

622.691.4  
Н42

**Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу**

**Недбайло Олексій Миколайович**

**УДК 621. 643 (088)**

**МЕХАНІКА ШЕЛЬФОВИХ НАФТОГАЗОПРОВІДІВ  
ПРИ УКЛАДАННІ, РЕМОНТІ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**Спеціальність 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища**

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

*Недбайло*

**Івано-Франківськ - 2004**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Херсонському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України



доктор технічних наук, професор **Кравцов Віктор Іванович**, Херсонський державний технічний університет, професор кафедри основ конструювання

доктор технічних наук, професор **Тимків Дмитро Федорович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри прикладної математики,

кандидат технічних наук, доцент **Білобран Богдан Степанович**, Національний університет "Львівська політехніка", доцент кафедри опору матеріалів

#### Провідна установа -

ВПВ Всеукраїнський науковий і проектний інститут транспорту газу "ВНППТРАНСПГАЗ", м. Київ

Захист відбудеться "21" травня 2004 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатськ

З дисерт  
Франківсь  
76019, Укр

отеці Івано-  
за адресою:

Авторефер

Вчений се  
вченої рад

орнута О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з пріоритетів НАК “Нафтогаз України” визначено освоєння ресурсів Чорного та Азовського морів. В Україні роботи в цьому напрямку набувають особливо важливого значення в зв'язку з гострою необхідністю пошуку власних енергоносіїв, що добуваються на морському шельфі. Дослідження і експлуатація шельфів нерозривно пов'язані з розробкою і створенням нових типів конструкцій для транспортування продуктів. Цю задачу здебільшого здійснюють за допомогою будівництва магістральних нафтогазопроводів. Статистичні дані свідчать, що близько 5% довжини всіх трубопроводів, які будуються, складає сумарна протяжність підводних переходів. Підводні переходи магістральних трубопроводів є найбільш відповідальними ділянками лінійної частини, до їх надійності пред'являють підвищені вимоги. Зростання інтересу в Україні до робіт, що проводяться на шельфах морів з метою видобутку сировинних і енергетичних ресурсів, свідчить про необхідність створення і розробки універсальних і алгоритмічних методів розрахунку трубопроводів, які дозволяють враховувати істотну просторову викривленість осей і глибoku нелінійність розв'язальних рівнянь. Міра деталізування питань у проектуванні і дослідженні підводно-технічних трубопровідних комплексів підтверджує значний досвід, накопичений в області розробки цих технічних засобів. У той же час практично немає глибоких досліджень з питання щодо визначення напружено-деформованого стану таких конструкцій із згинальною та крутильною жорсткістю з урахуванням повного вектора просторових навантажень і перемішень, викликаних впливом морських факторів, які відрізнялися б алгоритмічністю і адаптацією до сучасних обчислювальних машин. Приведені в літературі результати розв'язання таких задач, як правило, відносяться до плоского випадку і відрізняються простотою кінематичних співвідношень і малим порядком розв'язальних рівнянь. Просторові ж задачі розв'язуються методами, які не відрізняються достатньою точністю й алгоритмічністю. В багатьох роботах розглядаються задачі тільки в лінійній постановці, однак в дійсності деформування підводних трубопроводів при технологічних операціях як правило нелінійне. У зв'язку з цим дослідження щодо визначення механічних характеристик трубопроводу в умовах шельфу при укладанні, ремонті і експлуатації є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота узагальнює результати досліджень, виконаних автором у рамках наступних координаційних планів:

1. Загальний план наукових досліджень з розробки методів числового розрахунку просторового пружного нелінійного деформування трубопроводів в умовах шельфа, проведених на кафедрі основ конструювання Херсонського державного технічного університету.

НТБ  
ЮНТУНГ



an760

2. Національна програма досліджень і використання ресурсів Азово-Чорноморського басейну, інших районів світового океану (розділ цільового комплексного проекту «Пошук»).

3. Державна програма «Освоєння вуглеводневих ресурсів Українського сектору Чорного й Азовського морів» Держком нафтогазпрому України (Київ 1995).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи - розробка методів і алгоритмів числового дослідження нелінійного пружного деформування просторово криволінійних труб та трубчатих конструкцій в умовах шельфу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробка методів і алгоритмів числового розрахунку нелінійного пружного деформування просторово викривлених трубопроводів при дії довільно розташованих у просторі статичних або квазістатичних зосереджених, розподілених або моментних навантажень, викликаних кінематичним або деформаційним впливом шельфового середовища.

2. Розробка обчислювальних прикладних програм, що дозволяють оперативно вирішувати поставлені задачі з метою прийняття конструктивних та технологічних рішень.

3. Перевірка достовірності розроблених методів числовими і натурними експериментами.

4. Розв'язання прикладних задач механіки трубопроводів при їх укладанні, ремонті і експлуатації.

5. Розробка та впровадження на виробництві "Методики розрахунку напружено-деформованого стану просторово викривлених підводних трубопроводів".

**Об'єкт дослідження** - шельфові нафтогазопроводи та їх елементи.

**Предмет дослідження** – процеси укладання, експлуатації та ремонту підводних трубопроводів.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано методи математичного моделювання просторового деформування трубопроводів, що засновані на числовому розв'язку системи нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку та експериментальних випробуваннях.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Запропоновано новий підхід у розробці методів дослідження нелінійного деформування, стійкості та закритичної поведінки просторово криволінійних трубопроводів при дії просторово орієнтованих статичних навантажень.

2. Систематизовані відомі методи розв'язків задач нелінійного деформування та стійкості просторово викривлених трубопроводів в умовах водного середовища і на їх основі створені числові методи розрахунку, які відрізняються алгоритмічністю та універсальністю і дозволяють оперативно розв'язувати задачі, що виникають безпосередньо при експлуатації та проектуванні.

3. Розроблено та показано на прикладах розв'язання задач обчислювальний алгоритм.

4. На підставі створених методів та алгоритмів вперше розв'язано ряд прикладних задач механіки морських трубопроводів, досліджено їх напружено-деформований стан, стійкість та критичну поведінку.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені методи дослідження можуть бути використані інженерами-практиками та інженерами-конструкторами на виробництві, студентами вищих навчальних закладів. Створені обчислювальні алгоритми дозволяють вирішувати технологічні задачі безпосередньо в умовах виробництва. Практичне застосування результати дисертаційної роботи знайшли в наступних організаціях (акти впровадження додаються): ДАТ "Чорноморнафтогаз" (м. Сімферополь); Харцизький трубний завод (м. Харцизьк). Наукові положення, висновки, рекомендації дисертаційної роботи використовувались у навчальному процесі при підготовці курсів "Основи машинобудування", "Прикладна механіка" у Херсонському державному технічному університеті. "Методика розрахунку напружено-деформованого стану просторово викривлених підводних трубопроводів" затверджена ДАТ "Чорноморнафтогаз" та використовується при укладанні, ремонті та експлуатації трубопроводів.

**Особистий внесок здобувача** полягає у загальній підготовці та обґрунтуванні задач дослідження, їх конкретній реалізації на всіх етапах роботи, інтерпретації та узагальненні одержаних результатів, підготовці наукових публікацій, проведенні експериментів.

Автором запропоновано методи дослідження пружного просторового нелінійного деформування шельфових нафтогазопроводів та їх елементів [1], [3-6]. Розглянуто специфіку процесу укладання трубопроводу в Азовському морі [2]. В роботах [7-9] автору належить розробка математичної моделі досліджень.

Всі положення, що виносяться на захист, належать автору.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційного дослідження було викладено на науково-технічних і методичних конференціях "Інформаційні технології у виробництві та освіті" Технологічного університету Поділля (м. Хмельницький, 2001, 2002 рр.), на конференції з математичного моделювання (м. Херсон, 2002, 2003 рр.). Дисертація в цілому була докладена на науковому семінарі "Числове моделювання методам і дискретних особливостей в математичній фізиці" відділення кібернетики Північно-Східного Наукового Центру Національної Академії наук України (м. Харків, 2003 р.). Результати дисертаційного дослідження було викладено на засіданнях та конференції-семінарі кафедри основ конструювання Херсонського державного технічного університету.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 9 статей у фахових виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку. Обсяг дисертації - 164 сторінки

машинописного тексту, що містить 79 рисунків, 6 таблиць. Список використаних джерел має 136 найменувань.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, визначаються мета і задачі дослідження, відзначаються наукова новизна, теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі розглянуто питання про перспективи освоєння шельфу Чорного та Азовського морів, яке набуває останнім часом величезного значення через гостру нестачу в Україні енергоносіїв. Описано основні морські трубопровідні комплекси України, показано важливість наукового забезпечення робіт щодо освоєння шельфу, трудомісткість і дорожнечу експериментальних досліджень у морських умовах. Розглянуто існуючі способи укладання шельфових нафтогазопроводів. Особливі умови спорудження і експлуатації глибоководних трубопроводів мають істотні відмінності від наземних і мілководних. Із збільшенням робочих глибин поведінка трубопроводів при укладанні ускладнюється, що в доповнення до складностей випадкового характеру впливу м'єтосередовища приводить до розробки і розвитку таких наукових напрямів, як безпека експлуатації глибоководних комплексів, створення протинаварійних систем запобігання поломок трубопроводів та технологічного обладнання. Технічні несправності, які виникають при укладанні та експлуатації підводних трубопроводів в основному пов'язані зі значними і глибинами моря, дією течій, судноплаством і рибальством, а також із ушкодженнями трубопроводу або його покриття якорями чи тралами. До основних причин руйнувань, як свідчить аналіз відмов, відносяться: заводські дефекти труб, включаючи дефекти заводських зварених швів; дефекти зварених з'єднань труб; ушкодження труб при їх транспортуванні й укладанні; ушкодження труб, зумовлені різного роду відхиленнями від вимог проекту або помилками, допущеними при проектуванні; перенапруження труб у результаті впливу на них неврахованих навантажень; послаблення перерізу внаслідок корозії; порушення режиму експлуатації.

Проаналізовано існуючі методи розрахунку напружено-деформованого стану трубопроводів. Найбільш широко при будівництві трубопроводів використовуються методики, що розроблені П.П. Бородавкіним, О.Б. Шадріним, С.І. Левіним, П.Л. Терешенком, Г.М. Нікогаровим, Г.В. Грудницьким. Для математичного опису процесу занурення трубопроводу, як правило, складаються рівняння пружної лінії для кожної з ділянок трубопроводу з рядом допущень, що в остаточному підсумку впливає на точність розрахунків. У результаті інтегрування рівнянь з урахуванням граничних умов і умов сполучення ділянок визначаються максимальні значення згинальних моментів і напружень. Так само визначається конфігурація трубопроводу. Прийняті допущення характерні для більшості існуючих методів. Дані, на яке укладається

трубопровід, приймають горизонтальним. У випадку ж складного рельєфу дна дане допущення може впливати на точність визначення його напружено-деформованого стану.

Описано механічні властивості трубопроводів та діючих на них навантажень. Матеріал труб характеризують модуль пружності  $E$ , границя текучості  $\sigma_m$ , границя міцності  $\sigma_b$ , нормативний опір розтягання (стисненню) металу труб і зварених з'єднань  $R_{н1}$ ,  $R_{н2}$ . Поки напруження в елементі трубопроводу не перевищують границі текучості, його матеріал працює в пружній стадії, тобто із зникненням деформацій у ньому зникають і напруження. Основна мета розрахунку полягає у визначенні розмірів трубопроводів, що забезпечують дотримання зазначеного положення при заданих умовах навантажування. В дійсності використовується коефіцієнт запасу для призначення допустимих напружень  $\sigma_0$  (границя текучості, розділена на коефіцієнт запасу), і параметри трубопроводів визначаються з умови, що при всіх розрахункових навантаженнях напруження в них не перевищать допустимого значення.

Вплив природних факторів у значній мірі визначають механічні властивості трубопроводів і способи їх укладання. На процес укладання трубопроводу можуть впливати навантаження, викликані хвилюванням, течіями, дрейфом судна, виштовхувальною силою води, силою реакції з боку дна водойми тощо. У результаті хвилювання морської поверхні судно-трубоукладач може піддаватися качці, що, у свою чергу, приведе до виникнення додаткових напруг і згинальних моментів у поперечних перерізах трубопроводу.

Обґрунтовано необхідність дослідження просторового нелінійного пружного деформування підводних трубопроводів.

У другому розділі пропонується розрахункова модель для дослідження деформування трубопроводів, яка базується на теорії гнучких просторово викривлених стрижнів. Застосування цієї моделі шляхом використання обчислювальних алгоритмів дозволяє створити уніфіковану і алгоритмічну методику дослідження напружено-деформованого стану нафтогазопроводів. При розв'язанні нелінійних задач статички просторово деформованих елементів необхідно знати поведінку зовнішніх навантажень у процесі деформування елемента, а також необхідно враховувати зміну характеру зв'язків (наприклад, переміщення шарніра). Кінцевий стан гнучкого елемента буде різним, якщо, наприклад, елемент в одному випадку навантажувати силою, що зберігає при деформуванні системи свій напрямок, а в другому -- слідкуючою силою, що у процесі деформування зберігає свій напрямок стосовно елемента. Пружні переміщення при нелінійному деформуванні трубопроводу можуть бути настільки великі, що форма осьової лінії навантаженого елемента може як завгодно сильно відрізнятись від первісної форми (рис. 1, а). Внутрішні силові фактори, які виникають у трубопроводі під дією зовнішніх навантажень, показано на рис. 1, б.

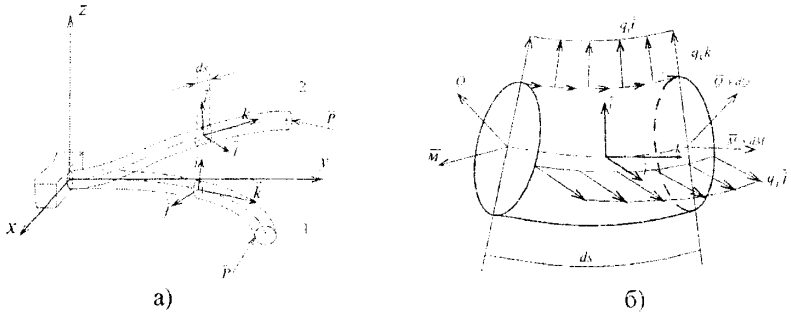


Рис. 1. Деформування елемента трубопроводу (а) та розподіл зовнішніх і внутрішніх зусиль в елементі трубопроводу (б)

Із врахуванням взаємного розташування систем координат та розподілу зусиль в елементі трубопроводу для опису просторового пружного деформування застосовується 27 інтегрованих змінних:  $Q, Q_i, Q_k, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, e_{11}, e_{22}, e_{33}, i_{11}, i_{22}, i_{33}, e_{12}, e_{21}, e_{13}, e_{31}, e_{23}, e_{32}, j_{11}, j_{22}, j_{33}, k_{11}, k_{22}, k_{33}, x, y, z$ . Застосування перших інтегралів зменшило кількість змінних до 18. Кінематичні рівняння та рівняння пружної рівноваги зведено в систему звичайних диференціальних рівнянь. Сформована система рівнянь має високий порядок, тому для її розв'язку необхідно залучати сучасні методи числового аналізу й обчислювальних алгоритмів. Відомі математичні пакети прикладних програм типу “mathcad”, “matlab”, “algebra” не дозволяють розв'язувати нелінійні рівняння такого високого порядку. У зв'язку з цим була створена методика розв'язку рівнянь, заснована на спільному застосуванні методу Ньютона-Канторовича, методу Ейлера і методу продовження по параметру. На відміну від систем лінійних рівнянь для систем нелінійних рівнянь не відомі прямі методи розв'язку, і тому завжди застосовуються ітераційні методи. Числова реалізація цих методів здійснена мовою Fortran сумісно з C<sup>++</sup>. Практична цінність числового методу значною мірою визначається швидкістю й ефективністю одержання розв'язку з необхідною точністю. Для зручності користувачів і одержання сервісних функцій використовувалися такі відомі пакети програм, як Statistika, Exel, NC5.

Постановку граничних умов розглянуто на прикладах жорстко защемленого одним кінцем гнучкого елемента. Граничні умови описано для різних випадків закріплення вільного кінця елемента трубопроводу. Наприклад, у випадку, коли край елемента  $s = S$  закріплений на шарнірі, що переміщується вздовж осі  $y$  (рис. 2), граничні умови будуть такі:

$$\text{на кінці } s = 0: \quad \begin{aligned} Q_i &= 0, & Q_j &= 0, & Q_k &= 0; \\ \Omega_1 &= \Omega_{10}, & \Omega_2 &= \Omega_{20}, & \Omega_3 &= \Omega_{30}; \end{aligned}$$



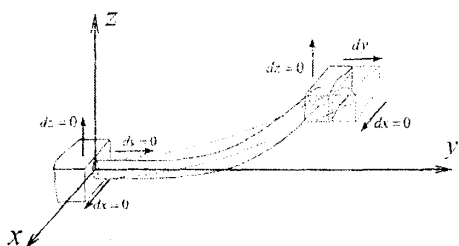


Рис. 2. Закріплення кінця елемента на шарнірі, який переміщується вздовж осі

метод Рунге-Кутта. Кількість точок дискретизації на розрахунковій ділянці залежить від складності геометрії осьової лінії досліджуваного об'єкта, а також у залежності від ступені нелінійності (величини зміни конфігурації деформованого об'єкта, типу прикладених навантажень). Їх число, як правило, варіювалося від 100 до 3000.

Введення числових даних, необхідних для розв'язку конкретної задачі, може здійснюватись у формі чисел, змінних, масивів, послідовностей, рекурсії і комбінацій. Вхідні дані містять у собі інформацію про геометричні і фізико-механічні характеристики трубопроводу, умови обпирання країв, види навантажень і способи додавання навантажень у процесі розв'язку. Режими виведення характеристик напружено-деформованого стану, форм втрати стійкості передбачено у вигляді графіків, таблиць, рисунків. Також виводиться на екран монітору або друк форми трубопроводу як на будь-яком у кроці технологічного процесу, так і зображення всього процесу (від початкового до кінцевого стану) цілком. З метою більш детального аналізу процесу деформування трубопроводу в програмі передбачена можливість покадрової видачі форм трубопроводу на екран у реальному часі. Практичне використання обчислювального алгоритму встановило ряд переваг у порівнянні з відомими засобами і реалізаціями інших методів аналогічного призначення. До них можна віднести високу швидкість збіжності числових розв'язків у сполученні зі швидкодіючими алгоритмами розв'язку систем рівнянь, що дозволяють вирішувати принципово нові задачі і значно скорочувати час розрахунку. До переваг можна віднести також можливість роздільного і спільного врахування різних факторів, пов'язаних з ускладненням геометрії досліджуваного об'єкта і режимів його експлуатації: складного обрису і великої довжини осьової лінії; складного характеру руху, викликаного просторовим і маневрам і судна; комплексного характеру зовнішніх збурень тощо.

Описано методи задавання силових впливів. Розробленою обчислювальною програмою передбачається врахування будь-яких діючих на трубопровід статичних або квазістатичних навантажень. Для задавання рівномірно розподіленого по всій довжині трубопроводу навантаження  $q$  у підпрограмі інтегрування рівнянь задається

на кінці  $s = S$ :

$$e_{x_1} = e_{x_1}(0), \quad e_{y_1} = e_{y_1}(0), \quad e_{z_1} = e_{z_1}(0),$$

$$x = x(0), \quad Q_i = 0, \quad z = z(0).$$

Всі способи задавання навантажень і крайових умов реалізуються обчислювальними алгоритмами.

У третьому розділі описано обчислювальні засоби, що реалізують числове розв'язання задач. Для числового інтегрування рівнянь застосовується

певне значення параметра навантажування  $PARL$ , що є одночасно і параметром збурення при інтегруванні методом продовження розв'язку по параметру. Це навантаження прикладається покроково, рівномірно на кожнім кроці інтегрування або, за необхідністю, нерівномірно, тобто якщо на якомусь етапі навантажування треба з технологічних причин змінювати значення рівномірно розподіленого навантаження на трубопровід. Для визначення значення такого навантаження необхідно помножити значення параметра навантажування на одному у кроці на кількість кроків інтегрування  $Nshag$ , тобто  $q = PARL * Nshag$ , тоді вага всього навантаження визначається як  $Q = q * s$ , де  $s$  – довжина ділянки навантаження трубопроводу і одночасно незалежний параметр в інтегрованих рівняннях, змінюваний у межах від  $s$  до  $S$ . Якщо  $s = S$  ( $S$  – довжина всього трубопроводу), то навантаження вважається рівномірно розподіленим по всій довжині. Зосереджене навантаження може задаватися двома способами. Перший полягає у встановленні ділянок інтегрування з розривами функцій, – тоді ділянка інтегрування розділяється на “підділянки”, на границях яких зміною початкових умов задається величина зосередженого навантаження. Інший спосіб полягає в припущенні, що, точно кажучи, зосередженого навантаження як такого у природі не існує. У будь-якому випадку зосереджене навантаження діє по якійсь кішчевій довжині. При реально діючих навантаженнях доцільно не переходити до багатоточкової задачі, а задавати весь комплекс навантажень як діючих окремо на ділянках інтегрування. Якщо дія зосередженого навантаження поширюється на деякій ділянці  $ds$  інтервалу  $0 \leq s \leq S$ , то, задавши умову, за якої  $q = f(s)$ , можна прикласти навантаження будь-якої інтенсивності на одній або декількох ділянках інтегрування. Зовнішнє зосереджене навантаження  $\vec{F}$  може задаватися в будь-якому напрямку через введення відповідних складових у глобальній або рухомій системі координат у залежності від того, буде вона незмінною у напрямку чи слідкуючою (рис. 3). Для задавання моментного навантаження його можна розглядати як пару сил, утворену зосередженими силами.

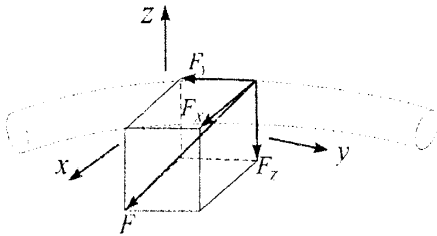


Рис. 3. Спосіб задавання величини просторово спрямованого зосередженого навантаження

Таким чином, використовуючи розроблену методіку, можна задавати довільні за напрямком та характером дії навантаження у будь-яких точках об'єкта, що розглядається. Враховуючи, що переміщення трубопроводу може досягати величини, співрозмірної з його розмірами, за допомогою методіки передбачена також можливість прикладення зусиль на будь-якому етапі деформування.

Розглянуто спосіб задавання геометрії поздовжньої осі трубопроводу необхідної просторової конфігурації, визначення початкових умов, параметрів кривизни та їх похідних. Підводний трубопровід у будь-якому напруженому стані практично не має прямолінійної форми поздовжньої осі. Майже при всіх технологічних процесах (опускання вільним зануренням (S-метод), за допомогою стингерів, змотуванням з барабана тощо) форма осьової лінії трубопроводу уявляється як набір кривих.

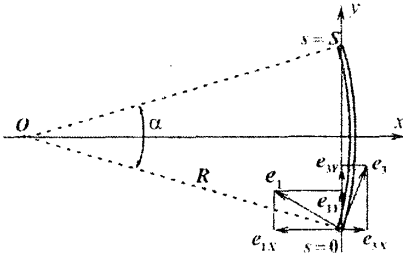


Рис. 4. Спосіб задавання конфігурації осьової лінії криволінійного трубопроводу

Постановку граничних умов розглянуто на прикладі неповного кола, що описує кут  $2\pi - \alpha$ . Змінюванням значень радіуса  $R$  та кута  $\alpha$  можна одержати частину дуги необхідної кривизни (рис. 4).

Достовірність розроблених методів числового дослідження встановлювалась через розв'язки тестових задач. Було розглянуто приклад розрахунку напружено - деформованого стану трубопроводу при укладанні способом

вільного занурення, що запропонований О.Б. Шадріним. Ним розрахована максимально можлива глибина занурення трубопроводу діаметром  $D = 1020$  мм. Як результат отримана максимальна глибина водойми, на яку можливе укладання трубопроводу,  $h = 10,48$  м та показано можливі форми трубопроводу на чотирьох етапах опускання (рис. 5, а).

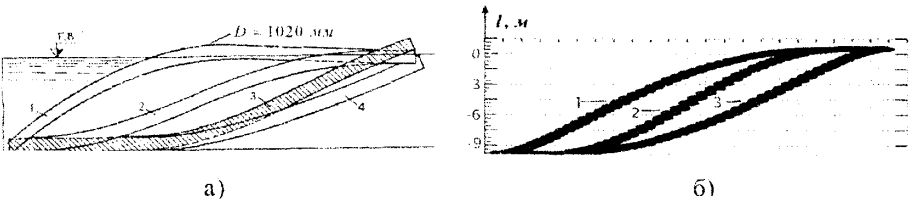


Рис. 5. Форми осьової лінії трубопроводу, одержані О.Б. Шадріним (а) та числовим розрахунком за розробленою методикою (б)

Розглянуті О. Б. Шадріним вхідні фізико-геометричні параметри трубопроводу підставлені в програму вводу даних за розробленою у даній роботі методикою. При організації процесу обчислення моделювався процес заповнення трубопроводу водою. В результаті розрахунку одержано значення максимально можливої глибини укладання трубопроводу  $h = 10,09$  м та форми осьової лінії трубопроводу на трьох етапах опускання (рис. 5, б). Результати розв'язку тестових задач показали збіжність із результатами, одержаними О.Б. Шадріним, що підтверджує достовірність розробленої методики дослідження.

У четвертому розділі розв'язано прикладні задачі просторового нелінійного деформування трубопроводу та його елементів при укладанні, ремонті та експлуатації.

Розглянуто задачу оптимального проектування обрису просторово викривленої подовжньої осі трубопроводу, жорстко з'єднаного із судном-укладальником. Метою розв'язання задачі є зниження максимальних внутрішніх силових факторів шляхом зміни геометрії подовжньої осі (оптимізації довжини  $s$ -подібної кривої). Задачею оптимізації є встановлення довжини  $s$ -подібної кривої трубопроводу, що опускається, на певну глибину при обмеженнях по максимальних напруженнях з урахуванням нормативних коефіцієнтів запасу міцності. При розв'язку задачі відслідковуються напруження в кожному перерізі трубопроводу, що дозволяє одночасно контролювати форму поперечного перерізу і визначити критичні напруження і закритичні форми при перевищенні критичних напружень. На рис. 6 показано форми осьової лінії трубопроводу на всіх етапах опускання (рис. 6, а) та значення згинальних моментів при цьому (рис. 6, б), одержані у результаті числового розв'язку.

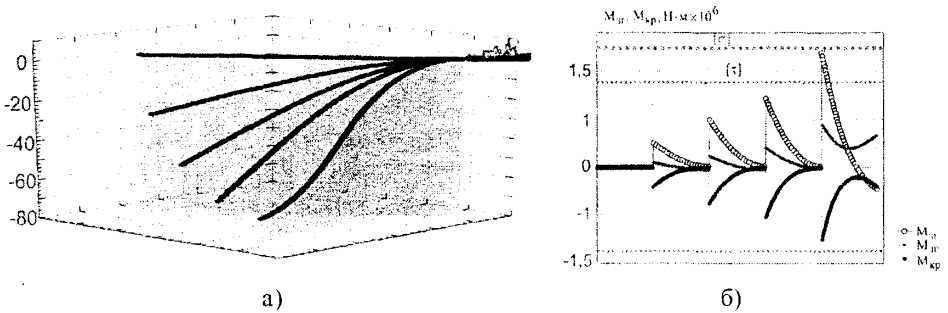


Рис. 6. Форми  $s$ -подібної осьової лінії трубопроводу при опусканні (а) та згинальні і крутильні моменти, які виникають у поперечних перерізах трубопроводу при цьому (б)

Особливістю розробленої методики є те, що, крім наявності повної інформації про напружено-деформований стан просторово-викривленого трубопроводу в його агрегатному стані, можливо визначення НДС будь-якого його перерізу по довжині трубопроводу на будь-якому етапі опускання. На рис. 7, а показана дія зусиль на елемент трубопроводу, що опускається, при його просторовому деформуванні. Із врахуванням зазначених навантажень було зроблено розрахунок деформування поперечного перерізу трубопроводу. В результаті отримано форми деформованого стану перерізу в найбільш навантажених ділянках (рис 7, б).

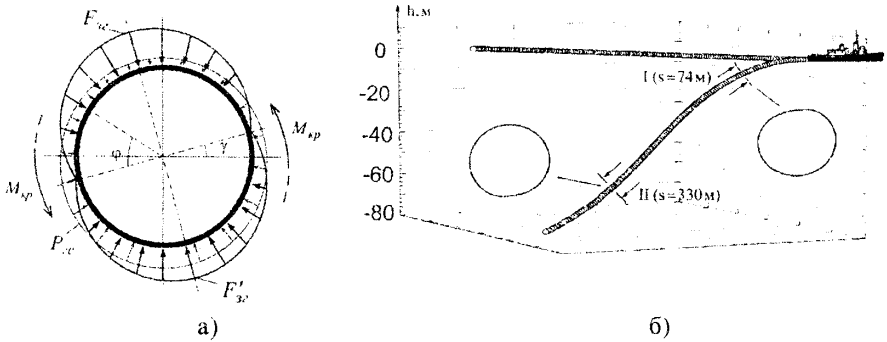


Рис. 7. Зусилля, які діють на елемент трубопроводу при опусканні (а) та форми поперечного перерізу трубопроводу в точках найбільшого деформування (б)

При експлуатації трубопроводів внаслідок дії різного роду навантажень, особливо на розмигих ділянках, у трубопроводі може мати місце втрата стійкості. Пружне деформування може досягати величин, сумірних з розмірами поперечного перерізу, і після зняття навантажень, що зумовили це деформування, поперечний переріз труби може приймати свою первинну форму. Напружено-деформований стан і закритичну поведінку при такому трансформуванні необхідно дослідити як з точки зору оцінки її працездатності, так і для оцінки її поведінки при аварійних ситуаціях. Розроблена методика дозволяє досліджувати напружено-деформований стан, стійкість і закритичну поведінку гнучких трубопроводів будь-якої форми поперечного перерізу (в тому числі і перерізу змінної жорсткості) при будь-яких діючих навантаженнях. У роботі це розглянуто на прикладі деформування гнучкого трубопроводу, що представлений як нескінченно довга пружна оболонка. Підводні трубопроводи прокладають звичайно із заглибленням у дно, тому перерізи часто приймають форму неовного кільця і форми втрати стійкості і закритична поведінка перерізу значно відрізняються від кільцеподібного. Виділимо елемент оболонки одиничної довжини у вигляді кільця, що знаходиться в умовах плоскої деформації і спирається на пружну основу при деякому заглибленні в ґрунт. При цьому приймаємо, що радіус кільця  $-R$ , згинальна жорсткість  $-A_i$ . Згинальна жорсткість  $A_i$  і крутильна жорсткість  $A_k$  задаються на порядок більше, оскільки деформування відбувається в одній площині, а також з метою виключення втрати стійкості і виникнення деформування з площини, що за умовою задачі непередбачено. Величина заглиблення в ґрунт характеризується кутом  $\alpha$  (рис. 8).

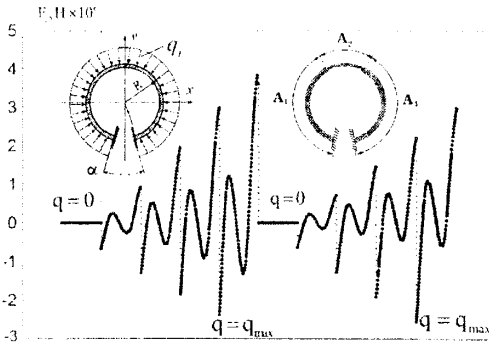


Рис. 8. Внутрішні зусилля в трубі постійного та змінного перерізу

У процесі експлуатації підводних трубопроводів великого діаметра на малих глибинах дія гідростатичного тиску стає незначною в порівнянні з можливими зосередженими впливами (попадання якорів, донних тралів тощо). В роботі розглянуто дію на елемент трубопроводу зосередженого навантаження, що прикладається осторонь від вертикальної осі симетрії (рис. 9, а). Припускається, що у процесі деформування навантаження здійснює переміщення (проковзування) по поверхні трубопроводу, не змінюючи напрямку дії. На рис. 9, б показано внутрішні зусилля, що виникають в елементі трубопроводу при такому деформуванні.

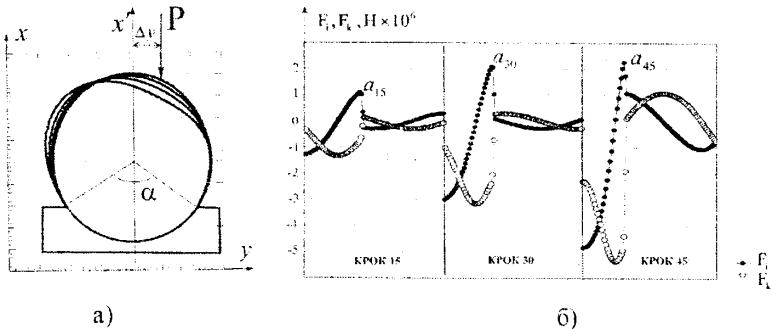
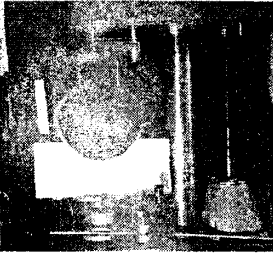


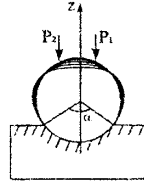
Рис. 9. Деформування елемента трубопроводу під дією ковзаючого навантаження (а) та розподіл внутрішніх зусиль при цьому (б)

Достовірність дослідження деформування оболонки одиничної довжини під дією зосереджених навантажень було перевірено експериментально. Для цього було виготовлено модель елемента трубопроводу, частково зануреного в ґрунт, що уявляє собою оболонку одиничної довжини, жорстко закріплену

в основі (рис. 10, а). Під час експерименту здійснювалось навантаження зосередженими силами, спрямованими на всьому етапі навантаження уздовж вертикальної осі.



а)



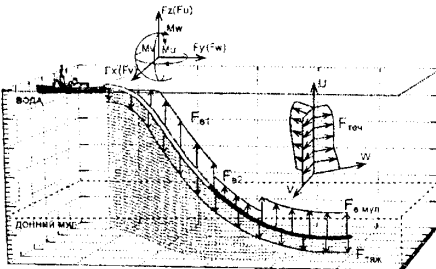
б)

Рис. 10. Видгляд деформованого елемента при навантаженні двома зосередженими навантаженнями (а) та числово розрахована форма деформування елемента трубопроводу (б)

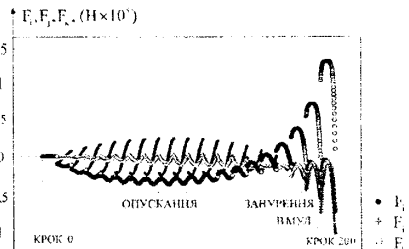
Геометричні та фізичні характеристики елемента трубопроводу (радіус, жорсткість, кут закріплення досліджуваного елемента  $-\alpha$ ) було введено в підпрограми розрахунку. В результаті було одержано форми деформованого стану елемента (рис. 10, б), що співпало з результатами експерименту.

Специфіка поверхні дна Чорного та Азовського морів полягає в тому, що місцями на ґрунті накопичується шар донного мулу, який, у свою чергу, створює опір трубопроводу при опусканні. Товщина такого шару може бути значно більшою за діаметр трубопроводу, тому врахування впливу мулу на трубопровід є необхідною умовою у розрахунках.

Розглянемо процес опускання трубопроводу через відстроповку понтонів. На рис. 11, а показано сили, вплив яких враховується із застосуванням запропонованої методики. В результаті розв'язку задачі одержано просторову форму осьової лінії трубопроводу під час занурення в м'ял (рис. 11, а).



а)



б)

Рис. 11. Сили, що діють на трубопровід при опусканні (а), внутрішні зусилля, які виникають в поперечних перерізах при цьому (б)

При зануренні спочатку плоска форма осьової лінії трубопроводу поступово переходить в просторову, оскільки за незалежно варійований параметр  $q$  приймаються переміщення кінця  $s \in S$  одночасно по осях  $x, y, z$  у заданій пропорції. Одночасно до варійованого параметра додається вплив сили тяжіння та течії. Навантаження від течії інтерпретувалось як розподілене згідно з лінійним законом по довжині трубопроводу, що діє вздовж осі  $x$  в площині  $xy$ . При опусканні трубопроводу до рівня мулу по мірі занурення прикладається сила, яка відповідає силі виштовхування з боку мулу. Графік розподілення зусиль (рис. 11, б) показує, що під час процесу опускання до початку занурення в мул внутрішні зусилля збільшуються досить повільно. Після зіткнення з поверхнею мулу відбувається різке зростання внутрішніх зусиль. Це, очевидно, зумовлено дією сили виштовхування мулу. Таким же чином можна зобразити графічно і внутрішні моменти в будь-якому перерізі на будь-якому кроці.

На окремих ділянках підводних трубопроводів може відбуватися вільне просторово викривлене провисання внаслідок розмиву донного ґрунту, природного нерівномірного просідання трубопроводу, складного профілю морського дна тощо. Такі прогини наражають трубопровід на постійні небезпеки, оскільки вони можуть бути непередбачені. Окрім того, у зв'язку зі значним впливом вартості передукладальних та післяукладальних робіт на вартість укладання трубопроводу необхідно визначити максимально допустиму довжину прогонів. Прибережна донна поверхня Азовського моря специфічна наявністю намивів (кос). При укладанні трубопроводу від родовища до берега на даній ділянці можливо утворення безопорних секцій. ДАТ «Чорноморнафтогаз» проводить будівництво газопроводу, що поєднує Східно-Казангипське газове родовище із УКПГ у селищі Багереве (АР Крим). Для розрахунку впливу рельєфу дна розглянуто ділянку підводного трубопроводу на відстані 70 м від точки його виходу на берег. Програмними методами, що описані у третьому розділі, вплив донної поверхні задається як дія ряду зосереджених та розподілених навантажень. На рис. 12, а показано рельєф донної поверхні досліджуваної ділянки та форму осьової лінії трубопроводу, яку одержано числовим розрахунком.

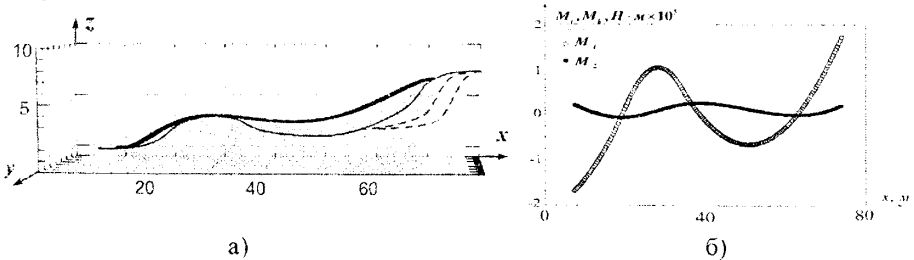


Рис. 12. Форма осьової лінії трубопроводу із врахуванням рельєфу дна (а) та згинальні й крутильні моменти, що виникають в трубопроводі (б)



Значення внутрішніх зусиль та моментів, що виникають у поперечних перерізах трубопроводу при цьому (рис. 12, б), показують їх значну нелінійність.

## ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу робіт з механіки трубопроводів визначені напрямки досліджень з метою створення методів розрахунку, що дозволяють відслідковувати їх напружено-деформований стан при укладанні, ремонті і експлуатації.

2. Розроблено математичну модель дослідження пружного нелінійного деформування просторово викривлених трубопроводів, методика побудови розв'язків зведених диференціальних рівнянь.

3. У результаті дослідження характеристик силового впливу розроблені способи задавання зосереджених, розподілених і моментних навантажень, навантажень від течій, від гідростатичного тиску, які діють на шельфові трубопроводи.

4. На основі сучасних методів числового аналізу й аналітичної геометрії розроблені обчислювальні алгоритми дослідження нелінійного просторового деформування трубопроводів і трубчастих елементів конструкцій зі згинальною і крутильною жорсткістю, які дозволяють визначати основні характеристики напружено-деформованого стану об'єкта, уніфікувати досліджувані типи конструкцій, ефективно переходити від однієї розрахункової схеми до іншої в залежності від фізико-геометричних параметрів і умов навантажування, одержувати вихідні дані в зручному для користувача вигляді.

5. У результаті розв'язку прикладних задач одержано характеристики напружено-деформованого стану підводного трубопроводу при його просторовому деформуванні в процесі укладання, ремонту та експлуатації. Отримано закон зміни кривизни гнучкого трубопроводу в залежності від параметрів глибини опускання та довжини частини трубопроводу, що опускається, з урахуванням крутіння для оптимізації форми осьової лінії. Визначено критичні навантаження і закритичні форми перерізу трубопроводу змінної жорсткості. Розглянуто вплив зосереджених навантажень на трубопровід при його експлуатації та ремонті. Досліджено процес укладання трубопроводу на замулену поверхню дна, вплив складного рельєфу на напружено-деформований стан. Розроблено і впроваджено на виробництві «Методику розрахунку напружено-деформованого стану просторово викривлених підводних трубопроводів».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Недбайло О.М. Стійкість та закритична поведінка елемента трубопроводу змінної жорсткості // Всукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ". - 2003. - №2 (7). - С. 69-73.

2. Недбайло О.М. Напружено-деформований стан підводного трубопроводу при укладанні // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ". - 2003. - № 3 (8). - С. 108-113.
3. Кравцов В.И., Кравцов А.В., Недбайло А.Н. Оптимизация параметров S-образной кривой при укладке глубоководного трубопровода // Збірник наукових праць УДМТУ. - 2002. - №5 (383). - С. 22-29.
4. Кравцов В.И., Недбайло А.Н. Механика пространственно-криволинейного подводного трубопровода при поднятии на поверхность // Збірник наукових праць УДМТУ. - 2002. - №3 (381). - С. 10-14.
5. Кравцов В.И., Недбайло А.Н. Численное моделирование нелинейного деформирования пространственно изогнутого трубопровода со спиральной навивкой бандажа // Вісник ХДТУ. - 2003. - №3 (19). - С. 177-181.
6. Блинов Э.И., Кравцов В.И. Кравцов А.В., Недбайло А.Н. Управление гибкими протяженными объектами направленными силовыми воздействиями // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 2003. - № 1 (11). - С. 79-86.
7. Кравцов В.І., Защепкіна Н.М., Недбайло О.М. Математична модель вибору оптимальних параметрів гнучких деформованих елементів // Вісник технологічного університету Поділля. - 2001. - №5 (36). - С. 41-44.
8. Защепкіна Н.М., Кравцов В.І., Недбайло О.М. Просторове деформування каната з урахуванням взаємодії витків у циклічному навантаженні // Вісник технологічного університету Поділля. - 2002. - №1 (38). - С. 66-70.
9. Кравцов В.І., Недбайло О.М. Числовий розрахунок деформування нитки у потоці рідини // Легка промисловість. - 2001. - № 2 (186). - С. 60.

#### АНОТАЦІЯ

Недбайло О.М. Механіка шельфових нафтогазопроводів при укладанні, ремонті і експлуатації.

Дисертацією є рукопис, поданий на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2004.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню механіки підводних трубопроводів, розробки методики визначення характеристик їх напружено-деформованого стану у пружному нелінійному просторовому деформуванні. В роботі обчислювальними методами розв'язуються задачі визначення впливу морських факторів на шельфові трубопроводи при укладанні, ремонті і експлуатації. Розв'язано прикладні задачі, що показують можливості розробленої методики на прикладах здійснювання технологічних процесів. Визначено оптимальні параметри трубопроводу при

опусканні на великі глибини, стійкість і закритичну поведінку його елементів; досліджено вплив зосереджених навантажень при опусканні і позиюванні; розглянуто напружено-деформований стан при опусканні на складний рельєф дна. Проведено експериментальні дослідження деформування зразків трубопроводу. Розроблено і впроваджено на виробництві «Методику розрахунку напружено-деформованого стану просторово викривлених підводних трубопроводів».

Ключові слова: підводні трубопроводи, просторове нелінійне деформування, стійкість, навантаження, напружено-деформований стан.

## АННОТАЦИЯ

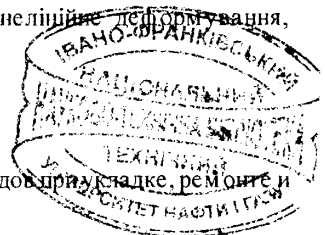
Недбайло А.Н. Механика шельфовых нефтегазопроводов при складке, ремонте и эксплуатации.

Диссертацией является рукопись, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2004.

Диссертационная работа посвящена исследованию механики подводных трубопроводов в условиях шельфа, разработке методики определения характеристик их напряженно-деформированного состояния при упругом нелинейном пространственном деформировании. Направления исследований обусловлены важностью этих задач в современных условиях для обеспечения Украины собственными и энергоресурсами, получаемыми путем разработки шельфов Азово-Черноморского бассейна.

На основе проведенного анализа существующих методов исследований обоснована необходимость разработки алгоритмичной и унифицированной методики с привлечением современных методов численного анализа и аналитической геометрии. Разработана математическая модель, обобщающая известные теоретические предпосылки и позволяющая сформулировать систему разрешающих обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка, которые являются опорными и при модификации алгоритмов решения прикладных задач. При этом исследуются трубопроводы, упругие перемещения которых при нелинейном пространственном деформировании настолько велики, что форма осевой линии может как угодно сильно отклоняться от ее первоначальной формы.

Разработаны вычислительные алгоритмы исследования трубопроводов и трубчатых элементов конструкций с изгибной и крутильной жесткостью, которые позволяют унифицировать исследуемые типы конструкций, эффективно переходить от одной расчетной схемы к другой в зависимости от их физико-геометрических параметров, условий нагрузки, типа технологических операций. Входные и выходные данные при этом представляются в удобном для пользователей виде, что позволяют



решать задачи непосредственно при осуществлении технологического процесса. Приведены решения тестовых задач, а также проведены вычислительные и натурные эксперименты, подтверждающие достоверность математической модели. Разработаны способы задания нагрузок морского характера, действующих на шельфовые трубопроводы: сосредоточенных, распределенных и моментных, нагрузок от течений произвольного направления, гидростатического давления. Приложение нагрузок, установка условий опирания, задание физико-геометрических параметров трубопровода осуществляется визуально с помощью разработанной в среде современных алгоритмических языков имитационной программной модели.

Решены прикладные задачи, имеющие производственную значимость и показывающие возможности разработанной методики. Определены оптимальные геометрические формы S-образной пространственно изогнутой осевой линии трубопровода в зависимости от параметров глубины опускания и длины части опускаемого трубопровода. Для оптимизации формы осевой линии впервые исследован закон изменения кривизны гибкого трубопровода с учетом кручения, что особенно важно для проверки прочности сварных соединений. Определены при опускании трубопровода большого диаметра значения критических нагрузок и возможные закритические формы некруглого сечения переменной жесткости при действии гидростатической неравномерной нагрузки. Рассмотрено влияние технологических и случайных сосредоточенных нагрузок, расположенных произвольно в пространстве и действующих на трубопровод при его позиционировании или эксплуатации на любом этапе деформирования. Проанализировано деформирование оболочки трубопровода под действием скользящей или следящей сосредоточенной нагрузки, результаты исследований проверены экспериментально. Исследован процесс укладки трубопровода на заиленную поверхность дна, при этом установлено значительное увеличение внутренних силовых факторов при переходе в заиленную зону вследствие изменения плотности окружающей среды. Рассмотрено влияние сложного донного рельефа, образованного воздействием подводных течений, естественного размыва грунта на напряженно-деформированное состояние эксплуатируемого трубопровода, даны предложения по целесообразности и способам ремонта обнаруженных опасных участков. Рассмотрено пространственное деформирование спиралевидного бандажа, навитого на нецилиндрическую поверхность, от давления со стороны перекачиваемого продукта и внешней среды, получена форма его деформированного состояния и распределение внутренних силовых факторов в трубопроводе в целом и в каждом из витков. В результате решений прикладных задач во всех случаях получены формы осевой линии и значения внутренних усилий и моментов в поперечных сечениях пространственно изогнутого трубопровода на этапах опускания от поверхности моря до технологической отметки с одновременным контролем опасных напряжений. Проведены экспериментальные исследования деформирования образцов трубопровода. Разработана и внедрена на производстве «Методика расчета

напряженно-деформированного состояния пространственно искривленных подводных трубопроводов».

Ключевые слова: подводные трубопроводы, пространственное нелинейное деформирование, устойчивость, нагрузки, напряженно-деформированное состояние.

## SUMMARY

Nedbaylo A.N. Mechanics of the shelf pipelines at stowage, repair and usages.

The thesis is a manuscript for degree of the Candidate of Sciences in techniques. Specialty 05.15.13 – Oil and Gas Pipelines, Oil Reservoir and Gas Storages. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2004.

The dissertation focuses on the research of mechanics of underwater pipelines, development of methods of determination of features their tensely-deformed state in elastic nonlinear spatial deformation. The problems of definition of influence of sea factors on shelf pipelines at stowage, repair and usages are solved in the research work by computing methods. The applied tasks, which demonstrate the possibilities of the worked out methods on examples of realization of technological processes are solved. The optional parameters of pipeline are determined at the time of stowage on great depths. Steadiness and critical behavior of the elements of pipelines is determined. The influence of concentrated loads at the time of stowage and positioning is explored. The tensely-deformed state at the time of stowage on complex relief of the bottom is considered. Experimental researches of deformation of samples of pipeline are made. The "Methods of calculation is tensely-deformed conditions of space deformed underwater pipelines" are worked out and put in to practice.

The keywords : underwater pipelines , spatial nonlinear deformation, steadiness , load, tensely-deformed state.