 – Апроксимована залежність тиску газу в газопроводі протягом року експлуатації

Частотний аналіз цих даних дозволив виявити декілька характерних внутрішніх циклів з періодами, орієнтовно рівними 3, 7, 36 та 240 діб. Цим підтверджується, що інтервальні оцінки середнього, мінімального і максимального значень внутрішнього тиску відрізняються за періоди експлуатації. Це ж справедливо стосовно амплітуд внутрішніх циклів при збереженні їх стабільних періодів.

Враховуючи товщину стінок та діаметр трубопроводу, визначено величини кільцевих напружень та проведено схематизацію пульсацій тиску за методом вкладених циклів. Усі цикли напружень приведено до еквівалентних за пошкоджуючою дією симетричних (рис. 18).

Для визначення параметрів рівнянь кривої втоми і функції нормального розподілу значень границі витривалості використано результати випробувань на втому трубопроводу, виконані В. В. Харіоновським. Проведено експериментальні дослідження моделей – “вирізок” з газопроводу (діаметр – 820 мм, товщина стінки 8 мм (матеріал – сталь 19ГС) як з локальними дефектами, так і без них.

За допомогою створеної в середовищі Maple програми розрахунку параметрів та побудови кінетичних кривих втоми з різною імовірністю неруйнування виконано розрахунки середньоквадратичного відхилення границі витривалості газопроводу.

Результати проведених досліджень, зображені на рисунку 19, корелюються з результатами, отриманими В. В. Харіоновським, що свідчить про доцільність використання моделей-“вирізків” для оцінки залишкового ресурсу пошкоджених ділянок магістральних газопроводів. Встановлено, що за даних параметрів дефектів і навантаженості дефект не призведе до руйнування. Однак зупинка роботи газопроводу (щонайменше раз на рік експлуатації), значно скоротить залишковий ресурс.

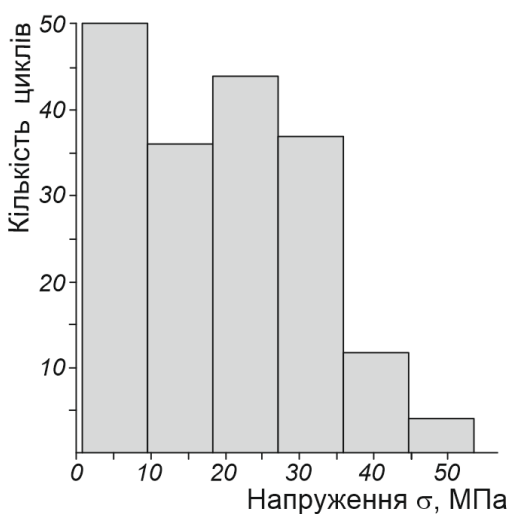
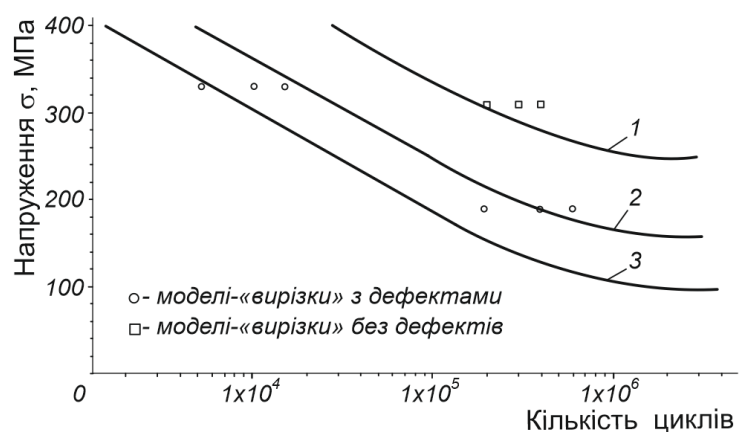


Рисунок 18 – Гістограма розподілу амплітуд еквівалентних напружень



1 – медіанна крива втоми гладкої труби без дефектів;
2 – медіанна крива втоми труби з дефектом;
3 – крива втоми труби з дефектом з імовірністю неруйнування 0,9

Рисунок 19 – Імовірнісні криві втоми МГП

Метод кінцевих елементів на сьогодні набув широкого застосування при розв'язуванні задач механіки твердого тіла за допомогою числових алгоритмів. Але при використанні даного методу, як і будь-якої числової апроксимації, питання відповідності між розрахунковою моделлю й реальним об'єктом є основним. З метою налаштування параметрів програми ANSYS Workbench, що буде застосована при дослідженні впливу бандажу на дефектну ділянку трубопроводу, проведено верифікацію результатів досліджень моделей-«вирізок», отриманих за допомогою цієї програми та натурних випробовувань.

Для одержання кількості циклів до руйнування досліджуваної моделі-«вирізки» у програмі ANSYS Workbench застосовано її модуль Fatigue Tool. Схема навантаження моделі-«вирізки» при використанні цього модуля аналогічна схемі навантажень при натурних дослідженнях.

Розбіжність між результатами імітаційного моделювання (77131 циклів) (рис. 20) та експериментальними даними (70 500 циклів) не перевищили 10 %.

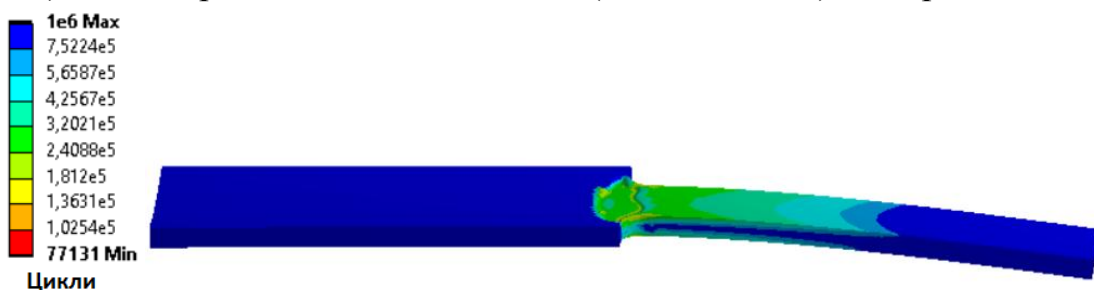
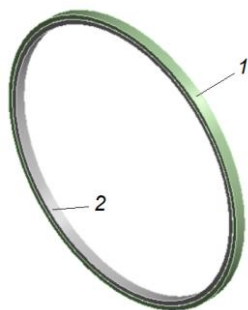


Рисунок 20 – Результати визначення кількості циклів до руйнування

Оскільки найбільш поширеним способом ремонту трубопроводів є встановлення бандажів, то проведено імітаційне дослідження впливу бандажу на напружено-деформований стан дефектної ділянки труби. Як приклад розглядалася труба діаметром 530 мм з товщиною стінки 9 мм з бандажем такої ж товщини (рис. 21). Для спрощення розрахунку довжину труби та бандажу взято рівними 30 мм. Для імітації дефекту труби (типу тріщина) (рис. 22) застосовано інструмент програми Ansys – "Fracture". Сітка кінцевих елементів досліджуваної моделі вказана на рисунку 23.



1 – трубопровід; 2 – бандаж
Рисунок 21 – Модель для дослідження

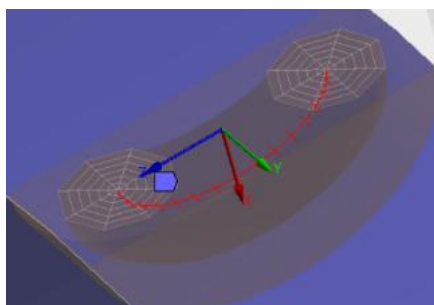


Рисунок 22 – Модель тріщини на зовнішній поверхні трубопроводу

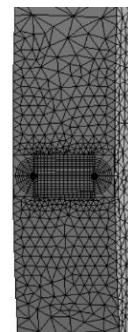


Рисунок 23 – Сітка кінцевих елементів

Оскільки експлуатація трубопроводу супроводжується зміною робочого тиску, то для визначення кількості циклів до руйнування дефектної ділянки задано його зміну впродовж року (рис. 17).

На рисунках 24 та 25 наведено розподіл еквівалентних напружень і кількість циклів до руйнування для дефектної ділянки труби без бандажу, а на рисунках 26 та 27 – з врахуванням впливу бандажу.

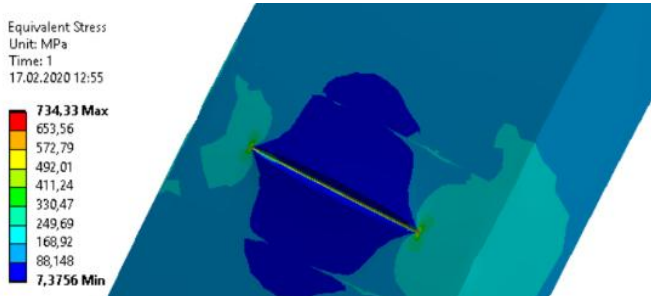


Рисунок 24 – Розподіл еквівалентних напружень у зоні тріщини стінки трубопроводу (без врахування дії бандажу)

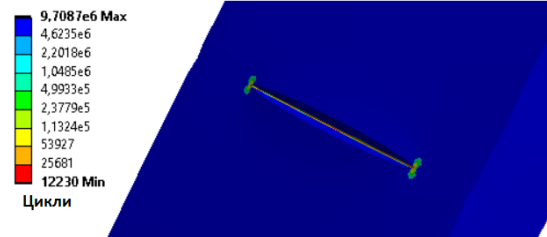


Рисунок 25 – Кількість циклів до руйнування (без врахування дії бандажу)

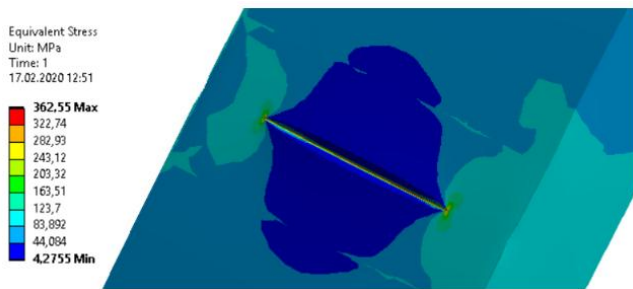


Рисунок 26 – Розподіл еквівалентних напружень у зоні тріщини стінки трубопроводу (з врахування дії бандажу)

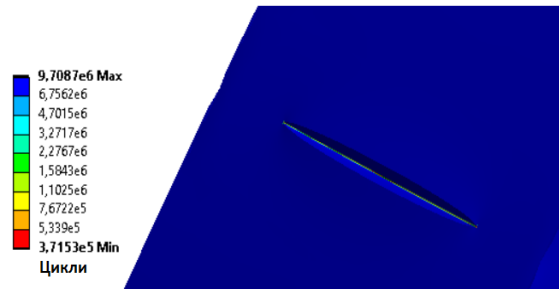


Рисунок 27 – Кількість циклів до руйнування (з врахуванням дії бандажу)

Для зручності перегляду отриманих результатів відображення деформацій на рисунках 24-27 збільшено у 170 разів від фактичних, а бандаж на рисунках 26 та 27 – приховано.

Встановлено, що значення еквівалентних напружень у стінці труби і у зоні дефекту із врахуванням впливу пульсацій тиску при встановленні бандажу знижується майже удвічі. При цьому кількість циклів навантаження до руйнування без бандажу становить 12230, а із врахуванням дії бандажу – 371530, що призводить до збільшення довговічності у 30 разів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено науково-практичну задачу, яка полягає у прогнозуванні втомної та корозійно-втомної довговічності ділянок трубопроводів шляхом врахування експлуатаційних факторів та розроблення заходів для підвищення терміну їх експлуатації, а саме:

1. Проаналізовано умови експлуатації магістральних трубопроводів та встановлено, що основною причиною їх руйнування є втомні та корозійно-втомні пошкодження. Особливості експлуатації підводних трубопроводів характеризуються появою ряду небезпечних факторів – виникнення розмитих ділянок та збільшення вібраційного навантаження від дії коливань морських хвиль. Встановлено, що існуючі на сьогодні методи прогнозування довговічності трубопроводів вимагають удосконалення, оскільки не можуть повною мірою врахувати усі експлуатаційні фактори.

2. Сформовано комплекс методів та методик (для дослідження тріщиностійкості; прогнозування довговічності; імітаційного моделювання; експериментального дослідження натурних взірців елементів трубопроводів), які дали змогу вирішити поставлені завдання досліджень.

3. З врахуванням положень теорії хвиль кінцевої амплітуди розроблено методику оцінки фактичної навантаженості і прогнозування залишкового ресурсу підводного трубопроводу (впроваджена у ДАТ "Чорноморнафтогаз"), яка враховує сумарну дію горизонтальних та вертикальних складових швидкості та прискорення частинок рідини і дію її виштовхувальної сили. Це дало змогу розраховувати навантаження на підводний трубопровід під час коливних процесів і тим самим точніше оцінити його довговічність.

4. На основі проведених експериментальних досліджень швидкості поширення тріщини матеріалу трубопроводу при дії циклічного навантаження отримано параметри тріщиностійкості для матеріалу труб ($n=6,88$, $K^*=23,65$ МПа м^{1/2}), які можуть бути використані при прогнозуванні довговічності. Експериментальні дослідження натурального зразка (частини трубопроводу "Дружба") із встановленими бандажами показали, що напруження, яке виникає у стінці дефектної труби зі встановленими зовні бандажами, в момент руйнування є більшим на 47 МПа від границі міцності сталі 17ГС. За результатами випробувань моделей – "вирізок" на втомну довговічність побудовано ймовірнісні криві втоми із отриманими із них значеннями ймовірності неруйнування. Для прогнозування довговічності трубопроводу побудовано криві втоми, що враховують пульсації тиску перекачуваного продукту. Розраховано залишковий ресурс пошкодженої ділянки газопроводу та встановлено, що за досліджуваних параметрів дефектів і їх навантаженості не несе загрози руйнування. За допомогою імітаційного моделювання встановлено, що кількість циклів до руйнування дефектної ділянки трубопроводу (із врахуванням впливу пульсації тиску) складає 12230, а при застосуванні бандажу – 371530.

5. На основі результатів проведених досліджень розроблено: пристрій для герметизації та зміцнення трубопроводу (Патент України на винахід № 100455); конструкцію пристрою для герметизації наскрізних дефектів трубопроводу (Патент України на корисну модель № 89225), яку випробувано під час ліквідації витоку газу з газопроводу "Пасічна-Тисмениця".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Закордонні видання

1. Дейнега Р. О., Івасів В. М., Михайлюк В. В., Фафлей О. Я. Дослідження впливу бандажу на дефектну ділянку трубопроводу. *Восточно Европейский Научный Журнал. Технические науки*. 2020. №54(2). С. 55-63. ([Index Copernicus](#)).

Фахові видання України

2. Івасів В. М., Артими В. І., Дейнега Р. О. Прогнозування залишкового ресурсу магістральних трубопроводів: проблеми і перспективи. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2007. № 3. С.102-108.

3. Дейнега Р. О. Розрахунок довговічності підводних трубопроводів з урахуванням впливу вертикальної складової хвильового навантаження. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 4 (26). С. 78-83.

4. Дейнега Р. О., Артими В. І., Івасів О. В., Василюк В. М., Яновський С. Р., Басараб Р. М. Експериментальна оцінка підсилюючої здатності зварних муфт пошкоджених труб магістрального нафтопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №3(40). С.70-75.

5. Івасів В. М., Дейнега Р. О., Фафлей О. Я., Михайлюк В. В., Буй В. В., Говдяк Р. М. Дослідження впливу корозійних дефектів на довговічність магістральних нафтопроводів. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 2 (26). С. 67-74. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2\(34\)-67-74](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2(34)-67-74).

Патенти

6. Патент № 100455, Україна, F16L 55/16. Пристрій для герметизації та зміцнення трубопроводу / Крижанівський Є. І., Івасів В. М., Ногач М. М., Слободян В. І., Дейнега Р. О. № a201106740; Заявл. 30.05.2011; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. 4 с.

7. Патент № 89225, Україна, F16L 55/00. Пристрій для герметизації наскрізних дефектів трубопроводу / Крижанівський Є. І., Слободян В. І., Джус А. П., Івасів О. В., Ногач М. М., Кутенець В. О., Басараб Р. М., Дейнега Р. О. № u201313777; Заявл. 27.11.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. 4 с.

Матеріали конференцій

8. Івасів В. М., Артими В. І., Дейнега Р. О., Козак О. М., Татаренков О. Д. Оцінка ресурсу морських трубопроводів засобами комп'ютерного моделювання. *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-*

2005 : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 2015 р. Харків "ХАІ": 2005. С. 143-144.

9. Івасів В. М., Артım В. І., Дейнега Р. О., Козак О. М., Татаренков О. Д. Коливання морських трубопроводів під впливом хвиль. *Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития. Сборник трудов научно-практической конференции. Том 9. Транспорт, физика и математика.* Одесса: Черноморье, 2005. С. 33-37.

10. Івасів В. М., Артım В. І., Гладун В. В., Дейнега Р. О. Модель багатоциклового корозійно-втомного пошкодження деталей машин. *Механічна втома металів. Під ред. Троценка В.Т. Праці колоквиуму.* 2006. Тернопіль. С. 198-203.

11. Івасів В. М., Артım В. І., Дейнега Р. О., Татаренков О. Д. Оцінка фактичної навантаженості та довговічності підводного трубопроводу під впливом хвиль. *Проблеми нафтогазової промисловості. Збірник наукових праць.* Випуск 3. К: 2006. С. 284-293.

12. Івасів В. М., Артım В. І., Дейнега Р. О. Прогнозування залишкового ресурсу магістральних трубопроводів: проблеми і перспективи. Міжнародна науково-технічна конференція *Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці "ІФНТУНГ-40"*. (м. Івано-Франківськ, 16-20 квітня 2007р.) Івано-Франківськ, 2007. С. 89.

13. Дейнега, Р. О. Артım В.І., Рачкевич Р.В., Татаренков О.Д. Напружено-деформований стан трубопроводів в умовах непроектних морських ділянок. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених. *Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії.* (м. Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008р.) Івано-Франківськ. С. 48.

14. Івасів В. М., Артım В. І., Дейнега Р. О., Рачкевич Р. В. Прогнозування залишкового ресурсу газопроводу з урахуванням пульсацій тиску. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій.* Львів. 2009. С. 624-629.

15. Івасів В. М., Артım Л. Е., Дейнега Р. А., Басараб Р. Н. Оценка остаточного ресурса участка трубопровода с локальными коррозионными дефектами. *Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта* : материалы VII междунар. науч.-техн. конф., (Новополоцк, 22 – 25 ноября 2011 г.), Новополоцк: ПГУ, 2011. С. 70

16. Слободян В. И., Івасів В. М., Артım В. И., Дейнега Р. А. Обеспечение надежности газопровода после замены поврежденных участков с помощью исследования моделей - вырезок. *Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта* : материалы VII междунар. науч.-техн. конф., (Новополоцк, 22 – 25 ноября 2011 г.) Новополоцк: ПГУ, 2011. С. 178

17. Дейнега Р. О., Артım В. І., Івасів О. В., Василюк В. М., Яновський С. Р., Басараб Р. М. Експериментальна оцінка міцності труби магістрального нафтопроводу зі зварними муфтами. *Нафтогазова енергетика – 2011* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011р.) Івано-Франківськ, 2011. С. 83.

18. Василюк В.М., Яновський С.Р., Артим В.І., Дейнега Р.О., Івасів О.В., Басараб Р.М. Дослідження впливу корозійних дефектів на довговічність магістральних нафтопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу (ППТНГ-12)* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (м. Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012 р.) Івано-Франківськ, 2012. С. 294-296.

19. Дейнега Р.О. Ремонт пошкоджених ділянок трубопроводу бандажними муфтами. Міжнародна науково-технічна конференція. *Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу ІМ-2016* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р.) Івано-Франківськ, 2016. С. 219-223.

20. Івасів В.М., Дейнега Р.О., Михайлюк В.В. Оцінка залишкового ресурсу труби магістрального нафтопроводу з корозійними дефектами. *Актуальні задачі сучасних технологій* : зб. тез доп., (м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р.) Тернопіль, 2016. С. 40-41.

21. Івасів В.М., Дейнега Р.О. Експериментальна оцінка відремонтованої ділянки магістрального нафтопроводу : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., *Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018*. (м. Івано-Франківськ, 24-27 квітня 2018р.) Івано-Франківськ, 2018. С. 263-269.

АНОТАЦІЯ

Дейнега Р. О. Прогнозування довговічності нафтогазопроводів з врахуванням експлуатаційних факторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2021.

Розроблено математичну модель впливу морських хвиль на розміту ділянку підводного трубопроводу; досліджено коливання розмітої ділянки підводного трубопроводу під впливом сумарного хвильового навантаження у двох площинах; оцінено довговічність трубопроводу з урахуванням: висоти хвиль та їх циклічності; врахуванням пульсацій перекачуваного продукту; розроблено конструкції бандажів для підвищення терміну експлуатації дефектних ділянок трубопроводів; досліджено напружено-деформований стан та встановлено кількість циклів до руйнування дефектної ділянки трубопроводу, зміцненої бандажем.

Ключові слова: нафтогазопровід, морські хвилі, розміта ділянка трубопроводу, дефект, бандаж, напружено-деформований стан, втомна міцність, циклічне навантаження, тріщиностійкість, імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дейнега Р. А. Прогнозирование долговечности нефтегазопроводов с учетом эксплуатационных факторов. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.15.13 - трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2021.

Разработана математическая модель влияния морских волн на размывтый участок подводного трубопровода; исследованы колебания размывтого участка подводного трубопровода под воздействием суммарной волновой нагрузки в двух плоскостях; оценено долговечность трубопровода с учетом: высоты волн и их цикличности; пульсаций перекачиваемой продукта; разработаны конструкции бандажей для повышения срока эксплуатации дефектных участков трубопроводов; исследовано напряженно-деформированное состояние и установлено количество циклов до разрушения дефектного участка трубопровода усиленного бандажом.

Ключевые слова: нефтегазопровод, морские волны, размывтый участок трубопровода, дефект, бандаж, напряженно-деформированное состояние, усталостная прочность, циклические нагрузки, трещиностойкость, имитационное моделирование.

ABSTRACT

Deineha R. O. Prediction of Durability of Oil and Gas Pipelines with the Account of Operational Factors. – Qualification Scientific Paper with the Manuscript Copyright. Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in Specialty 05.15.13 – Pipeline Transport, Oil and Gas Storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

The thesis is devoted to the issues of predicting the fatigue and corrosion fatigue life of pipeline sections by taking into account operational factors and developing measures to increase their service life.

The paper analyzes operating conditions of main pipelines and establishes the primary reason for their destruction – presence of fatigue and corrosion fatigue damages. The peculiarities of operation of underwater pipelines are characterized by a number of the following hazardous factors: formation of eroded sections and increase in the vibration load exerted by wave oscillations. The available methods for assessing the stress-strain state and influence of pulsations of the pumped product internal pressure as well as the methods for repairing damaged pipeline sections have been analyzed. It has been determined that the methods used today require improvement, since they do not fully take into account all the operational factors that affect the pipeline service life.

A set of methods has been formed to study crack resistance, predict durability and carry out simulation modeling and experimental studies of full-scale samples of different pipeline elements.

In order to assess the influence of the operational factors affecting underwater pipeline eroded sections, the theory of waves of finite amplitude has been considered. The methods for assessing the actual loading and predicting the underwater pipeline residual service life, which take into account the total action of the horizontal and vertical components of the velocity and acceleration of fluid particles, have been developed on the basis of this theory. The influence of sea waves on the underwater pipeline eroded section oscillations, in particular, the action of the buoyancy force of water, has been taken into account. It has made it possible to more accurately calculate the load on the underwater pipeline during oscillatory processes and more precisely estimate its durability. The designs of the devices for sealing and strengthening defective pipeline sections have been proposed and developed.

The parameters of crack resistance $C=3.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^7/\text{N}^4$, $n=6.88$, $K^*=23.65 \text{ MPa m}^{1/2}$, which can be used when predicting durability, have been obtained on the basis of the experimental studies of the velocity of crack propagation of the pipeline material under the cyclic load action. The experimental studies of the full-scale sample (section of the Druzhba pipeline) with the bandages installed on defective areas have proven the effectiveness of their application. The models of this pipeline “cutouts” that contain local defects, the parameters of which were determined using the developed stand, have been studied. The probability fatigue curves have been constructed on the basis of the study results. The value of the non-destruction probability has been obtained. In order to predict pipeline durability, the fatigue curves that take into account pumped product pressure pulsations have been constructed. The residual service life of the damaged pipeline section has been calculated. It has been established that the use of the bandage on the defective pipeline section reduces the values of the stresses occurring both in the defect zone and in the wall by almost two times. As far as the number of cycles before destruction is concerned (taking into account the influence of pressure pulsations during the year), they increase from 12,230 to 371,530 when using the bandage.

The results of the conducted experimental studies confirm the theoretical studies. The patent for an invention and patent for a useful model of the developed devices for pipeline sealing and strengthening have been obtained. The developed design of the bandage has been used for gas leak elimination on the Pasichna-Tysmenytsia gas pipeline (it is confirmed by the Act of the Bohorodchany Linear Production Department of Main Gas Pipelines). The methods for assessing the actual loading and forecasting the residual service life of the underwater pipeline have been implemented at Chornomornaftohaz, SJSC.

Key words: oil and gas pipeline, sea waves, eroded pipeline section, defect, bandage, stress-strain state, fatigue strength, cyclic load, crack resistance, simulation modeling.