

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**

Нужний Сергій Миколайович

УДК 629.584: 621.315.281

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ
ПРОЕКТУВАННЯ ПРИВ'ЯЗНИХ ПІДВОДНИХ СИСТЕМ З
ГНУЧКИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ**

Спеціальність 05.08.03 - Механіка та конструювання суден

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

Миколаїв - 2006

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник Доктор технічних наук, професор
Блінцов Володимир Степанович, Національний
університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
завідувач кафедри електрообладнання суден

Офіційні опоненти Доктор технічних наук, професор
Сліжевський Микола Борисович, Національний
університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
професор кафедри гідромеханіки
Доктор технічних наук, професор Кравцов
Віктор Іванович,
Херсонський національний технічний університет,
професор кафедри основ конструювання

Провідна установа Одеський Національний морський
університет Міністерства освіти і науки України, м
Одеса

Захист відбудеться " 05 " лютого 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради ДЗ8.060.01 Національного університету кораблебудування імені
адмірала Макарова за адресою: 54025, м Миколаїв, проспект Героїв Сталінграду,9

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м Миколаїв,
проспект Героїв Сталінграду, 9

Автореферат розісланий " 29 " грудня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук,
професор

Радченко М.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРІСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прив'язні підводні системи (ППС) відносяться до найбільш широко застосовуваних технічних засобів вивчення й освоєння шельфу. Основна область застосування ППС: обстеження донної поверхні перед виконанням будівельно-монтажних, бурових і ремонтних робіт; картографування донної поверхні та підводних об'єктів; візуальне обстеження та інспекція підводних об'єктів; виконання підготовчих робіт із монтажу і підйому підводних об'єктів; пошукові та дослідницькі роботи; видобуток корисних копалин (конкрецій) і багато іншого. Пильну увагу до цього виду техніки проявляють військово-морські сили усіх країн, що пояснюється можливістю використання їх у найскладніших та найнебезпечніших роботах з розмінування та знешкодження вибухонебезпечних предметів, пошуку і виявлення затонулих об'єктів, а також при аварійно-рятувальних роботах.

Ефективність застосування ППС для зазначених робіт багато в чому визначається їхньою енергооснащеністю та маневреністю, а також спроможністю надійно виконувати як операції з доставки вимірювального і робочого устаткування до місця робіт, так і позиціонування та просторової стабілізації головного елемента ППС - підводного апарата (ПА) і його робочого інструмента щодо підводного об'єкта в умовах зовнішніх збурень (течія, хвиля, зусилля від судна-носія). Великий час безперервної роботи (перебування під водою) дає змогу виконувати складні технологічні операції при будівельно-монтажних, ремонтних, пошукових та аварійно-рятувальних роботах.

Основні ринки робіт ППС в Україні знаходяться на Чорному та Азовському морях. До них відносять роботи з обстеження стаціонарних і рухомих морських бурових платформ, трубопроводів і підводних кабельних трас, одиночних і групових підводних об'єктів та гідротехнічних споруд. Значні обсяги робіт мають місце і на великих водоймах (водосховищах) і річках - огляд підводних конструкцій ГЕС, ГРЕС, АЕС, а також гідротехнічних споруд портів, суднобудівних і судноремонтних заводів і т.д.

Проблемою будівництва нової підводної техніки займаються практично в кожній економічно розвиненій країні. До світових фірм-постачальників підводної техніки належать "IFREMER" (Франція), "ISE" (Канада), "Sub Sea International" (США), "Benthos, Inc. (США) та ін.

Однією з головних складових ППС є гнучкий елемент (ГЕ) - кабель-трос, кабель-буксир чи кабель-шлангова система. Від його параметрів значною мірою залежить конструкція та технічні характеристики як ПА, так і ППС в цілому.

Розвиток підводних технологій з використанням ППС і збільшення обсягу підводно-технічних робіт із будівництва та обслуговування підводних об'єктів та споруд обумовлюють необхідність створення спеціалізованих підводно-технологічних комплексів (СПТК) і технічних засобів (начіпного обладнання). Для цього створюють спеціалізовані та тимчасові кабель-шлангові системи (КШС).

Робота зазначених вище систем значною мірою залежить від таких зовнішніх чинників, як швидкість та епіюра течії, гідростатичний тиск, температура, радіус згину, хвилювання моря та переміщення судно-носія і ПА і т.д. Дослідження їх впливу на положення ГЕ (кабелю, КШС) в потоці дає можливість визначити параметри ПА і ППС на етапі проектування, розробляти нові технології виконання робіт, збільшити продуктивність праці та енергозбереження при виконанні підводно-технічних робіт. При цьому особливо важливим є врахування крайових умов і внутрішніх властивостей системи.

Моделювання форми ГЕ, який з'єднує надводний і підводний об'єкти в потоці рідини вважається класичним завданням. Її розв'язання знайшло відображення в працях Бугаєнка Б.А., Блінцова В.С., Васильєва В.В., Магули В.Е.,

Мінакова А.П., Пономарьова С.Д., Кравцова В.І., Салтанова М.В., Светлицького В.О., Сліжевського М.Б. і багатьох інших. Але втілення результатів моделювання гальмується невирішеністю або ж недостатньою розробкою ряду теоретичних та прикладних завдань. До завдань, які в наш час ще не були розв'язані в повному обсязі, відносяться моделювання ГЕ як гнучкої лінії з урахуванням його жорсткості на згинання та кручення в залежності від гідростатичного тиску, а також моделювання ППС зі змінними по довжині параметрами ГЕ.

Ігнорування або ж неналежне врахування цих параметрів може суттєво погіршити роботу ППС аж до непрацездатності системи в цілому. Прикладом такого впливу є відмови в роботі малогабаритних самохідних телекерованих ПА, що використовувались на автономних підводних апаратах "Мир" та інших, на великих глибинах (1500...2000 м). Однак робіт, присвячених дослідженню впливу гідродинамічного тиску на жорсткість кабелів, відносно небагато. Крім того, ці роботи мають розрізнений характер, комплексне дослідження проблеми у літературі відсутнє.

Виходячи з вказаного вище можна зазначити, що вдосконалення теоретичних основ проектування прив'язних підводних систем, до складу яких входять гнучкі елементи, за рахунок врахування впливу жорсткості на згинання та умов закріплення їх ГЕ, гідростатичного тиску, конструкційних та експлуатаційних характеристик ППС, дає змогу підвищити достовірність отриманих результатів на ранніх стадіях проектування таких систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок дослідження дисертації відноситься до основних наукових напрямів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) і є складовою частиною досліджень Науково-дослідного інституту підводної техніки НУК в рамках комплексних робіт: НДКР "Розробка теоретичних основ створення технічних засобів освоєння природних ресурсів Чорного та

Азовського морів" (державний реєстраційний номер 01020005199) та НДКР „Теоретичні основи створення та ефективного застосування підводних роботизованих комплексів для дослідження та освоєння Азово-Чорноморського басейну" (державний реєстраційний номер 01050001765).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення теоретичних основ проектування прив'язних підводних систем з підводними апаратами шляхом урахування жорсткості на згинання їх гнучких елементів.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання: визначено і обґрунтовано перелік завдань, які потребують обов'язкового врахування жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання, основні підходи до розв'язання прямої та зворотної задач механіки ГЕ та обґрунтовано основні напрямки вдосконалення методів математичного моделювання ППС з ГЕ;

вдосконалено математичну модель ГЕ, що входить до складу ППС, яка враховує вплив зовнішнього середовища (сили гідродинамічного опору ГЕ, зовнішні зосереджені та розподілені навантаження, гідростатичний тиск та ін.), умов закріплення ГЕ та реакції в опорах, конструкційні (жорсткість поперечного перетину на згинання, діаметр, довжина, залишкова плавучість та ін.) та експлуатаційні (кут закріплення вузла вводу ГЕ, кут прикладення та величина результуючого вектора упору рушіїв, швидкість переміщення та ін.) характеристики ППС;

методом математичного моделювання встановлено вплив зовнішнього гідростатичного тиску та жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання на сило-енергетичні характеристики та просторове положення елементів дволанкових ППС при суттєвій нелінійності вісьової лінії ГЕ в ненавантаженому стані;

запропоновано розподілення ППС в залежності від особливостей врахування жорсткості їх ГЕ та характеру і впливу зовнішнього навантаження на чотири групи (одноланкові ППС з оглядовим ПА; одноланкові ППС з робочим ПА; ППС, які працюють під високим гідростатичним тиском та мають ГЕ з

суттєво нелінійною віською лінію в не навантаженому стані; СПТК для транспортування сипучих та рідких вантажів) та досліджено кожну групу ППС з метою: виявлення основних характерних особливостей; розрахунку з більшою точністю та достовірністю сило-енергетичних характеристик ППС та уточнення конструктивних та експлуатаційних особливостей ППС на ранніх стадіях їх проектування;

отримано аналітичні залежності для розрахунків робочої зони ППС, які є функціями від проектних (діаметра, жорсткості на згинання та довжини ГЕ) та експлуатаційних (упори рушіїв, швидкості переміщення) характеристик прив'язної підводної системи;

розроблено принцип функціонування, структуру та склад СПТК для доставки на морське дно сипучих та рідких вантажів як морської інженерної споруди з ГЕ та отримано аналітичні залежності для розрахунків робочої зони, де координати ходового кінця є функціями проектних та експлуатаційних характеристик;

вдосконалено узагальнений алгоритм проектування ППС з урахуванням конструкційних і експлуатаційних параметрів прив'язної підводної системи та впливу зовнішнього середовища.

Об'єктом дослідження є механіка гнучких елементів прив'язних підводних систем при урахуванні умов їх використання.

Предметом дослідження є проектування прив'язної підводної системи, до складу якої входить гнучкий елемент, з урахуванням жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання та зміни просторового положення ГЕ під дією зовнішніх навантажень (сил гідродинамічного опору ГЕ, зовнішніх зосереджених і розподілених навантажень, гідростатичного тиску та ін.), умов закріплення ГЕ і реакцій в опорах, конструкційних (діаметру, довжини, залишкової плавучості та ін.) і експлуатаційних (кута закріплення вузла вводу ГЕ, кута прикладення та величини результуючого вектора упору рушіїв та ін.) характеристик ППС.

Методи дослідження: математичне моделювання стаціонарних режимів роботи ППС із використанням нелінійних диференціальних рівнянь і численних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь на ЕОМ; регресивний аналіз результатів моделювання; лабораторні випробування типових та виготовлених за проектами автора ГЕ в умовах високого гідростатичного тиску.

Наукова новизна одержаних результатів:

вдосконалено математичну модель гнучкого елемента ППС, яка враховує жорсткість його поперечного перетину на згинання та умови закріплення його ходового кінця, що дає змогу визначити сило-енергетичні характеристики прив'язного підводного апарата на ранніх етапах проектування ППС;

вперше розв'язано завдання моделювання зосереджених періодично розташованих по довжині гнучкого елемента навантажень шляхом використання періодичної функції, яка має властивості функції Дирака і замінює зосереджені навантаження неперервними розподіленими навантаженнями, що дає змогу врахувати вплив встановлених на ГЕ поплавків на проектні й експлуатаційні характеристики ППС;

вперше розв'язано завдання врахування зовнішнього гідростатичного тиску та жорсткості поперечного перетину на згинання ГЕ на сило-енергетичні характеристики та просторове положення елементів дволанкових ППС з суттєвою нелінійністю віської лінії в не навантаженому стані, що підвищує достовірність проектних розрахунків упорів рушіїв підводного апарата на ранніх стадіях проектування таких ППС;

вперше методами математичного моделювання та регресивного аналізу отримано аналітичні залежності для визначення просторового положення підводного апарата ППС відносно судна-носія, які враховують вплив зовнішніх

факторів, умов закріплення та конструктивних особливостей ГЕ, в тому числі й жорсткості його поперечного перетину на згинання;

вперше отримано аналітичні залежності для розрахунку робочої зони (координат переміщення ходового кінця ГЕ) як функції відхиляючих сил на ходовому кінці гнучкого елементу СПТК, довжини та жорсткості на згинання ГЕ, що утворює теоретичне підґрунтя для проектних розрахунків комплексу.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням математичної моделі гнучкого елемента, основаної на його фізичних властивостях та основних положеннях теорії великих переміщень. Аналіз працездатності математичної моделі і достовірності отриманих результатів проводився методом їх порівняння з результатами, що отримані і підтверджені натурними випробуваннями попередніх дослідників, використанням для обробки результатів дослідження сучасних пакетів прикладних програм MathCad та Advanced Grapher.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені методики, конструктивні рішення та вдосконалений алгоритм проектування ППС можуть бути використані при розробці та дослідженні нових зразків прив'язних підводних систем і технологічних комплексів на ранніх стадіях їх проектування та при проведенні навчального процесу у вищих навчальних закладах. Теоретичні результати роботи впроваджені при проектуванні гнучких елементів ППС, які були створені в НУК в рамках держбюджетних та договірних науково-дослідницьких робіт. Під керівництвом та за участю автора дисертації запропоновано, створено і випробувано в натурних умовах р. Єнісей (Росія) спеціалізований підводно-технологічний комплекс для доставки на дно сипучих вантажів за допомогою гнучкого продуктопроводу. Рекомендації автора використано при проектуванні й експлуатації нових зразків підводної техніки, створюваних в НДІ підводної техніки НУК для Академії наук суднобудування України, НДЦ „Державний океанаріум” Збройних Сил України, Міжнародного договору „Експедиція підводних робіт особливого призначення (ЕПРОН)” (Україна, Кіпр). Отримані результати використані при підготовці студентів НУК, що навчаються за напрямом 0922 „Електромеханіка” на спеціалізації 8.092201.02 „Електрообладнання та автоматика підводно-технічних систем та комплексів” Міністерства освіти і науки України.

Особистий внесок здобувача в одержанні наведених у дисертації наукових результатів полягає у вдосконаленні математичної моделі ГЕ ППС, яка враховує жорсткість їх поперечного перетину на згинання, зовнішній гідростатичний тиск, а також умови закріплення та інші конструкційні і експлуатаційні характеристики ГЕ; розробці програми та методики проведення теоретичних досліджень ППС; у встановленні закономірності впливу зосереджених періодично розташованих по довжині ГЕ навантажень та гідростатичного тиску на форму прогину ГЕ та сило-енергетичні характеристики ППС; одержанні аналітичних залежностей для розрахунку робочої зони (координат переміщення) ПА; розроблені методики розрахунку просторового положення та робочої зони СПТК для доставки сипучих та рідких вантажів на морське дно.

Апробація результатів дисертації Основні результати дисертації були представлені на науково-технічних конференціях: 2-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми енергозбереження і екології в суднобудуванні" (Миколаїв, УДМТУ. 1998 р.); 5-й Міжнародній конференції по нетрадиційних електромеханічних і електротехнічних системах UEES-2001 (Щецин, Польща, 2001); Міжнародній конференції! "Кораблебудування: освіта, наука, виробництво" (Миколаїв, УДМТУ, 2002); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету кораблебудування (2002-2006 р.р.) та ін.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 9 друкованих наукових працях. Основні результати дослідження викладено в 6 статтях (5 без співавторів), надрукованих у наукових фахових виданнях. Основні публікації, в яких додатково викладено результати дисертації, включають 3 статті (2 без співавторів).

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Обсяг дисертації - 148 стор., 96 ілюстрацій. Список використаних джерел містить 79 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності дисертаційної роботи, її основну мету, розв'язані задачі, отримані наукові результати, що виносяться на захист, зв'язок з науковими програмами, наукову новизну і практичну цінність.

У першому розділі наведено структуру сучасної ППС та її модифікації. Типова ППС складається з трьох елементів: судна-носія (СН), підводного апарата (ПА) та кабель-троса (КТ) чи кабель-буксира (КБ). СН та ПА - це тверді тіла, а КТ та КБ є гнучкими елементами (ГЕ), які дають можливість взаємного переміщення елементам системи. Встановлено, що в залежності від завдання та технології його розв'язання ППС ділять на одно- та багатоланкові, тобто до вказаних вище елементів додається ще одна ланка - ГЕ та ПА чи спеціалізований пристрій (СП). В якості СП використовуються допоміжні платформи (ДП) з кабель-тросовими лебідками, енергоанкери-привантажувачі, додаткові буї (Б) та ін. Запропоновано, в залежності від впливу зовнішнього середовища, конструкційних та експлуатаційних характеристик ГЕ, ППС розділити на п'ять груп: одноланкові системи типу СН-ГЕ-ПА; одно-ланкові системи типу АПА-ГЕ-ПА; дволанкова система типу СН-ГЕ1-ДП-ГЕ2-ПА; дволанкова система типу СН-ГЕ1-Б-ГЕ2-ПА; СПТК, які забезпечують транспортування корисного вантажу.

Виконано огляд та критичний аналіз методів розрахунку та моделювання ГЕ.

Розглянуто та обґрунтовано проектні задачі механіки ГЕ ППС. Показано, що для ППС з ГЕ пряма та зворотна задачі в загальному вигляді є нелінійними статично невизначеними задачами з нескінченною кількістю факторів, які визначають його реакцію під дією зовнішніх сил. Розв'язання поставлених задач можливе різними способами, одним із них є математичне моделювання ГЕ. Однак існуючі математичні моделі ГЕ мають ряд недоліків, які обмежують їх застосування.

У другому розділі удосконалено розрахункову модель для дослідження ГЕ, яка базується на теорії великих переміщень.

Система СН-ГЕ-ПА, в якій ГЕ зазнає плоского згину, зображена на рис. 1. Використані наступні позначення: O і A – точки закріплення ГЕ на ПА (ходовий кінець) і СН (корінний кінець), відповідно, а також в якості індексів позначають належність величини до відповідної точки закріплення; $\vec{T}$ – сили реакцій опор в точках закріплення ГЕ; α – кут нахилу дотичної до площини XOY в точці прикладення сили $\vec{T}$ (кут атаки); β – кут між вектором сили $\vec{T}$ і площиною XOY в точці прикладення сили; γ – кут між проекцією дотичної на площину XOY та віссю OX ; M – згинаючий момент; $\bar{V} = f(z)$ – функція залежності епюри потоку рідини від вертикальної координати Z нерухомої системи координат (x, y, z) . Розподілені та зосереджені сили на рис. 1, *а)* не зображені.

Удосконалена математична модель ГЕ має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dl} &= q_n \cdot \sin(\beta) - q_t \cdot \cos(\beta) - q_{zp} \cdot \sin(\alpha + \beta); & \frac{dM}{dl} &= T \cdot \sin(\beta); \\ \frac{d\beta}{dl} &= \frac{q_n \cdot \cos(\beta) + q_t \cdot \sin(\beta) - q_{zp} \cdot \cos(\alpha + \beta)}{T} - \frac{M}{EJ}; & \frac{d\alpha}{dl} &= \frac{M}{EJ}; \\ \frac{dx}{dl} &= \cos(\alpha); \quad \frac{dz}{dl} = \sin(\alpha); \quad \frac{d\Delta}{dl} = \frac{1}{2 \cdot P} \left(\frac{M^2}{E \cdot J} + \frac{32}{27} \frac{T^2 \cdot \cos^2(\beta)}{G \cdot S} + \frac{T^2 \cdot \sin^2(\beta)}{E \cdot S} \right), \end{aligned}$$

де $q_n = 0,5 \cdot C_n \cdot \rho \cdot d \cdot v^2 \cdot \sin^2 \alpha$, $q_t = 0,5 \cdot C_t \cdot \rho \cdot d \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha$ та q_{zp} – зовнішні розподілені навантаження гідродинамічного опору (відповідно, норма-

льна та тангенціальна складові) та розподіленої сили ваги у воді (залишкової плавучості); C_n та C_t – коефіцієнти гідродинамічного опору ГЕ; ρ – питома густина води; d – зовнішній діаметр ГЕ; v – швидкість переміщення ГЕ в рідині; E – модуль Юнга; G – модуль зсуву; J – момент інерції площі поперечного перетину ГЕ; Δ – узагальнене переміщення нескінченно малого відрізка dl ; $P = \sqrt{q_n^2 + q_t^2 + q_{zp}^2} \cdot dl$ – узагальнена зовнішня сила.

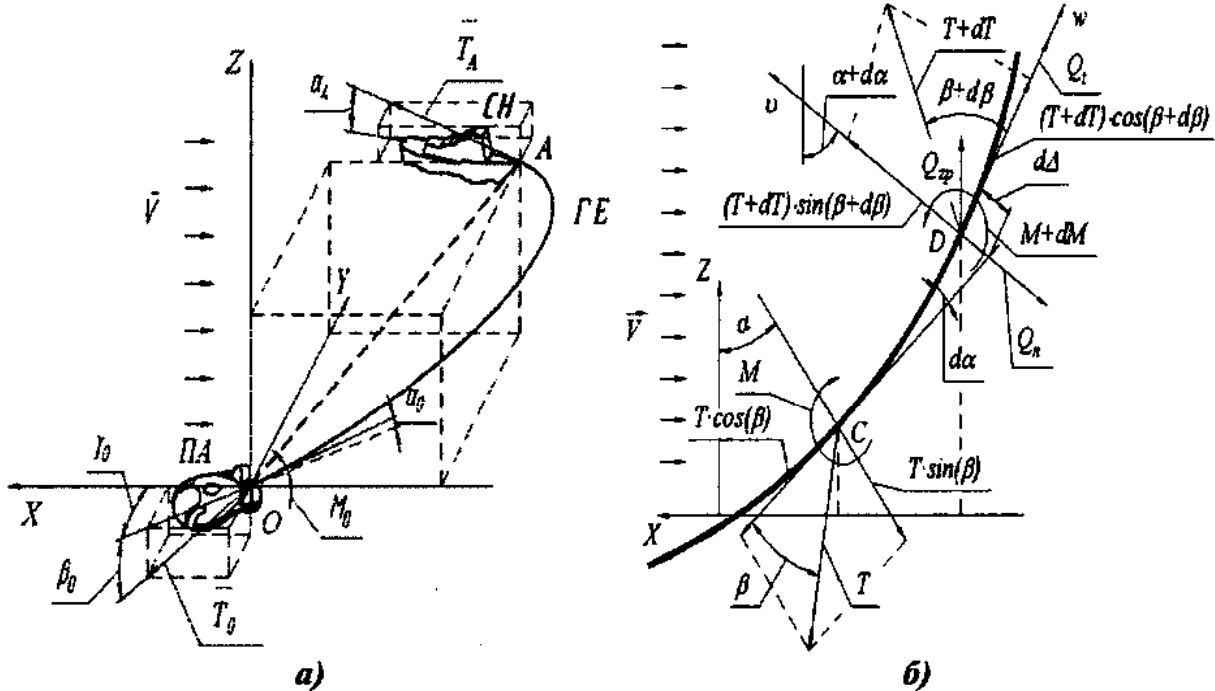


Рис. 1 Розподілення сил та моментів в системі ПА–ГЕ–СН

На кожному кроці розрахунку ведеться контроль похибки

$$\varepsilon = \sqrt{(dx - dx_{\Delta})^2 + (dz - dz_{\Delta})^2},$$

де $dx_{\Delta} = \sqrt{dl^2 - d\Delta^2} \cdot \cos(\alpha)$ і $dz_{\Delta} = \sqrt{dl^2 - d\Delta^2} \cdot \sin(\alpha)$ – координати нової точки, які розраховані з урахуванням прогину ГЕ. При перевищенні похибкою заданого рівня (в роботі $\varepsilon = 0,1$) вона усувається уточненням величини

$d\alpha$, яка розраховується з виразу $d\alpha = \frac{d\Delta}{dl}$.

Достовірність та точність моделі перевірені шляхом порівняння отриманих результатів для випадків, що були досліджені раніше, детально описані в науково-технічній літературі та підтверджені під час натурних випробувань та експлуатації ПА. Для визначення відносної та абсолютної похибки пропонуються вирази:

$$\Delta_{xz}' = \frac{\Delta_{xz}}{(X_{ROV}^2 + Z_{ROV}^2)^{1/2}} \cdot 100\%; \quad \Delta_L' = \frac{\Delta_{xz}}{L} \cdot 100\%;$$

$$\Delta_{xz} = \sqrt{(X_{ROV}^E - X_{ROV})^2 + (Z_{ROV}^E - Z_{ROV})^2} = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2}$$

де Δ_{xz}' – відносна координатна похибка визначення положення ПА; Δ_L' – відносна погонна похибка; Δ_x, Δ_z і Δ_{xz} – абсолютна похибка за координатами та загальна; X_{ROV} і Z_{ROV} – координати ПА відносно СН; X_{ROV}^E і Z_{ROV}^E – координати ПА, визначені за моделлю Ейлера.

Для виявлення впливу окремих параметрів на форму ГЕ та взаємне розміщення елементів системи СН-ГЕ-ПА при дослідженні виконується почергова їх зміна при сталих значеннях інших. Крок зміни параметра обирається в залежності від його впливу на зміну форми ГЕ і в більшості випадків складає 1-2 % від діапазону.

В розділі запропоновано вдосконалений узагальнений алгоритм проектування ППС. Його особливістю є врахування умов закріплення ГЕ, жорсткості на згинання його поперечного перетину та впливу на жорсткість гідростатичного тиску, що підвищує точність та достовірність отриманих результатів.

В третьому розділі наведено результати дослідження просторової форми ГЕ та величини похибки її визначення порівняно з класичною математичною моделлю гнучкого елемента, що є абсолютно гнучкою тілесною ниткою (моделлю Ейлера).

Для виконання дослідження об'єкти розділені на чотири групи, що обумовлюється особливостями врахування жорсткості ГЕ та характером і впливом зовнішнього навантаження: дослідження КТ, що входить до одноланкової ППС з оглядовим ПА; дослідження КТ, що входить до одноланкової ППС з робочим ПА; дослідження КТ, що входить до ППС, які працюють під високим гідростатичним тиском та мають суттєво нелінійну вісьову лінію в не навантаженому стані; дослідження ГЕ, що входять до складу СПТК і використовуються при виконанні ПТР.

Особливістю одноланкових ППС з робочими та оглядовими (при умові, що довжина кабель-троса перевищує 200-250 метрів) ПА полягає в застосуванні додаткових елементів, які розміщуються періодично по довжині ГЕ та змінюють значення його залишкової плавучості, в тому числі й для отримання нульової плавучості. Для врахування таких зосереджених навантажень, які мають періодичний закон прикладення до ГЕ, вперше запропоновано вдосконалену функцію, що відповідає всім вимогам до функції Дирака на одиничному відрізку та забезпечує задане значення залишкової плавучості для всієї довжини ГЕ.

За умови незмінності відстані між поплавками $h' = h = const$ та однотипності поплавків, тобто $F_z' = F_z = const$, запропоновано замінити функцію Дирака на більш зручну для інтегрування періодичну функцію

$$\Phi(l) = \frac{k_m \cdot \sqrt{\pi}}{a \cdot h} \cdot \exp \left\{ - \left[k_m \cdot \cos \left(\frac{\pi}{h} \cdot l_i \right) \right]^2 \right\}, \text{ де } k_m - \text{ коефіцієнт концентрації;}$$

$$a = \left[\int_0^h \frac{k_m \cdot \sqrt{\pi}}{h} \cdot \exp \left\{ - \left[k_m \cdot \cos \left(\frac{\pi}{h} \cdot l \right) \right]^2 \right\} \cdot dl \right]^{-1} - \text{ поправочний коефіцієнт.}$$

Особливістю запропонованої функції для визначення поправочного коефіцієнта a є її незалежність від зміни h (відстані між поплавками). Спрощена залежність поправочного коефіцієнта a від k_m при довільному h має вигляд

$$a = \frac{0,169}{k_m - 0,98}.$$

Розподілену силу ваги ГЕ в воді, в такому разі, можна визначити як

$$q_{zp}' = q_g' \cdot \left(\frac{k_m \cdot \sqrt{\pi}}{a \cdot h} \exp \left\{ - \left[k_m \cdot \cos \left(\frac{\pi}{h} \cdot l_i \right) \right]^2 \right\} - 1 \right), \text{ де } q_g' - \text{ питома погонна}$$

вага ГЕ. Водночас з цим питома густина ГЕ з додатковими поплавками $\rho_{ГЕ} = 1$ (ГЕ має нульову плавучість).

Однією з особливостей використання ГЕ в складі глибоководних ППС (1500...6000 м) є необхідність врахування впливу гідростатичного тиску на жорсткість поперечного перетину ГЕ на згинання - модуля Юнга. Аналіз показує,

що зміна величини модуля Юнга під дією гідростатичного тиску зумовлюється деформацією ізоляції провідників, захисних оболонок і збільшенням внутрішнього тертя. Модуль Юнга в математичній моделі ГЕ є функцією від гідростатичного тиску (вертикальної координати) - $E = f(z)$. Величина модуля Юнга гнучкого елемента, на ранніх стадіях проектування ППС, може бути визначена за розрахунком або експериментально.

Особливістю вказаної залежності є анізотропність характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення ізоляції та захисних оболонок ГЕ, і релаксаційні процеси, що залежать від величини і часу дії гідростатичного тиску та попередніх навантажень (передісторії). Це призводить до появи суттєвої нелінійності вісьової лінії ГЕ, яка в неробочому режимі (в ненавантаженому стані) намотана на лебідці, що знаходиться під дією гідростатичного тиску.

При суттєвій нелінійності ГЕ в не навантаженому стані рівняння його

вісьової лінії пропонується у вигляді $y(l) = R \cdot \cos\left(\frac{b}{R} \cdot l + \varphi\right)$, де R – діаметр

барабана лебідки; $b = 1.371$ – емпіричний коефіцієнт, отриманий методом підбору на основі аналізу величини похибки, який забезпечує зменшення похибки моделювання вісьової лінії ГЕ в не навантаженому стані; φ – фазовий

зсув. Довжина витравленої частини ГЕ $L = \int_l \sqrt{1 + 1.88 \cdot \sin^2\left(\frac{1.371}{R} \cdot l + \varphi\right)} \cdot dl$.

Зв'язок між кутом закріплення ходового кінця ГЕ на ПА та фазовим зсувом визначається рівнянням дотичної до вісьової лінії ГЕ в точці закріплення. З урахуванням обмеженості діапазону таких кутів, залежність можна визначити з виразу $\varphi_0 = \arcsin(\operatorname{tg}(\alpha_0))$, де α_0 – кут закріплення ходового кінця ГЕ на ПА. Область визначення запропонованої функції $-\pi/4 < \alpha_0 < \pi/4$, що повною мірою задовольняє вказаним вище вимогам.

У запропонованій математичній моделі необхідно врахувати, що $M = E \cdot J \cdot (p - p_0)$, де кривизна ГЕ в не навантаженому стані –

$$p_0 = -\frac{1.88}{R} \cdot \frac{\cos\left(\frac{1.371}{R} \cdot l\right) \cdot \sqrt{1 - \operatorname{tg}(\alpha_0)^2} + \sin\left(\frac{1.371}{R} \cdot l\right) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0)}{\left[1 + 1.88 \cdot \left[\sin\left(\frac{1.371}{R} \cdot l\right) \cdot \sqrt{1 - \operatorname{tg}(\alpha_0)^2} - \cos\left(\frac{1.371}{R} \cdot l\right) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0)\right]^2\right]^{3/2}}.$$

На основі запропонованих виразів в роботі виконано дослідження просторової форми ГЕ в залежності від величини зовнішнього гідростатичного тиску. Основними параметрами, на які впливає зміна тиску, є модуль Юнга та зовнішній діаметр ГЕ. На рис. 2 наведені результати дослідження. Цифрами 1, 2 та 3 на рис. 2, *а*) позначено лінії які відповідають модулям Юнга 1; 10 та 50 ГПа. На рис. 2, *б*) цифри 1 - 4 відповідають значенням сили натягу 50; 100; 250 та 500 Н.

Результати досліджень показують, що збільшення жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання під дією гідростатичного тиску має суттєвий вплив на форму ГЕ в потоці рідини, а зусилля, які забезпечуються рушіями ПА, повинні бути в десятки разів більшими порівняно з традиційними методами проектування (1,0 - 1,5 Н), і становитимуть не менше 50-100 Н.

Дослідження моделі ГЕ як складової дволанкової ППС шляхом урахування його конструктивних особливостей та жорсткості поперечного перетину на згинання в

умовах впливу розподілених і зосереджених навантажень показує, що його конструкція та жорсткість поперечного перетину на згинання

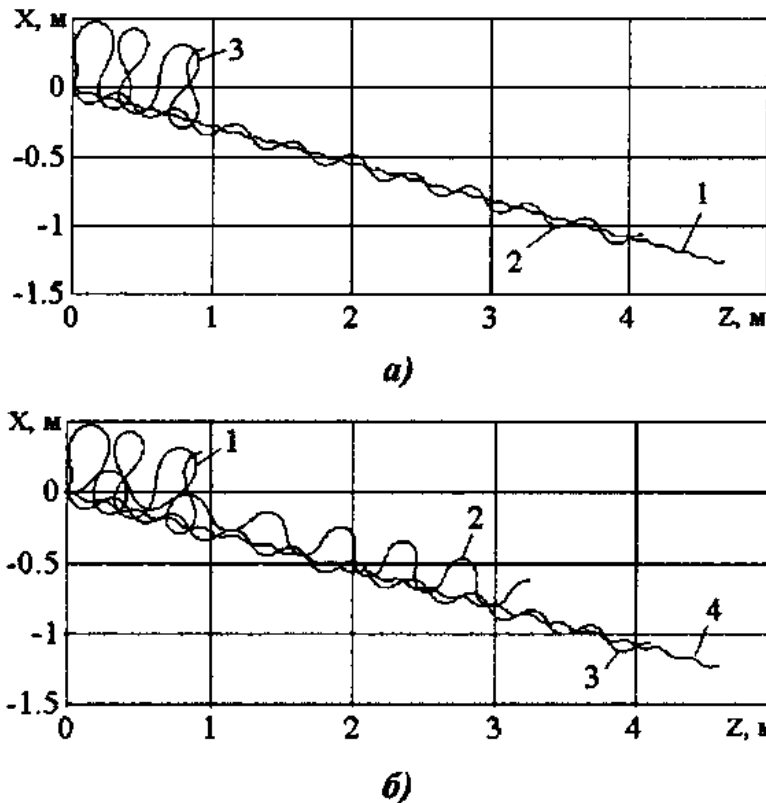


Рис. 2 Просторова форма ГЕ з суттєвою нелінійністю в не навантаженому стані при зміні модуля Юнга (а) та сили натягу (б)

ня суттєво впливають на форму прогину, а похибка визначення положення нижнього кінця гнучкого елемента, в залежності від співвідношення зовнішнього діаметра та величини прикладеного до нижнього кінця гнучкого елемента зосередженого навантаження, порівняно з моделлю Ейлера лежить в межах від 2-4 до 90-95 м.

В четвертому розділі виконано аналіз результатів дослідження та на основі принципів регресивного аналізу отримано параметричні залежності для визначення траєкторії переміщення ходового кінця ГЕ. При зміні модуля Юнга та

довжини витравленої частини ГЕ вирази мають вигляд

$$X(E, L) = A(L) \cdot \ln(E \cdot Pa^{-1}) + B(L) \text{ та } Z(E, L) = C(L) \cdot \ln(E \cdot Pa^{-1}) + D(L).$$

Коефіцієнти A , B , C та D як функції довжини ГЕ можуть бути визначені з графіків (рис. 3) або з виразів (значення коефіцієнтів обираються із табл. 1):

$$A(L) = a_4^4 \cdot L^4 - a_3^3 \cdot L^3 + a_2^2 \cdot L^2 - a_1 \cdot L - a_0;$$

$$B(L) = -b_4^4 \cdot L^4 + b_3^3 \cdot L^3 - b_2^2 \cdot L^2 + b_1 \cdot L - b_0;$$

$$C(L) = -c_4^4 \cdot L^4 - c_3^3 \cdot L^3 + c_2^2 \cdot L^2 - c_1 \cdot L + c_0;$$

$$D(L) = -d_4^4 \cdot L^4 + d_3^3 \cdot L^3 - d_2^2 \cdot L^2 - d_1 \cdot L - d_0.$$

Аналогічно отримані залежності для визначення координат ПА в залежності від інших параметрів, тобто $X = X(Y, L)$ та $Z = Z(Y, L)$, де Y – один із параметрів (α – кут прикладення вектора натягу в точці закріплення ГЕ на ПА; β – кут між вектором сили і дотичною в точці закріплення ГЕ на ПА; T – модуль вектора натягу ГЕ в точці закріплення; v – швидкість течії).

Таблиця 1

Коефіцієнт	Індекс коефіцієнта				
	4	3	2	1	0
a_i	$1,65 \times 10^{-3}$	$0,594 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	3,04
b_i	$3,66 \times 10^{-3}$	0,0106	0,0488	1,01	30,9
c_i	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$2,74 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-3}$	0,27
d_i	$5,42 \times 10^{-3}$	$12,7 \times 10^{-3}$	$35,6 \times 10^{-3}$	0,67	1,1

Перевірку достовірності отриманих результатів виконано шляхом визначення величини відхилення просторового положення ПА відносно СН, які отримані при дослідженні математичної моделі, що враховує вплив зовнішніх факторів, умов закріплення та конструктивні особливості ГЕ, в тому числі й жорсткості його поперечного перетину на згинання, та запропонованих рівнянь.

Математичні залежності, що отримані в роботі, складають теоретичне підґрунтя для розробки нових ППС, визначення їх сило-енергетичних, конструкційних та експлуатаційних характеристик на ранніх стадіях проектування таких підводних комплексів.

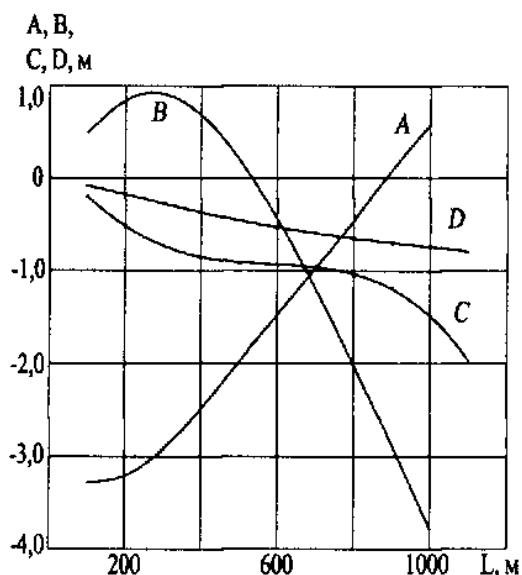


Рис. 3 Графіки для визначення координат ПА

В п'ятому розділі розглядаються результати впровадження теоретичних розробок автора в проектну практику при розробці нових ППС та їх окремих елементів. До основних результатів належить розробка ряду кабель-тросів і кабель-буксирів для ПА, які були розроблені в НУК, а також СПТК для доставки сипучих та рідких вантажів на морське дно, експериментальний зразок якого пройшов випробування в 1999 році на магістральному газопроводі Міссюяха-Норільськ (р. Снісей, Росія).

Особливістю кабель-тросів та кабель-буксирів, які входять до складу ППС, є використання сучасних високомолекулярних волокон (СВМ, Армос, Кевлар та ін.) для силового елемента та забезпечення поперечної та повздовжньої герметичності. Розробка конструкцій кабель-тросів та кабель-буксирів виконується з урахуванням сило-енергетичних та експлуатаційних характеристик ПА. Кабель-тросами та кабель-буксирами, які були розроблені автором і виготовлені ВАТ „Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості” (м. Бердянськ), укомплектовані всі ПА, які були розроблені чи знаходились на модернізації в НДІ підводної техніки НУК.

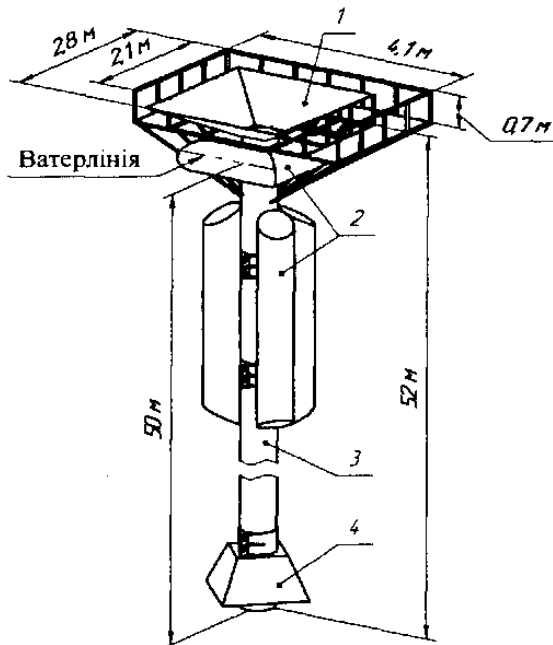


Рис. 4. Зовнішній вигляд СПТК

СПТК складається з бункера 1, поплавця 2, продуктопроводу 3 та захисного коробу з відеосистемою 4 (рис. 4). Бункер забезпечує можливість використання транспортера для завантаження матеріалу відсипки та деяку рівномірність подачі матеріалу в продуктопровід. Поплавець складається з одного чотирьохсекційного 2-тонного та чотирьох 3-тонних поплавців, які були розміщені у верхній частині пристрою. Така конструкція забезпечує близько однієї тонни залишкової плавучості. Продуктопровід, діаметром 720 мм та

довжиною 48 м, є каналом транспортування матеріалу відсипки і дозволяє точно направити його в робочу зону. Відстань в 2-3 метри між ґрунтом та нижнім кінцем продуктопроводу гарантувала безпеку виконання робіт.

В якості СН для СПТК використовувалась баржа, на яку був завантажений матеріал засипки - гравій, фракцією в 50-100 мм. Технологічний комплекс кріпився до СН тросами, що забезпечувало можливість його переміщення повздовж баржі. Поперечне відхилення забезпечувалось за допомогою буксирного тросу, що з'єднував нижній підводний кінець СПТК та допоміжний катер-буксир.

СН позиціонували над підводним трубопроводом за допомогою ехолота та фіксували за допомогою чотирьох гравітаційних якорів. Контроль за процесом відсипки виконувався за допомогою системи телеспостереження, встановленої на продуктопроводі під захисним коробом, та самохідного телекерованого підводного апарату „The North Star”.

На рис. 5 наведено результати моделювання ГЕ СПТК (лінія 1) з урахуванням його жорсткості на згинання та зміни зовнішнього діаметра і величини горизонтальної складової зосередженого навантаження, що прикладене до його нижнього кінця. Для порівняння на рисунку наведено результати, отримані при моделюванні ГЕ як стрижня та як абсолютно гнучкої тілесної нитки (модель Ейлера) - відповідно лінії 2 і 3. Початкові та крайові умови для всіх

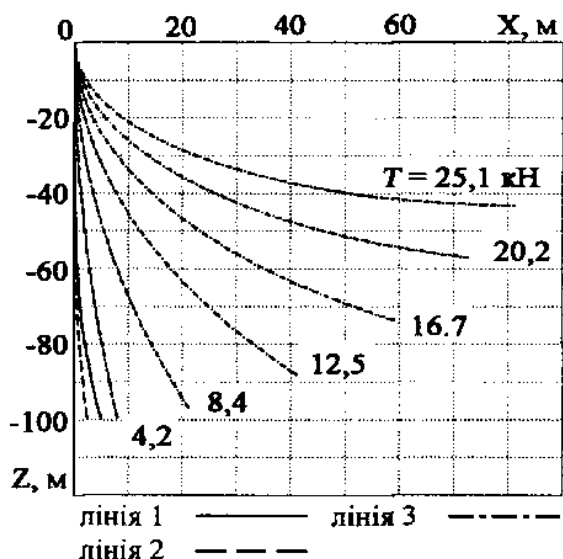


Рис. 5. Траєкторія переміщення ходового кінця СТПК

моделей прийняті однакові: зовнішні діаметри ГЕ $D = 250; 500; 750; 1000; 1250$ і 1500 мм та відповідні їм величини горизонтальної складової зосередженого навантаження $T = 4,2; 8,4; 12,5; 16,7; 20,2$ і $25,1$ кН, яке прикладене до ходового кінця ГЕ, та забезпечує його відхилення на $\Delta = 5$ м від вертикального положення на глибині $H = 100$ м; швидкість течії $0,3$ м/с; епюра течії – рівномірна за глибиною; питома густота води $\rho = 1025$ кг/м³.

Параметричні залежності для визначення траєкторії переміщення ходового кінця СТПК в залежності від упору рушіїв та довжини ГЕ мають вигляд

$$X(T, L) = S(L) \cdot \ln(T) + F(L); \quad Z(T, L) = J(L) \cdot \ln(T) + Y(L).$$

Коефіцієнти S, F, J, Y як функції довжини ГЕ визначаються з виразів (значення коефіцієнтів обираються з табл. 2):

$$\begin{aligned} S(L) &= s_4 \cdot L^4 + s_3 \cdot L^3 + s_2 \cdot L^2 + s_1 \cdot L + s_0; \\ F(L) &= f_4 \cdot L^4 + f_3 \cdot L^3 + f_2 \cdot L^2 + f_1 \cdot L + f_0; \\ J(L) &= j_4 \cdot L^4 + j_3 \cdot L^3 + j_2 \cdot L^2 + j_1 \cdot L + j_0; \\ Y(L) &= y_4 \cdot L^4 + y_3 \cdot L^3 + y_2 \cdot L^2 + y_1 \cdot L + y_0. \end{aligned}$$

Таблиця 2

Коефіцієнт	Індекс коефіцієнта				
	4	3	2	1	0
s_i	$1,65 \times 10^{-3}$	$0,594 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	3,04
f_i	$3,66 \times 10^{-3}$	0,0106	0,0488	1,01	30,9
j_i	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$2,74 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-3}$	0,27
y_i	$5,42 \times 10^{-3}$	$12,7 \times 10^{-3}$	$35,6 \times 10^{-3}$	0,67	1,1

Отримані результати складають теоретичне підґрунтя для розробки СПТК, визначення його сило-енергетичних, конструкційних та експлуатаційних характеристик на ранніх стадіях проектування таких комплексів.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень сформульовано чотири проектних завдання, які потребують обов'язкового врахування жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання:

визначення параметрів ППС і просторової форми ГЕ у потоці при відомих умовах закріплення ГЕ на СН і ПА та дії додаткового зосередженого навантаження, що має періодичний закон розподілення за довжиною ГЕ;

використання малогабаритних ПА на середніх і великих глибинах (1500...6000 м) у якості дистанційно-керованих пристроїв пошуку і спостереження для пілотованих ПА або інших спеціалізованих підводно-технічних систем;

проектування та експлуатація рухомих елементів підводної системи, до складу яких входять кабелі заборотної електрокомутації, а також ГЕ, які під дією зовнішніх сил змінюють свою просторову форму;

розробка спеціалізованих підводно-технологічних комплексів, до складу яких входять ГЕ - продуктопроводи для сипучих і рідких вантажів.

Визначено основні підходи до розв'язання прямої та зворотної задач механіки ГЕ та обґрунтовано основні напрями вдосконалення методів математичного моделювання ППС з ГЕ.

2. Вдосконалено математичну модель ГЕ, що входить до складу ППС, яка враховує вплив зовнішнього середовища (сили гідродинамічного опору ГЕ, зовнішні зосереджені та розподілені навантаження, гідростатичний тиск та ін.), умов закріплення ГЕ та реакції в опорах, конструкційні (жорсткість поперечного перетину на згинання, діаметр, довжина, залишкова плавучість та ін.) та експлуатаційні (кут закріплення вузла вводу ГЕ, кут прикладення та величина вектора упору рушіїв, швидкість переміщення та ін.) характеристики прив'язної підводної системи.

3. Вдосконалено узагальнений алгоритм проектування прив'язних підводних систем з урахуванням: жорсткості поперечного перетину ГЕ на згинання; умов закріплення; впливу зовнішнього середовища, в першу чергу, гідростатичного тиску та сил гідродинамічного опору; форми вісьової лінії в ненавантаженому стані та ін.

Розроблено програму та методику проведення досліджень математичної моделі ГЕ з урахуванням жорсткості його поперечного перетину на згинання.

4. Методом математичного моделювання встановлено, що жорсткість поперечного перетину ГЕ на згинання при жорсткому закріпленні ходового кінця (а також для випадків, які зводяться до жорсткого закріплення), суттєво впливає на сило-енергетичні характеристики та просторове положення елементів ППС. Величина похибки порівняно з результатами, які отримані при використанні математичної моделі Ейлера, сягає 40... 100 метрів. Таким чином, використання запропонованої математичної моделі підвищує достовірність проектних розрахунків упорів рушіїв підводного апарата на ранніх стадіях проектування ППС.

5. Запропоновано розподілення ППС на чотири групи, в залежності від особливостей врахування жорсткості їх ГЕ та характеру і впливу зовнішнього навантаження (одноланкові ППС з оглядовим ПА; одноланкові ППС з робочим ПА; ППС, які працюють під високим гідростатичним тиском та мають ГЕ з суттєво нелінійною віською лінією в не навантаженому стані та СПТК для транспортування сипучих та рідких вантажів), та досліджено кожен групу, що дало змогу виявити основні характерні особливості і розрахувати сило-енергетичні характеристики та конструктивні особливості ППС на ранніх стадіях їх проектування.

6. Для розрахунків робочої зони (траєкторії переміщення ходового кінця ПА) отримано аналітичні залежності в параметричній формі, які є функціями конструкційних (діаметра, жорсткості на згинання і довжини ГЕ) та експлуатаційних (упори рушіїв, швидкості переміщення) характеристик ППС, що дає змогу на ранніх стадіях проектування ППС уточнити основні конструкційні та експлуатаційні характеристики системи.

Максимальна величина похибки розрахунку, при використанні запропонованих аналітичних залежностей, для визначення робочої зони позиціонування ходового кінця ГЕ не перевищує 5% в порівнянні з результатами, які отримані при математичному моделюванні ГЕ з урахуванням жорсткості його поперечного перетину на згинання.

7. Розроблено принцип функціонування, структуру та склад спеціалізованого підводно-технологічного комплексу як морської інженерної споруди з ГЕ. Для розрахунків робочої зони (координат переміщення ходового кінця) в залежності

8. від конструкційних (діаметра, жорсткості на згинання і довжини ГЕ) та експлуатаційних (упори рушіїв, швидкості переміщення) характеристик СПТК отримано аналітичні залежності в параметричній формі, де координати ходового кінці є функціями від проектних та експлуатаційних характеристик.

9. Отримані результати використані: для ППС, що спроектовані та виготовлені колективом НДІ підводної техніки НУК в рамках держбюджетних та договірних науково-дослідницьких робіт, при проектуванні нових зразків ГЕ для ПА „Агент”, „МТК-200” та „Арго-Буй”, які розроблені безпосередньо автором; при розробці експериментального зразка СПТК для доставки сипучого вантажу при виконанні ремонтно-аварійних робіт на магістральному газопроводі Міссояха-Норільськ (р. Єнісей, Росія) та для підготовки студентів НУК, що навчаються за напрямом 0922 „Електромеханіка” по спеціалізації 8.092201.02 „Електрообладнання та автоматика підводно-технічних систем та комплексів” Міністерства освіти і науки України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нужний С.М. Дослідження впливу жорсткості гнучких елементів на їх форму для прив'язних підводних систем // Зб. наук, праць НУК. - Миколаїв, 2006. - Вип. 1 (406). – С. 33-44

2. Нужний С.М. Дослідження впливу додаткових поплавоків на форму гнучких елементів прив'язних підводних систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2006.- Вып. 1/2 (19).- С. 51-54.

3. Нужний С.М. Дослідження впливу жорсткості на форму прогину гнучких елементів спеціалізованих підводних технологічних комплексів// Восточно-европейский журнал передовых технологий - Харьков, 2006.- Вып. 3/2 (21).- С. 104-106.

4. Нужний С.М. Дослідження впливу високого гідростатичного тиску та жорсткості гнучких елементів на їх форму// Зб. наук, праць НУК. - Миколаїв, 2006. - Вип. 3 (408).- С 42-48.

5. Нужний С.М. Визначення просторового положення підводного апарату з урахуванням характеристик кабель-тросу// Зб. наук, праць НУК. - Миколаїв, 2006. - Вип. 4 (409).- С 61-65.

6. Блінцов В.С., Нужний С.М. Удосконалення теоретичних основ проектування підводних систем з гнучкими елементами// Восточно-европейский журнал передовых технологий.- Харьков, 2006 - Вып. 4/3 (22).- С. 15-19.

7. Нужный С.Н. Особенности проектирования кабель-тросов для малогабаритных самоходных привязных подводных аппаратов// Республиканський міжвідомчий науково-технічний збірник „Електромашинобудування та електрообладнання”. - Одеса. 1998-Вип. 51- С. 99-103.

8. Блинцов В.С., Нужный С.Н. К расчету кабель-троса привязной подводной системы // Зб. наук, праць УДМТУ. Миколаїв, 1999. — Вип. 1 (361). - С. 52-56.

9. S. Nuzhniy Accounting of flexural inflexibility of umbilical cable in calculations attitude of remotely operated vehicles/ Proceeding of the 5th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems. - Szczecin, 2001, vol.2, - p.499-504.

Особистий внесок здобувача у праці, що опубліковані у співавторстві: в роботах [6] і [8] автору належить аналіз існуючих математичних моделей ГЕ, удосконалення та дослідження математичної моделі ГЕ з урахуванням жорсткості його поперечного перетину на згинання.

АННОТАЦІЯ

Нужный С.Н. Усовершенствование теоретических основ проектирования привязных подводных систем с гибкими элементами. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 - Механика и конструирование судов. - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2006.

В диссертации рассматриваются вопросы усовершенствования теоретических основ проектирования привязной подводной системы, которая состоит из судна-носителя, гибкого элемента и дистанционно управляемого подводного аппарата. Пространственное положение элементов системы и размеры рабочей зоны зависят от условий закрепления гибкого элемента на подводном аппарате, влияния сосредоточенных и распределенных нагрузок, создаваемых внешней средой, а так же проектных и конструкционных характеристик привязной подводной системы. В диссертационной работе обоснованы пути повышения точности и достоверности математической модели гибкого элемента. Выявлена и исследована связь пространственной формы гибкого элемента: с жесткостью его поперечного сечения; условиями закрепления и реакциями в опорах; влиянием внешних сосредоточенных и распределенных нагрузок (сил гидродинамического сопротивления гибкого элемента, гидростатического давления, дополнительных поплавков и т.д.); конструктивными (диаметр, длина, остаточная плавучесть и т.д.) и эксплуатационными (угла закрепления узла ввода гибкого элемента, угла приложения и величины результирующего вектора упора движителей и т.д.) характеристиками системы.

Выявлено и исследовано влияние гидростатического давления на сило-энергетические характеристики и пространственную форму гибкого элемента при существенной нелинейности его осевой линии в ненагруженном состоянии.

Решена задача учета влияния сосредоточенных внешних нагрузок от дополнительных элементов, установленных периодически по длине на гибкий элемент.

Предложенный в работе усовершенствованный алгоритм проектирования привязных подводных систем позволяет учесть изгибную жесткость гибкого элемента, а так же влияние распределенных и сосредоточенных внешних нагрузок, приложенных к гибкому элементу.

Методом математического моделирования и регрессионного анализа получены аналитические зависимости для определения траектории перемещения подводного аппарата в зависимости от конструкционных и эксплуатационных характеристик привязной подводной системы и длины гибкого элемента.

Для решения задачи доставки сыпучих грузов на морское дно при выполнении гидротехнических работ и строительстве подводных объектов предложена структура и разработана конструкция специализированного подводно-технологического комплекса. Выполнены его исследования и предложены графические и аналитические зависимости для определения траектории его перемещения. Опытный образец комплекса изготовлен и прошел испытания при выполнении ремонтно-аварийных работ на магистральном газопроводе Миссояха-Норильск (р. Енисей, Россия).

Ключевые слова: привязная подводная система, подводный аппарат, гибкий элемент, изгибная жесткость.

АНОТАЦІЯ

Нужний СМ. Удосконалення теоретичних основ проектування прив'язних підводних систем з гнучкими елементами. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 - Механіка та конструювання суден. - Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2006.

Дисертація присвячена питанням удосконалення теоретичних основ проектування прив'язної підводної системи, яка складається з судна-носія, гнучкого елемента та дистанційно керованого підводного апарата. Обґрунтовано шляхи поліпшення точності та достовірності математичної моделі, показано та

досліджено зв'язок жорсткості на згинання поперечного перетину гнучкого елемента, гідростатичного тиску та інших конструкційних і експлуатаційних характеристик прив'язної підводної системи та зовнішніх навантажень з просторовою формою гнучкого елемента. Запропоновані математичні залежності для визначення траєкторії переміщення підводного апарата. Запропоновано конструкцію та досліджено спеціалізований підводно-технологічний комплекс для доставки сипучих вантажів на морське дно при проведенні гідротехнічних робіт та будівництві підводних об'єктів.

Ключові слова: прив'язна підводна система, підводний апарат, гнучкий елемент, жорсткість на згинання.

ABSTRACT

Nuzhniy S. Improvement of theory the designing fastened underwater systems with flexible elements. Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences on speciality 05.08.03 - mechanics and constructing of ships. - National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Mikolayiv, 2006.

The dissertation is devoted to questions of the improvement of theory the designing fastened underwater systems, that consists of ship-carrier, flexible element and remotely operated vehicle. Substantiated ways of improvement of exactness and validity of mathematical model, showing up and make an rigidity in bending of the transversal traversal of flexible element, hydrostatical pressure and other construction and operating descriptions the fastened underwater system and outward loadings with the spatial form of flexible element. Mathematical dependences are offered for determination the trajectory to moving the underwater vehicle. A construction is offered and make an investigation specialized underwater-technological complex for prompt delivery loads on sea-bottom during the leadthrough of hydro-technical works and building underwater sarcophaguses objects.

Keywords: the remotely operated vehicles, submarine vehicle, flexible element, inflexibility, rigidity in bending.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2506 від 25.05.2006

**Підписано до друку 25.12.2006 р. Папір офсетний. Формат 60x84/16
Гарнітура Тайме. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,8. Обл.-вид. арк. 0,8.
Тираж 100 прим. Зам. № 346.**

**Друкарня видавництва Національного університету кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5.**