

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

АНДРЕЙЧИКОВА ГАННА ЮРІЇВНА

УДК 629.5.028

**ДОВГОВІЧНІСТЬ КАНАТІВ БАГАТОЯКІРНИХ СИСТЕМ
ПОЗИЦІОНУВАННЯ СУДЕН ТА ЗАСОБІВ ОКЕАНОТЕХНІКИ З
УРАХУВАННЯМ ВІТРО-ХВИЛЬОВИХ УМОВ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бугасенко Борис Андрійович
Національний університет
кораблебудування
імені адмірала Макарова

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дихта Леонід Михайлович
Чорноморський державний
університет ім. Петра Могили,
м. Миколаїв

кандидат технічних наук, доцент
Душко Вероніка Ростиславівна
Севастопольський національний
технічний університет, завідувач кафедри
океанотехніки та кораблебудування

Захист відбудеться "___" _____ 2012 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

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

Автореферат розісланий "___" _____ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, доцент

Л.І. Коростильов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найбільшого поширення в світовій практиці набувають рятувальні, бурові, краново-монтажні, науково-дослідні, трубоукладальні, землечерпальні та інші судна океанотехніки, плавучі експлуатаційні системи, напівзанурювальні бурові установки, утримання яких над місцем функціонування та точкою буріння здебільшого виконується за допомогою багатоякірних систем позиціонування, в яких у якості якірних ліній використовують ланцюги, сталеві та синтетичні троси, а також складені, або комбіновані, канати.

Недооцінка систем утримання при проектуванні може бути причиною аварій, які, як показує практика, трапляються доволі часто. При чому для об'єктів заякоріння найбільше число аварій пов'язано з виходом установки за межі допустимого кола безпеки внаслідок дії зовнішнього навантаження і розтягуючих та ударних навантажень, в результаті чого нерідко трапляються випадки обриву якірних ліній. Особливо це стосується ланцюгів, що утримують плавучі об'єкти тривалий час. Під час експлуатації на поверхні ланцюга утворюється місцевий твердий наклепаний шар (кірка), який при розтягуючих навантаженнях, що виникають, а також при ударах легко дає тріщини, які поширюються в тіло ланок. Так з цієї причини в грудні 1999 р. стався обрив з'єднувальної ланки якірного ланцюга на судні "Нефтегаз-57".

Теоретичне підґрунтя дисертаційної роботи становлять праці вітчизняних та закордонних вчених в області проектування багатоякірних систем суден та інших плавучих об'єктів заякоріння. Із загальної теорії проектування таких засобів велике наукове і практичне значення мають роботи М.М. Александрова, К.Я. Капустина, П.П. Кульмача, А.С. Симоненко. Проблемам проектування багатоякірних систем присвячено праці Л.М. Дихти, Б.А. Бугаєнко, В.О. Некрасова, В.І. Макіна, О.А. Григор'євої, H.S. Sii, J. Wang, T. Rajesh Kannah, R. Natarajan, W.J. Staszewski, W. Raman-Nair, R.E. Baddour і ін. Однак досі немає єдиної розрахункової схеми, яка б дозволяла враховувати особливості усіх типів якірних ліній з можливістю перерахунку отриманих значень на багатоякірну систему в цілому.

Розподілом навантажень, що діють на корпусні конструкції суден та засобів океанотехніки, займалися такі вчені як Ю.А. Нецветаєв, В.В. Козляков, О.Є. Літонов, Ю.В. Плеханов, Н.Н. Рахманін та інші. Проте використання підходів, що запропоновано в їх працях, при розрахунках довговічності багатоякірних систем відсутнє. Недостатність науково обробленого статистичного матеріалу по відмовах багатоякірних систем при розрахунках довговічності в результаті того, що ці об'єкти експлуатуються у різних районах Світового океану і мають різноманітні технічні характеристики (калібр, довжина лінії, глибина акваторії, попередній натяг і ін.) обмежує використання загальновідомих методів теорії надійності. Як правило, дослідження довговічності проводять на лабораторних зразках, а не на реальних моделях в припущенні, що максимально можливе навантаження, яке може виникнути один раз в декілька десятків років, діє весь період експлуатації якірної лінії. Такий підхід прийнятний для разових навантажень, а для багатоциклових його придатність обмежена, оскільки спричиняє за собою великий запас міцності, а відповідно, значне збільшення маси. Аналогічний підхід використовується і в

спектральній теорії хвиль, де вважається, що хвилювання однієї заданої інтенсивності діє весь період роботи якірної системи.

Таким чином, виникає питання перетворення законів розподілу зовнішніх факторів, що діють на багатоякірну систему утримання плавучої споруди, в закон розподілу навантажень у якірній лінії протягом усього терміну експлуатації для конкретного району Світового океану, в результаті чого можливе оцінювання довговічності канатів при їх довготривалій роботі у будь-якому місці розташування об'єкта заякоріння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація включає результати досліджень, отриманих при виконанні науково-дослідної роботи за темою № 1710 "Втомна міцність гнучких елементів якірних систем об'єктів океанотехніки в умовах їх довготермінових стоянок у відкритому морі" (№ державної реєстрації 0109U002216). У вказаній роботі здобувач приймав участь як виконавець.

Мета і задачі наукового дослідження.

Метою дисертаційної роботи є дослідження особливостей циклічних навантажень якірних канатів багатоякірних систем суден та об'єктів океанотехніки та розрахункова оцінка довговічності якірних ліній при довготермінових стоянках у відкритому морі з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

Головна задача – теоретичне визначення довговічності якірних ліній за методом умовного спектра з можливістю вживання оцінки величин переміщень і зусиль як результатів перетворення стаціонарного випадкового процесу зовнішньої дії за допомогою динамічної системи на базі експериментальних даних по стендовим випробуванням електрозварних ланцюгів. Для її вирішення необхідно здійснити такі задачі дослідження:

1) обґрунтування можливості заміни нелінійних залежностей для проектування якірних ліній в діапазоні реальних значень зміни натягу в них – лінійними пружними зв'язками;

2) дослідження впливу маси якірних ліній на динамічну систему "плавуча споруда – якірний канат";

3) теоретичне визначення жорсткості складних (складених, з підвішеними вантажами і плавучістю) якірних ліній і всієї багатоякірної системи в цілому;

4) теоретична розробка методу заміни пружних якостей комплексу якірних ліній багатоякірної системи позиціонування одним умовним по дії зв'язком з узагальненим коефіцієнтом жорсткості по обраному напрямку;

5) проведення експериментального модельного дослідження динаміки багатоякірних систем позиціонування;

6) розрахунок втомної міцності якірних ліній систем утримання в умовах довготермінових стоянок у відкритому морі та створення комплексу методів та методик розрахунку довговічності канатів багатоякірних систем суден і об'єктів океанотехніки з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес функціонування багатоякірних систем позиціонування суден і плавучих засобів океанотехніки в умовах довготривалих стоянок у відкритому морі.

Предметом дослідження є оцінка довговічності канатів багатоякірних систем утримання суден та об'єктів океанотехніки з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації.

Основні гіпотези, прийняті в дисертаційній роботі:

1. Передбачається, що нелінійна залежність коефіцієнта жорсткості C якірної лінії може на відносно малих переміщеннях розглядатися як лінійна за умови, що ланцюгова лінія буде замінена пружним зв'язком жорсткістю C в діапазоні реальних значень параметрів багатоякірних систем.

2. Передбачається, що багатоякірна система позиціонування плавучих об'єктів може розглядатися як лінійна динамічна система, характеристики якої знаходять шляхом проекції жорсткостей якірних ліній, що входять у систему, на головний напрям зовнішньої дії.

3. Можливе вживання оцінки величин переміщень і зусиль як результатів перетворення стаціонарного випадкового процесу зовнішньої дії за допомогою лінійної динамічної системи.

Методи дослідження. Поставлені у дисертації задачі та проведені дослідження вирішено із застосуванням основних методів теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії надійності, теоретичної механіки та теорії корабля. Для формування та розв'язання задачі визначення жорсткісної характеристики одиночних якірних канатів та оцінки впливу маси якірної лінії на кінетичну енергію системи "плавучий об'єкт – якірний канат" застосовано метод ланцюгової лінії та методи теоретичної механіки для визначення кінетичної енергії системи. Аналіз статистичного матеріалу виконано із застосуванням математичної статистики. Для вирішення задачі отримання технічних та жорсткісних характеристик багатоякірної системи використано метод аналогії з узагальненим коефіцієнтом жорсткості. Оцінка нерегулярного впливу зовнішніх факторів на багатоякірні системи та розрахунок довговічності якірних канатів базується на методах спектрального аналізу, теорії ймовірностей, теорії хитавиці судна, теорії випадкових процесів та теорії надійності. Експериментальне дослідження динаміки проведено на базі методів моделювання. Для оцінки достовірності отриманих теоретичним та експериментальним шляхами результатів використано теорію подібності та розмінностей, елементарну теорію похибок і чисельний метод.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено метод зведення багатоякірного пристрою до динамічної системи, що має поле жорсткості, який дозволяє розглядати поведінку цієї системи по головному напрямку зовнішнього впливу як результат проекції на цей напрям жорсткостей окремих якірних ліній.

2. Вперше отримано метод оцінки впливу маси якірної лінії на кінетичну енергію системи "плавучий об'єкт – якірні канати", за допомогою якого було показано, що вплив маси якірної лінії з урахуванням приєднаних мас води порівняно з масою всієї плавучої споруди на кінетичну енергію системи незначний і лежить в межах 1...2 %.

3. Удосконалено стосовно до багатоякірних систем метод довготермінового спектра хвилювання і вітру з використанням повноімовірностної схеми, що

дозволило враховувати вітро-хвильові умови конкретного району експлуатації судна або об'єкта океанотехніки при стоянці у відкритому морі на термін до п'яти років.

4. Розроблено комплекс методів та методик оцінки довговічності якірних ліній при довготривалій стоянці об'єкта заякоріння у відкритому морі, що дозволив враховувати вітрові і хвильові характеристики місцеположення судна або об'єкта океанотехніки і пов'язане з ними накопичення втомних руйнувань в якірних лініях при експлуатації в різних районах Світового океану, при цьому використання для розрахунку циклічної міцності умовних спектрів морського хвилювання і вітру дозволяє отримати наближені до реальності результати, що дають можливість обґрунтовано змінювати практичний термін служби якірних ліній до їх заміни на новий комплект порівняно з тим, що регламентується технічними умовами.

Обґрунтованість та достовірність результатів дослідження обумовлена використанням відомих фізичних закономірностей та апробованих методів, підтверджується порівнянням з результатами, отриманими в працях провідних вчених у цій галузі; з результатами, одержаними чисельним методом та експериментальним шляхом на спеціальному модельному стенді, а також з результатами, отриманими при розрахунках за нормативними документами.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані автором результати мають як теоретичне, так і прикладне значення. Теоретичне значення полягає в тому, що вперше задачу проектування багатоякірних систем суден та об'єктів океанотехніки досліджено з використанням методу пружинної аналогії, що дозволило в лінійній постановці вирішити проблему знаходження коефіцієнту жорсткості в будь-якому напрямі дії зовнішньої сили, а шляхом оцінки впливу маси якірного каната на кінетичну енергію системи обґрунтувати спрощення розрахунків динаміки якірних ліній. Застосування методу умовного спектру при оцінках довговічності якірних ліній дозволило вирішити проблему невизначеності при розрахунках по максимальних навантаженнях і врахувати вітрові і хвильові характеристики району експлуатації об'єкта заякоріння при довготривалій стоянці у відкритому морі. Отриманий комплекс методів і методик дозволив оцінити довговічність канатів багатоякірних систем з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації судна або об'єкта океанотехніки з можливістю отримання показників довговічності за загальновідомою теорією надійності при відсутності науково обробленого статистичного матеріалу по відмовах якірних ліній пасивних систем утримання в необхідному об'ємі.

Прикладне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений комплекс методів та методик розрахунку довговічності канатів багатоякірних систем суден та об'єктів океанотехніки може бути інтегровано в різні програмні комплекси та використовуватися при реалізації вітчизняних проектів облаштування родовищ континентального шельфу, а також для внесення визначеності у призначенні термінів обов'язкової заміни якірних ліній суден та плавучих засобів океанотехніки.

Практичне використання результатів дисертаційної роботи відображено в актах впровадження в ВАТ "Чорноморсуднопроект" при проектуванні бурових та науково-дослідних суден, ХДЗ "Паллада" для удосконалення якірної системи плавучих доків та в Казенне підприємство "Дослідно-проектний центр

кораблебудування" при виконанні допоміжних розрахунків що до технічних пропозицій для замовників по кораблях типів МДК та рятувальних суден. Матеріали дисертаційної роботи застосовано в НДЧ НУК ім. адм. Макарова при виконанні держбюджетної теми, а також у навчальному процесі НУК при викладанні дисциплін "Океанотехніка", "Спеціальні пристрої транспортних та науково-дослідних суден" та при виконанні курсових, дипломних проектів і науково-дослідних роботах студентів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим комплексним дослідженням. Усі теоретичні та практичні результати дисертації було отримано здобувачем особисто. У працях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: [4] – методика оцінки довговічності якірних канатів пасивних систем утримання; [23] – створення бази даних технічних характеристик сучасних НПБУ; [24] – дослідження взаємозв'язку жорсткісних та лінійних характеристик складеного якірного канату багатоякірної системи позиціонування; [27] – розробка виразів для жорсткості складених якірних ліній; [29] – практична реалізація та побудова еквівалентного спектра морського хвилювання; [30] – розрахунок довговічності якірних ланцюгів на прикладі НПБУ "Шельф-1"; [31] – метод оцінки довговічності якірних канатів багатоякірних систем з врахуванням накопичення втомних руйнувань; [32] – розрахунок кількості циклів навантаження елементів системи позиціонування та параметрів навантаження якірних канатів НПБУ від вітру та хвилювання; [38] – опис процесу роботи установки для експериментального дослідження динаміки багатоякірних систем утримання; [90] – розробка стенда для експериментального дослідження динаміки багатоякірних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на Міжнародній науково-методичній конференції "Автоматизация судостроительного производства и подготовка инженерных кадров: состояние, проблемы, перспективы" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 26–27 червня, 2007 р.), на Міжнародній науково-технічній конференції "Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов (БМС–2007)" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 25–26 жовтня, 2007 р.), на Міжнародній науково-методичній конференції "Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 2008 р.), на форумі молодих науковців "Макаровські читання" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 15 травня, 2008 р.), на науково-методичній конференції професорсько-викладацького складу (Україна, м. Миколаїв, НУК, 25 квітня, 2008 р.), на IV науково-технічній конференції "Живучість корабля та безпека на морі" (Україна, м. Севастополь, 27–28 травня, 2009 р.), на науково-методичній конференції професорсько-викладацького складу (Україна, м. Миколаїв, НУК, 24 березня, 2010 р.), на Першій міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 15–17 вересня, 2010 р.); на Всеукраїнській конференції молодих учених та студентів "Проектування та технологія побудови суден та засобів океанотехніки" (Україна, м. Миколаїв, НУК, 16–18 травня, 2011 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 робіт, а саме: 11 статей у збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань, рекомендованих

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

ділянок лінії. Гілки, відмічені на рис. 1 пунктиром, відкидаються.

У реальній складеній якірній лінії частина може розглядатися як фіктивна (на рис. 1 показано пунктиром). Горизонтальна проекція фіктивної частини другої ділянки якірної лінії від точки A до точки 2 дорівнює

$$x_{A2} = \frac{T_{x0} \cdot \operatorname{arcsch} \left(\operatorname{sh} \left(\frac{q_1 x_{01}}{T_{x0}} \right) \right)}{q_2}, \quad (1)$$

де T_{x0} – попередній натяг в якірній лінії, кН; x_{01} – горизонтальна проекція першої ділянки складеної якірної лінії, м.

Вертикальна проекція фіктивної частини другої ділянки якірної лінії в проміжку від точки A до точки 2 і горизонтальна проекція другої ділянки згідно рис. 1 будуть відповідно визначені

$$y_{A2} = H + y_{A1} - y_1, \quad x_{12} = \frac{T_{x0}}{q_2} \cdot \operatorname{arcch} \left(\frac{y_{A2} q_2}{T_{x0}} + 1 \right),$$

де H – робоча глибина якірної стонки, м.

Довжини гілок складеної якірної лінії від точки A до точок 1 і 2 відповідно дорівнюють

$$s_{A2} = \frac{T_{x0}}{q_2} \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{q_2 x_{A2}}{T_{x0}} \right), \quad s_{A1} = \frac{T_{x0}}{q_1} \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{q_1 x_{A2}}{T_{x0}} \right).$$

Якщо до складеної якірної лінії прикріпити проміжний підвішений вантаж, то хід розрахунку залишається таким же, як і для складеної якірної лінії без вантажу, лише у формулі (1) з'являється додатковий член:

$$x_{A2} = \frac{T_{x0} \cdot \operatorname{arcsch} \left(\frac{Q \cdot \sqrt{1 + \operatorname{sh} \left(\frac{q_1 x_{01}}{T_{x0}} \right)}}{T_{x0} + q_1 y_1} + \operatorname{sh} \left(\frac{q_1 x_{01}}{T_{x0}} \right) \right)}{q_2},$$

де Q – вага підвішеного вантажу, Н.

Якщо до складеної якірної лінії підвісити проміжний плавучий буй (умова рівноваги при наявності плавучості $\bar{R}(T_1, T_2) = \bar{Q}$), тоді

$$x_{A2} = \frac{T_{x0}}{q_2} \operatorname{arcsch} \left(\operatorname{sh} \left(\frac{q_1 x_{01}}{T_{x0}} \right) - \frac{Q}{T_1 \cos(\arctg \alpha_1)} \right).$$

Розрахунок жорсткості C складеної якірної лінії проілюстровано на прикладі багатоякірної системи, що встановлено на напівзанурювальній плавучій буровій установці (НПБУ) катамаранного типу ("Zapata Concord" класу SS-2000), рис 2.

Таким чином, метод може бути використано для розрахунку жорсткості і геометричних характеристик одиночної складеної якірної лінії залежно від довжин ділянок, що складають неоднорідний якірний канат. Причому, в окремому випадку, метод може застосовуватися також і для розрахунку жорсткості одинарного якірного каната з однакою по довжині погонною масою. Слід відмітити, що дані

формули дозволяють отримати значення довжин обох ділянок канату у взаємозалежності одна від одної.

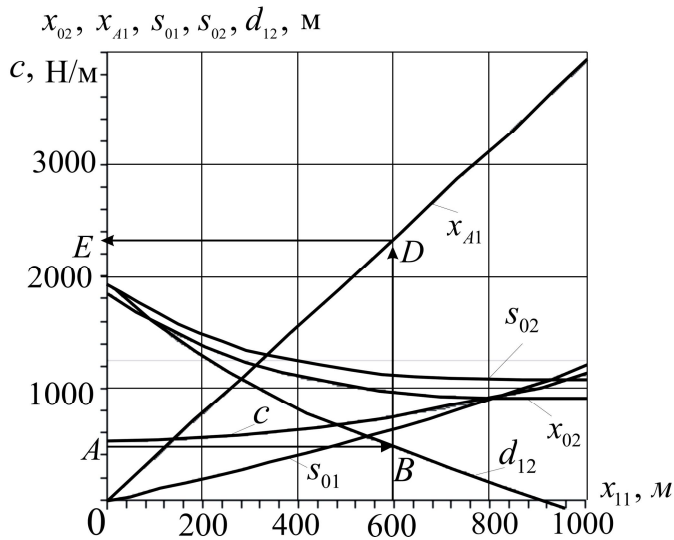


Рис. 2. Графіки залежностей характеристик якірної лінії від довжини першої ділянки (ланцюг) складеної лінії

У четвертому розділі розроблено методи розрахунку статичної і динамічної багатоякірних систем позиціонування, а саме: метод розрахунку жорсткості всієї якірної системи утримання з використанням узагальненого коефіцієнту жорсткості, зведення багатоякірної системи до системи в полі пружності в динамічних умовах,

врахування нерегулярного впливу зовнішніх факторів на пасивні системи (метод умовного, або еквівалентного, спектра).

Враховуючи той факт, що реальні переміщення плавучих споруд, що заякорені, мають достатньо вузький діапазон, можна показати, що при відносно малих переміщеннях графік жорсткісної характеристики може бути представлено прямолінійною ділянкою, що дає можливість замінити нелінійні залежності для проектування багатоякірних систем лінійними. Інакше кажучи, багатоякірну систему позиціонування в першому наближенні може бути зведено до маси, що розкріплена рядом пружних зв'язків, у якості яких виступають якірні лінії. І хоча якірна лінія має явно виражені нелінійні пружні властивості від переміщення точок кріплення, є усі підстави вважати, що на відносно невеликих переміщеннях ці властивості можуть бути достатньо точно лінеаризовані.

Оцінка впливу маси якірної лінії на кінетичну енергію багатоякірної системи. Оцінимо вплив маси канату на кінетичну енергію системи "плавучий об'єкт – якірна лінія". На рис. 3 показано таку систему, де V_0 – максимальна швидкість руху точок якірної лінії, м/с.

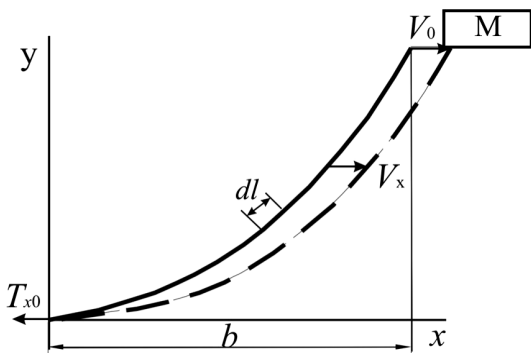


Рис. 3. Схема руху точок якірної лінії

Оскільки система, що розглядається, складається з плавучого об'єкта і якірної лінії, то її кінетична енергія дорівнює

$$T_{\Sigma} = T_{\kappa 1} + T_{\kappa 2},$$

де $T_{\kappa 1}$ – кінетична енергія плавучого об'єкта, Дж; $T_{\kappa 2}$ – кінетична енергія якірної лінії, Дж.

Вирази для кінетичної енергії плавучого об'єкта та якірної лінії відповідно

$$T_{\kappa 1} = \frac{MV_0^2}{2}, \quad T_{\kappa 2} = \int_0^l \frac{m_y V_x^2}{2} dl,$$

де M – маса плавучого об'єкта, кг; l – повна довжина якірної лінії, м; m_u – маса одиниці довжини якірної лінії, кг/м; dl – одиничний елемент лінії, м; V_x – швидкість переміщення одиничної ділянки якірної лінії, м/с.

Визначимо, на стільки необхідно збільшити масу плавучого об'єкта, щоб отримати масу системи "плавучий об'єкт – якірна лінія". Інакше кажучи

$$T_{\Sigma} = T_{k1} (1 + \text{otn}),$$

де otn – відношення кінетичної енергії якірної лінії до кінетичної енергії плавучого об'єкта, яке знайдеться з виразу

$$\text{otn} = \frac{\left(\frac{ql}{g} + \lambda_2 \right)}{b^2 (m_o + \lambda_1)} \int_0^b \frac{x^2}{\cos \left(\arctg \left(\sinh \left(\frac{qx}{T_{x0}} \right) \right) \right)} dx, \quad (2)$$

де q – погонна вага якірної лінії, кН/м; b – горизонтальна проекція лінії, м; m_o – маса плавучого об'єкта, кг; λ_1 – приєднана маса плавучого об'єкта, кг; λ_2 – приєднана маса всієї якірної лінії, кг.

Було проведено чисельний аналіз впливу маси на кінетичну енергію (вираз (2)). У якості установки для дослідження взято НПБУ "Шельф-1" з кількістю якірних ліній рівною 8. Проведене дослідження показало, що вплив маси якірної лінії на кінетичну енергію системи малий і лежить в межах 1...2 %, а у багатьох випадках і значно нижче 1 %. Це дозволяє використовувати в практичних розрахунках метод пружинної аналогії з використанням узагальненого коефіцієнта жорсткості по обраному напрямку дії сили. При цьому слід відмітити, що жорсткість пружного зв'язку, до якого зводиться якірна лінія, оказується залежною від погонної ваги канату.

Розрахунок жорсткості багатоякірної системи в цілому. Розглянемо багатоякірну систему якірних ліній. Показником, що характеризує пружні властивості цієї системи, може служити узагальнений коефіцієнт жорсткості (жорсткість) по заданому горизонтальному напрямку. Скориставшись так званим методом пружинної аналогії (суть якого розглянуто нижче), зведемо розрахункову схему (рис. 4) складної багатоякірної системи до випадку кріплення матеріальної точки до n пружин. В початковому положенні система знаходиться в рівновазі (початок координат розташуємо в рівноважному положенні центра мас плавзасобу, в якому умовно зосереджено уся його масу). Дамо точечній масі m кінцеве переміщення u по довільній осі $O_u u$. Тоді на неї буде діяти поновлююча сила F_u , що направлена до положення рівноваги O_u (див. рис. 4). Ця сила буде дорівнювати сумі проекцій реакцій всіх зв'язків на вісь $O_u u$.

Реакція однієї якірної лінії за модулем

$$F_i = P_{0i} + C_i \Delta b_i, \quad (3)$$

де Δb_i – подовження пружинного зв'язку, м, що визвано переміщенням точки m ; C_i – коефіцієнт жорсткості кожної пружини, Н/м; b_i – довжина пружинного зв'язку в рівноважному стані, м; P_{0i} – попередній натяг кожного з них, Н.

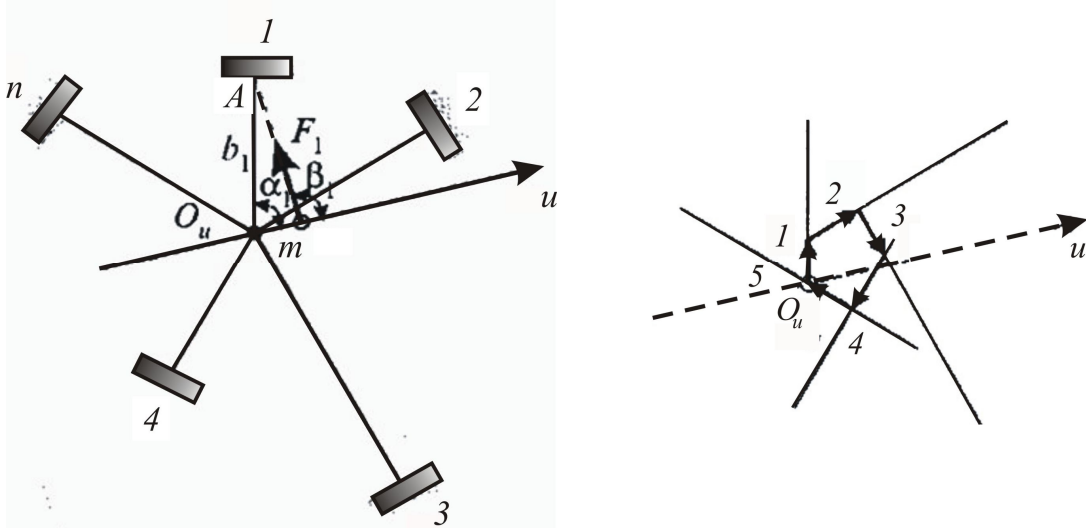


Рис. 4. Рівноважне положення плавучого об'єкта з багатоякірною системою позиціонування

Проекція реакції першого зв'язку на вісь $O_u u$ (див. рис. 4)

$$F_{1u} = -F_1 \cos(\pi - \beta_1) = -(P_{01} + C_1 \Delta b_1) \cos(-\beta_1) = (P_{01} + C_1 \Delta b_1) \cos(\beta_1). \quad (4)$$

Для будь-якого з n зв'язків можна отримати вирази, що аналогічні (4). Тоді узагальнена реакція всіх якірних ліній знаходиться наступним чином

$$F_u = \sum_{i=1}^n F_{iu} = \sum_{i=1}^n (P_{0i} + C_i \Delta b_i) \cos \beta_i. \quad (5)$$

Узагальнений коефіцієнт жорсткості багатоякірної системи за напрямом $O_u u$ знайдемо, взявши похідну від (5) по u

$$C_u = \frac{\partial F_u}{\partial u} = \sum_{i=1}^n \left[C_i \frac{(b_i \cos \alpha_i - u)^2}{b_i^2 + u^2 - 2b_i u \cos \alpha_i} + \frac{P_{0i} + C_i (\sqrt{b_i^2 + u^2 - 2b_i u \cos \alpha_i} - b_i)}{\sqrt{b_i^2 + u^2 - 2b_i u \cos \alpha_i}} \left(1 - \frac{(b_i \cos \alpha_i - u)^2}{b_i^2 + u^2 - 2b_i u \cos \alpha_i} \right) \right]. \quad (6)$$

Очевидно, при відносно малих u (порівняно з b_i) приблизно коефіцієнт жорсткості по (6) можна прийняти

$$C_u = \sum_{i=1}^n \left[C_i \cos^2 \alpha_i + \frac{P_{0i}}{b_i} (1 - \cos^2 \alpha_i) \right]. \quad (7)$$

На основі виразів (3)–(7) було побудовано полярні діаграми жорсткості якірних ліній для різних прикладів (рис. 5).

Визначення умовного спектру морського хвилювання та вітру. Відмітимо, що на якірні лінії багатоякірних систем плавучих споруд діють наступні зовнішні фактори: хвилювання, вітер та течія. Нижче буде розглянуто врахування нерегулярного впливу хвилювання та вітру з урахуванням конкретних вітро-хвильових умов місця розташування плавучого засобу, при цьому вплив течії на багатоякірні системи розраховується за загальновідомими методами, і в результаті можна отримати результуючу впливу, яку і беремо для подальших розрахунків динаміки.

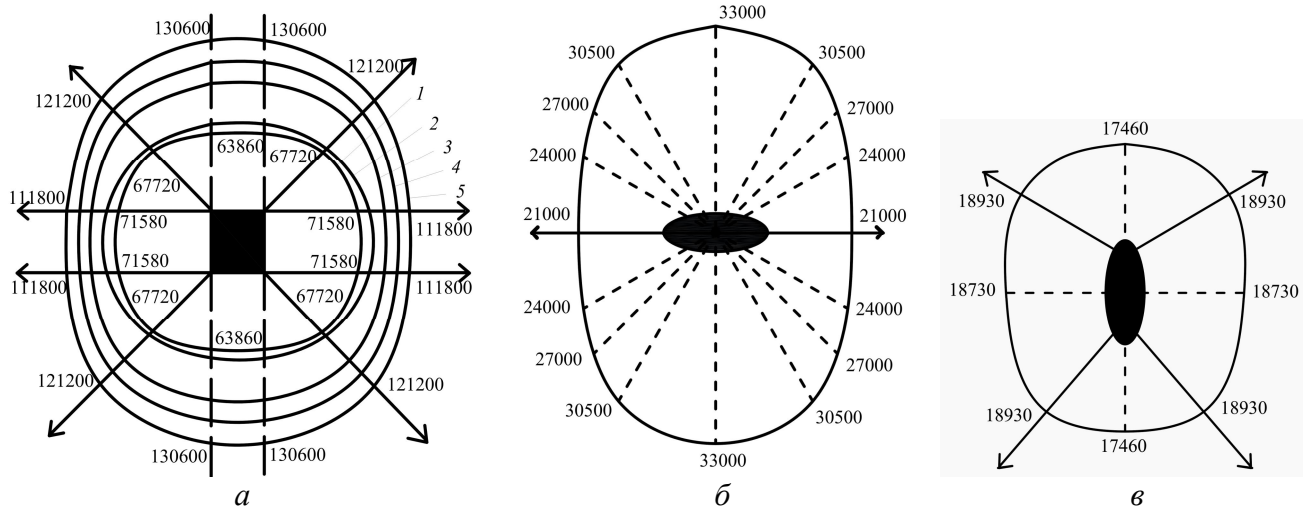


Рис. 5. Полярні діаграми жорсткості, в Н/м, системи якірних ліній в статичній постановці задачі при різному напрямі дії зовнішнього впливу: *a* – НПБУ "Zane Barnes":

1 – $T_{x0} = 1500$ кН; 2 – $T_{x0} = 2000$ кН; 3 – $T_{x0} = 2500$ кН; 4 – $T_{x0} = 3000$ кН; 5 – $T_{x0} = 3500$ кН;

б – десантного корабля; *в* – рятувального судна "Осьминог"

Слідуючи загальній схемі Козлякова – Плеханова стосовно розрахунків довговічності суднових конструкцій, введемо поняття довготермінового розподілення хвильового спектру для позиціонування суден та засобів океанотехніки. У цій роботі його названо умовним спектром морського хвилювання. Звернемо увагу на відмінність розрахункового хвильового режиму для оцінки довговічності суднових конструкцій (необхідність подолання навіть в одному рейсі до 10 районів з різними вітро-хвильовими умовами, що істотно ускладнює процес визначення результуючої довготермінового хвильового спектру) від аналогічного для багатоякірних систем, для яких характерно довготривале використання якірного пристрою спеціальних суден та засобів океанотехніки в одному вітро-хвильовому районі експлуатації протягом місяців та років.

Найповніші відомості по практично всіх районах морів і океанів для різних сезонів року зосереджено в довідкових даних Регістра СРСР "Ветер и волны в океанах и морях". Прямі методи визначення спектральної щільності по реалізаціях хвилювання або з використанням кореляційної функції не можуть бути застосовані. У якості виходу було запропоновано замінити сукупність всіх дій хвилювання різної інтенсивності з різними відповідними кожному ступеню хвилювання спектральними щільностями, дією хвилювання однієї спектральної щільності, свого роду *еквівалентній* вихідній сукупності, або умовній. У якості критерію такої "еквівалентності" прийнято рівність енергетичних характеристик хвилювання, критерієм якої служить квадрат амплітуд хвиль.

За даними повторюваності та забезпеченості висот і періодів хвиль для конкретного району моря знаходяться енергетично еквівалентне математичне очікування висоти та періоду умовного хвилювання, що розраховується,

$$\bar{h} = \sqrt{\sum_n h_{cpi}^2 P_{hi}}, \quad \bar{\tau} = \sum \tau_{cpi} P_{\tau i}, \quad (8)$$

де n – кількість інтервалів; h_{cpi} – середня висота в інтервалі, м; P_{hi} – імовірність висоти в інтервалі; $\tau_{cpi}, P_{\tau i}$ – середній період, с, та імовірність періоду в інтервалі відповідно.

Визначивши параметри (8), отримуємо необхідні дані для побудови спектральної щільності умовного розрахункового хвилювання за відомими залежностями (Пірсона-Московіца і ін.).

Розглядаючи багатоякірну систему утримання судна або плавучого об'єкта океанотехніки як лінійну динамічну систему, що перетворює хвилювання в натяг якорних ліній, досить просто можна одержати закон розподілу натягів в них. Він буде нормальним (є найбільш прийнятним для визначення циклічної міцності якорних ліній з накопиченням втомних руйнувань) з дисперсією і маточікуванням, визначеними по відомих залежностях теорії випадкових процесів. Математичне очікування m_T буде дорівнювати попередньому натягу в якорній лінії. Тоді закон розподілу зусиль в якорній лінії

$$f(T, \bar{h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_T(\bar{h})}} \exp\left[-\frac{(T - m_T)^2}{2D_T(\bar{h})}\right]. \quad (9)$$

Дисперсія натягу в якорному канаті

$$D_T = \int_0^\infty \left| \Phi_{\zeta \rightarrow T}(\omega) \right|^2 S(\omega) d\omega, \quad (10)$$

де $\left| \Phi_{\zeta \rightarrow T}(\omega) \right|$ – модуль частотної характеристики, а $S(\omega)$ – еквівалентна спектральна щільність хвилювання.

Для знаходження модулю частотної характеристики запишемо рівняння руху маси плавучого засобу відносно вісі Ox (рис. 6) у вигляді:

$$M \ddot{x} + C_x^2 x = F_x, \quad (11)$$

де M – маса плавучого засобу, кг; C_x – жорсткість багатоякорної системи, Н/м; F_x – сума проекцій на вісь Ox усіх зовнішніх сил, що діють на плавучий засіб, Н.

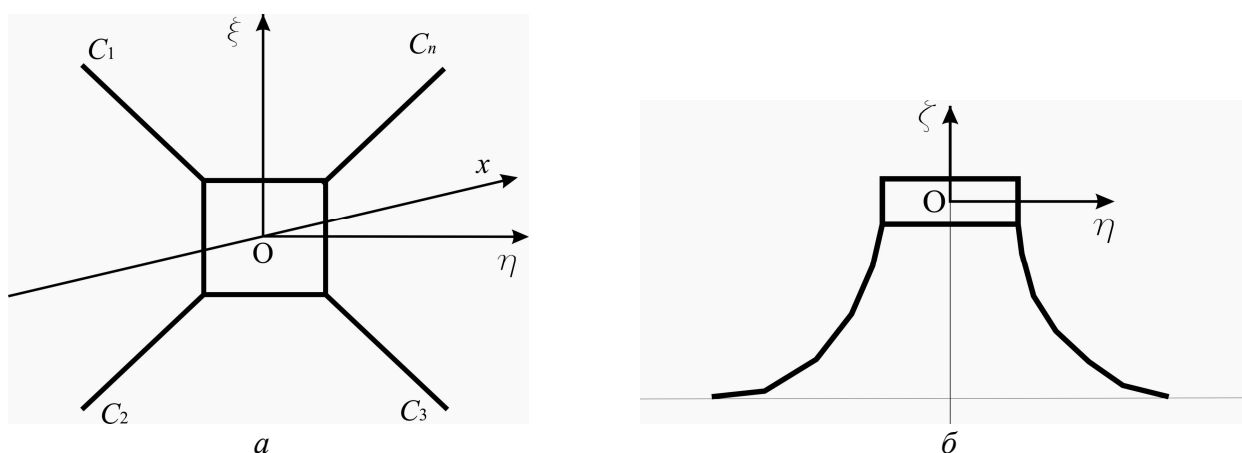


Рис. 6. Схема постановки НПБУ з якорною системою утримання:
а – вигляд в плані; б – вигляд збоку

Приймаємо, що НПБУ розташовано лагом до напрямку дії сили від вітру та хвилювання. У цьому випадку горизонтальне зусилля від дії зовнішнього фактору в позначеннях теорії корабля:

$$F_{\eta} = \zeta_0 \omega^2 \left(k_{\eta}^{\text{гл}} M + k_{\eta}^{\text{ін}} \right) \sin \omega t - \lambda_{22} \ddot{\eta}_g - \mu_{22} \dot{\eta}_g - \lambda_{24} \ddot{\theta}, \quad (12)$$

де ζ_0 – амплітуда хвилювання, м; ω – частота хвилювання, с^{-1} ; λ_{22} – приєднана маса води плавзасобу в напрямі вісі $O\eta$, кг; λ_{24} – приєднаний статичний момент відносно поздовжньої вісі плавучого засобу, м^3 ; μ_{22} – коефіцієнт опору поперечним переміщенням плавучого засобу з урахуванням його приєднаної маси води в напрямку Ox ; $k_{\eta}^{\text{гл}}$ та $k_{\eta}^{\text{ін}}$ – редукційні коефіцієнти до головної та інерційної складових обурюючої сили; η_g – поперечне переміщення центру мас плавучого засобу, м; θ – кут крену, рад.

Враховуючи, що демпфування оказує слабкий вплив на хитавицю НПБУ, то приймаємо $\mu_{22} = 0$. Нехтуючи впливом бортової хитавиці та демпфуванням на поперечні переміщення НПБУ, а також враховуючи, що хвильовий профіль описується залежністю $\zeta_b = \zeta_0 \cos \omega t$, перетворимо вираз (12) до вигляду

$$(M + \lambda_{22}) \ddot{\eta}_g + C_{\eta}^2 \eta_g = -\omega \zeta_b \left(k_{\eta}^{\text{гл}} M + k_{\eta}^{\text{ін}} \lambda_{22} \right), \quad (13)$$

де C_{η} – узагальнений коефіцієнт жорсткості багатоякірної системи в напрямку вісі $O\eta$, Н/м.

Передаточна функція лінійної динамічної системи, що описується лінійним диференціальним рівнянням другого порядку (11), із (13) буде дорівнювати

$$|\Phi(i\omega)| = \frac{b_1 \omega}{a_0 - a_2 \omega^2} = \frac{\omega \left(k_{\eta}^{\text{гл}} M + k_{\eta}^{\text{ін}} \lambda_{22} \right)}{C_{\eta}^2 - (M + \lambda_{22}) \omega^2} = k_m \frac{\omega^2}{k_{\eta}^2 - \omega^2}, \quad (14)$$

де власна частота поперечних коливань плавучого засобу з якірною системою утримання та коефіцієнт відповідно:

$$k_{\eta} = \sqrt{\frac{C_{\eta}^2}{M + \lambda_{22}}}, \quad k_m = \frac{k_{\eta}^{\text{гл}} M + k_{\eta}^{\text{ін}} \lambda_{22}}{M + \lambda_{22}}.$$

Ситуація з побудовою вітрових спектрів аналогічна той, що описано вище для хвилювання. За даними повторюваності та забезпеченості швидкостей вітру для конкретного району моря знаходимо математичне очікування швидкості

$$\bar{u} = \sum u_{cpi} \cdot P_{ui}, \quad (15)$$

де u_{cpi} , P_{ui} – середня швидкість, м/с, і імовірність швидкості в інтервалі відповідно.

Величину, що отриману по (15), вносимо до виразу енергетичного спектру вітру (Давенпорта, Харріса і ін.) та будуємо умовну спектральну щільність вітру.

У якості прикладу для розрахунку умовних спектрів хвилювання та вітру взято НПБУ "Шельф-1" (рис. 7).

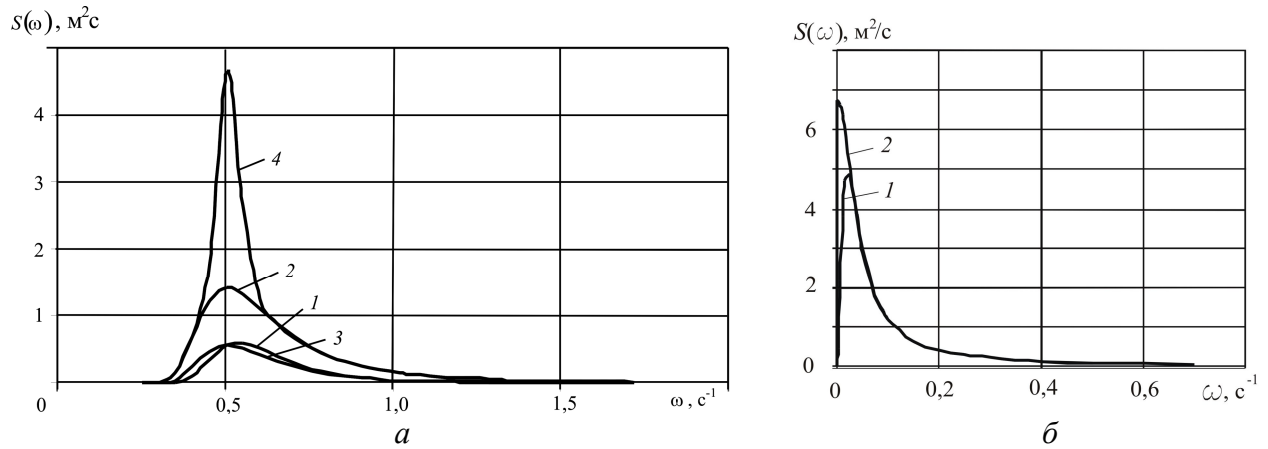


Рис. 7. Умовні спектри: *a* – морського хвилювання для району І Чорного моря за рік на основі залежностей спектрів: 1 – Ю.М. Крилова; 2 – Пірсона–Московіца; 3 – А.І. Вознесенського і Ю.А. Нецветаєва; 4 – JONSWAP; *б* – вітру за рік для району І Чорного моря на основі залежностей спектрів: 1 – Давенпорта; 2 – Харріса

У п'ятому розділі було проведено експериментальне дослідження динаміки багатоякірних систем утримання. В розділі експериментально оцінюються прийняті в дисертаційній роботі гіпотези, які було наведено на початку.

Для моделювання було розроблено схему експериментальної установки, аналогічну розрахунковій схемі, яку наведено на рис. 8, що описується математичною моделлю розділу 4, де система "плавуча споруда – якірні лінії" замінюється наступною: вертикальна штанга, що відхиляється на кут φ , з рухомих вантажем (переміщується уздовж осі штанги), на верхньому кінці якої закріплено пружні зв'язки (якірні лінії) жорсткістю C .

Проекція сили ваги на дотичну x до траєкторії руху вантажу $F_g = -mg \sin \varphi$, де m – маса вантажу, що підвішено, кг; φ – кут відхилення системи від положення рівноваги, рад.

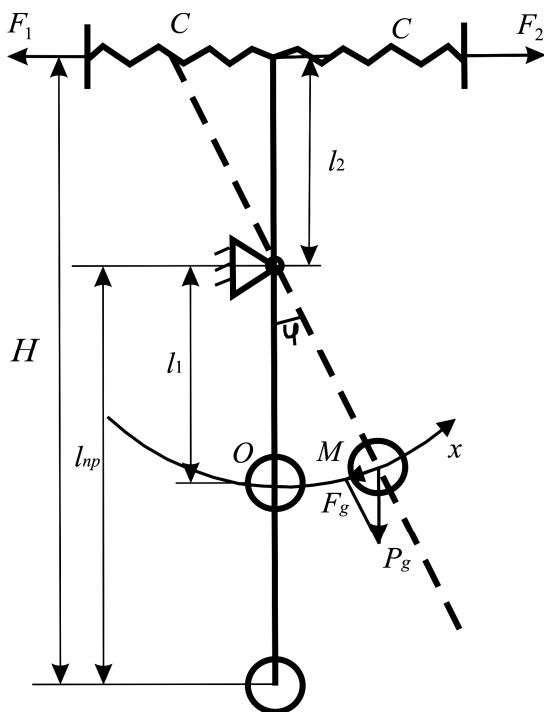


Рис. 8. Розрахункова схема

Проекція сили, яка діє зі сторони якірних ліній,

$$F_c = F_1 - F_2, \quad F_c = -2Cl_2 \sin \varphi,$$

де F_1, F_2 – проекції сил, що діють зі сторони лівого та правого пружного зв'язків відповідно, Н.

Диференціальне рівняння руху такої системи (див. рис. 8) запишеться так

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\varphi}{dt} + \frac{mgl_1}{I} \left(1 + \frac{2Cl_2^2}{mgl_1} \right) \sin \varphi = 0. \quad (16)$$

Критерієм механічної подібності є число Ньютона і умова моделювання полягає у тому, що

$$Ne_n = Ne_m, \quad \text{тобто} \quad \frac{F_n t_n^2}{m_n l_n} = \frac{F_m t_m^2}{m_m l_m}, \quad \frac{T_{x0} t_n^2}{q_n s_n} = \frac{t_{x0} t_m^2}{q_m s_m},$$

де F – сила, Н; t – час, с; m – маса, кг; l – характерний лінійний розмір, м; q_n – погонна вага натурної якірної лінії, Н/м; q_m – погонна вага моделі якірної лінії, Н/м; s_n, s_m – довжини натурної лінії і моделі відповідно, м; t_{x0} – горизонтальна проекція натягу моделі, Н. Індекс "н" відповідає величинам, що відносяться до натурному об'єкта, "м" – до моделі.

При моделюванні інерційні властивості системи "плавучий об'єкт – якірні лінії" враховано шляхом збільшення маси моделі плавучої споруди на величину її приєднаних мас води в горизонтальному напрямі, а приєднані маси води якірних ліній (інерційні властивості канатів) враховано через їх додавання також до маси самої плавучої споруди. При цьому впливом демпфування на поперечні коливання системи нехтуємо, оскільки воно фактично не має практичного значення в режимі буріння НПБУ.

Після проведених розрахунків було одержано два варіанти експериментальної установки для дослідження динаміки якірної системи позиціонування плавучої споруди, яка може складатися з двох і більше якірних ліній (на яку було одержано патент України на корисну модель № 57969 "Стенд для експериментального дослідження динаміки якірних систем позиціонування"), де перший варіант застосовується для підтвердження першої вищевикладеної гіпотези – бере участь дві якірні лінії; другий – для підтвердження другої прийнятої в дисертації гіпотези – бере участь чотири якірних лінії (при чому для даного випадку моделювання у якості якірних ліній було використано ланцюги (рис. 9).

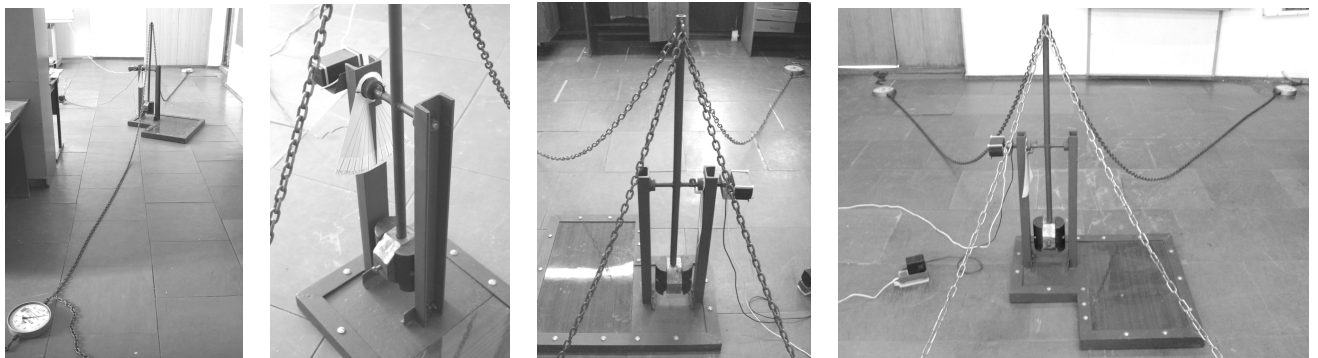


Рис. 9. Експериментальний стенд для дослідження динаміки багатоякірних систем позиціонування

Після попереднього розрахунку усіх необхідних величин моделі було проведено експериментальне дослідження динаміки багатоякірних систем позиціонування на дослідному стенді. Далі було вирішено теоретичним шляхом рівняння (16) для усіх дослідних випадків і побудовано графіки затухаючих коливань, на які було нанесено результати експерименту для порівняння отриманих результатів (рис. 10, 11). Для теоретичного розрахунку рівняння було використано чисельний метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Критерієм, який підтвердив прийняті гіпотези, було співпадання теоретичної і експериментальної кривих коливань.

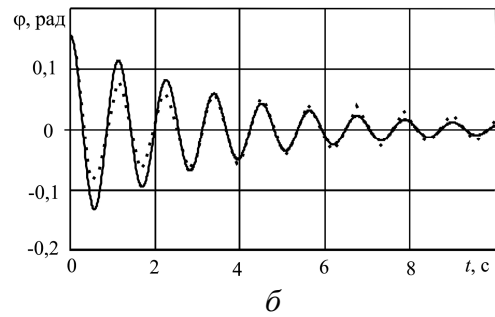
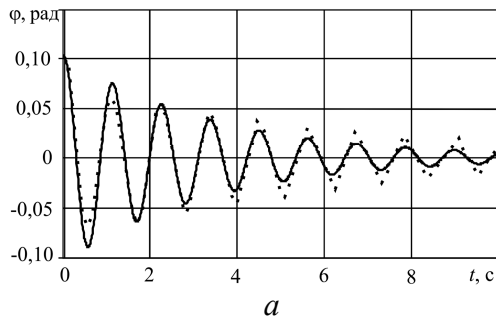


Рис. 10. Порівняння кривих коливань 2 ланцюгів, отриманих теоретичним (суцільна лінія) та експериментальним (точкова лінія) шляхами: $a - \varphi_0 = 6^\circ, t_{x0} = 25$ Н; $b - \varphi_0 = 9^\circ, t_{x0} = 25$ Н

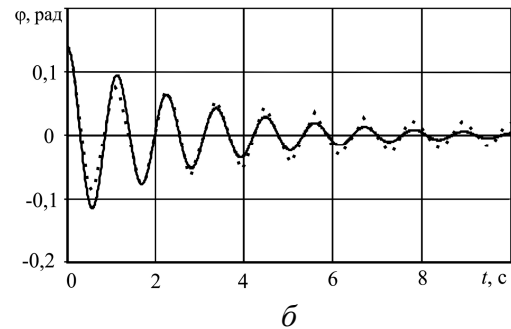
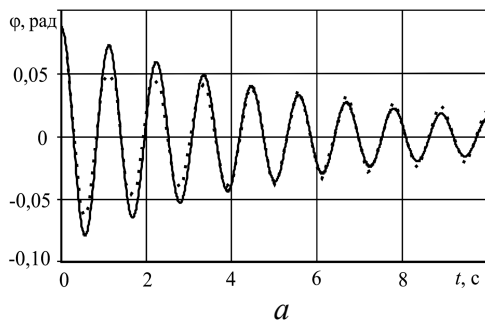


Рис. 11. Порівняння кривих коливань 4 ланцюгів, отриманих теоретичним (суцільна лінія) та експериментальним (точкова лінія) шляхами: $a - \varphi_0 = 5^\circ, t_{x0} = 30$ Н; $b - \varphi_0 = 8^\circ, t_{x0} = 30$ Н

У шостому розділі на підставі результатів, отриманих в розділах 3–5, було розроблено комплекс методів та методик розрахунку довговічності канатів багатоякірних систем позиціонування суден і об'єктів океанотехніки з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації. Мета створення комплексу: отримання можливості оцінки довговічності якірних ліній пасивних систем позиціонування суден і засобів океанотехніки в умовах довготривалої їх стоянки у відкритому морі з урахуванням вітро-хвильових умов конкретного місця експлуатації.

Наявність достовірної інформації термінів надійної експлуатації плавучого об'єкта дає можливість оцінити імовірність руйнування цих елементів від дії циклічних навантажень в умовах довготривалих стоянок об'єктів заякоріння при хвилюванні моря, коли фактично відсутній науково оброблений статистичний матеріал відносно відмов в необхідному об'ємі. Це можливо виконати на основі аналізу раніше проведених експериментальних досліджень втомної міцності якірних зварних надміцних ланцюгів з використанням при розрахунках методів пружинної аналогії та еквівалентного, або умовного, спектра.

Оскільки усі методи та методика експериментального дослідження було розглянуто у вищевикладеному матеріалі, зупинимося лише на методиці оцінки довговічності канатів багатоякірних систем утримання.

Структура методики.

Існуючі дані:

1. Дані по циклічних випробуваннях надміцних зварних якірних ланцюгів (рис. 12), що було отримано в ході проектних робіт за участю ПКБ «Прогрес», ЦНДІ «Прометей», ЦКБ «Коралл», ЦНДІ ім. акад. А.Н. Крілова, Чорноморського

суднобудівного заводу та ін. в період розробки ТУ 5.211-15420-85. При цьому слід відмітити, що представлені криві є свого роду аналогом відомої кривої втоми Веллера.

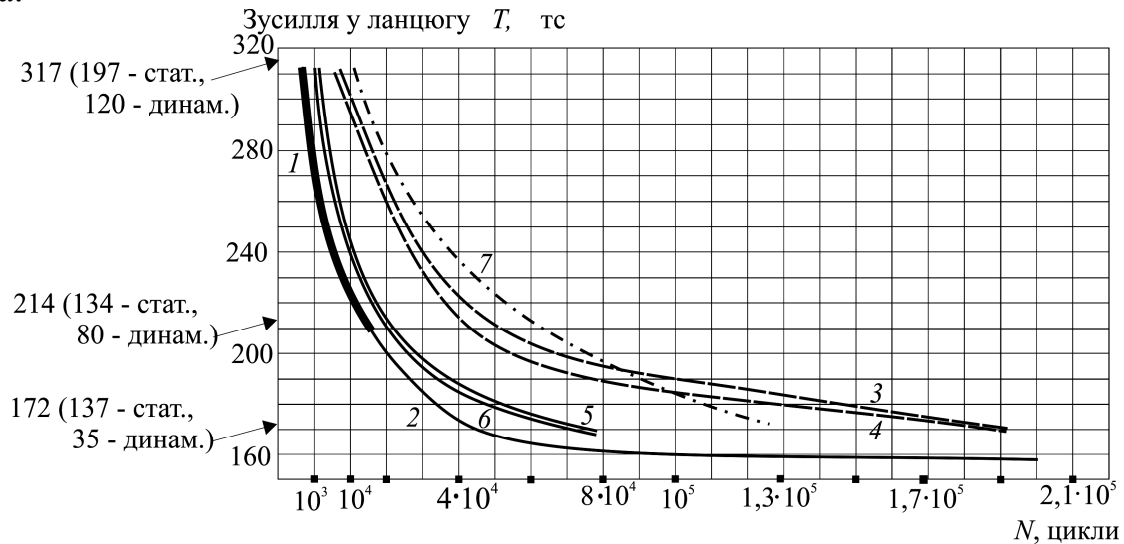


Рис. 12. Циклічні навантаження зварних надміцних якірних ланцюгів:

1 – необхідний ресурс довговічності ланцюгів в режимі "виживання" НПБУ; 2 – орієнтовний ресурс довговічності при звичайних умовах експлуатації НПБУ; 3 – випробування загальної ланки зі сталі 25ХГНМТБА; 4 – випробування загальної ланки ланцюга категорії OQR; 5 – випробування ланки Кентера зі сталі 20ГСНДМЛ; 6 – випробування ланки Кентера ланцюга категорії OQR; 7 – випробування литозварної ланки зі сталі 20ГСНДМ

2. Повторюваність та забезпеченість висот і періодів хвиль, швидкостей вітру по конкретному району моря, де експлуатуватиметься плавучий об'єкт, що проектується (Регістр СРСР "Ветер и волны в океанах и морях").

3. Технічні характеристики: q – інтенсивність навантаження одиниці довжини якірної лінії, Н/м; H – глибина стоянки (акваторії), м; T_{x0} – попередній (горизонтальний) натяг, Н.

Розрахунок.

1. *Визначення жорсткості всієї багатоякірної системи в цілому по заданому напрямку дії зовнішнього зусилля згідно (7).*

2. *Побудова еквівалентного, або умовного, спектрів хвилювання та вітру.*

3. *Оцінка довговічності за кривою кількості навантажень.* Будуємо криву кількості навантажень зусиллями в якірній лінії за певний період експлуатації плавучого об'єкта заякоріння. Порівнюємо дослідну криву витривалості якірної лінії (див. рис. 12) з кривою кількості навантажень зусиллями в лінії за певний період експлуатації плавучого об'єкта в даних умовах місця експлуатації. Якщо ці криві не перетинаються, то довговічність, відповідна даному періоду часу, забезпечується. Якщо перетинаються, то ні.

4. *Розрахунок показників довговічності якірних ліній багатоякірних систем.* Довговічність якірних ліній багатоякірних систем суден та об'єктів океанотехніки характеризується наступними показниками: призначеним ресурсом, середнім або гамма-відсотковим ресурсом до списання, середнім терміном служби до списання. У даному випадку призначений ресурс якірної лінії – 5 років згідно ТУ 5.211-15420-85, а середній ресурс до списання дорівнює середньому терміну служби. Середній

термін служби якірних ліній багатоякірних систем та гамма-відсотковий ресурс з використанням методів теорії ймовірностей відповідно дорівнюють

$$T_{\text{сл.ср}} = \int_0^{\infty} T_{\text{сл}} f(T_{\text{сл}}) dt, \quad \int_{T_{\text{ру}}}^{\infty} f(T_{\text{сл}}) dt = \frac{\gamma}{100},$$

де $T_{\text{сл}}$ – термін служби багатоякірної системи до списання, роки; $f(T_{\text{сл}})$ – щільність розподілу термінів служби багатоякірних систем до настання граничного стану; γ – заданий відсоток якірних ліній, кожна з яких досягне встановленого ресурсу $T_{\text{ру}}$, %.

5. *Оцінка довговічності за критерієм неруйнування з урахуванням накопичення втомних руйнувань.* При випадкових навантаженнях поняття циклу з постійними параметрами втрачає точний сенс і замінюється подією, яка полягає у тому, що навантаження, безперервно зростаючи від деякого мінімального значення, досягає найближчого максимуму. В цьому випадку мірою накопичення пошкоджень при розрахунках довговічності якірних ліній є величина

$$e = \sum_{i=1}^N (Q_i - \tau_f)^{\mu} \Delta n_i < e_k, \quad (17)$$

де N – кількість рівнів навантаження, що розглядаються; Q_i – навантаження в i -му інтервалі, Н; τ_f – межа втоми якірної лінії, Н; μ – параметр; Δn_i – кількість циклів навантаження, амплітуда яких має максимум в межах від точки i до $i+1$.

Втомне руйнування трапляється в тому випадку, якщо сума по (17) досягає деякого критичного значення e_k . Експериментальні криві Веллера (див. рис. 12) може бути також інтерпретовано на основі виразу (17). Розглядаючи довільну пару точок кривої Веллера (рис. 13), можна встановити значення параметра μ і критичної міри e_k :

$$\mu = \frac{\ln \Delta n_{i+1} - \ln \Delta n_i}{\ln(Q_i - \tau_f) - \ln(Q_{i+1} - \tau_f)}, \quad e_k = (Q_i - \tau_f)^{\mu} \Delta n_i = (Q_{i+1} - \tau_f)^{\mu} \Delta n_{i+1} = \text{const}. \quad (18)$$

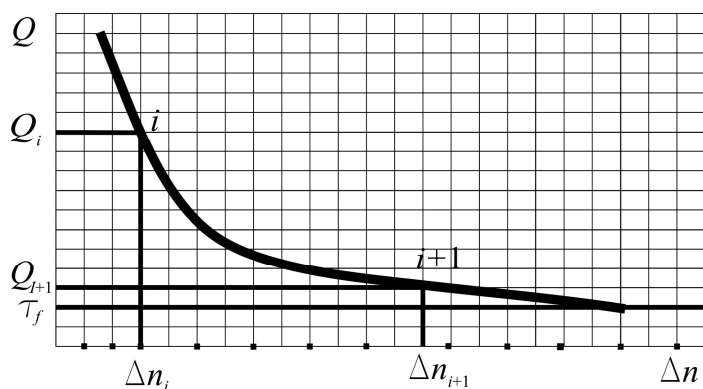


Рис. 13. Діаграма Веллера

Очевидно, умова постійності співвідношення (18) для будь-яких точок кривої Веллера може служити підтвердженням прийнятої схеми накопичення втомних руйнувань.

Використовуючи співвідношення (17)–(18) було отримано за даними рис. 12 для кривої випробувань загальних ланок ланцюгів наступні величини: $\mu = 0,9 \dots 1,0$, $e_k = 6,86 \cdot 10^6$; для кривої випробувань ланок Кентера якірних ланцюгів: $\mu = 1,2 \dots 1,3$, $e_k = 5,0 \cdot 10^6$.

У якості прикладу для розрахункової оцінки довговічності якірних ліній скористалися технічними характеристиками багатоякірної системи НПБУ "Шельф-1" для району І Чорного моря (рис. 14).

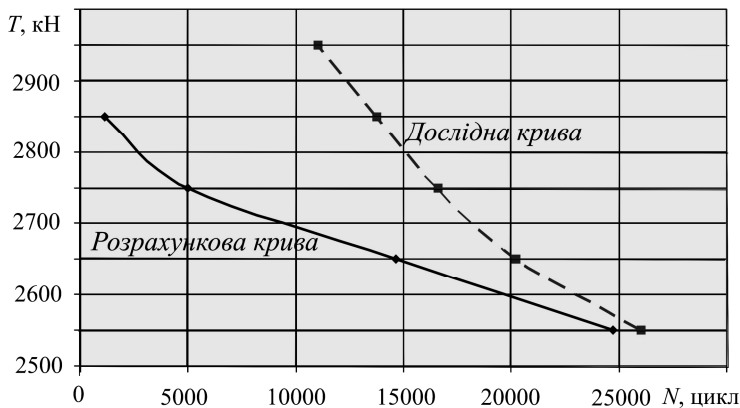


Рис. 14. Крива кількості навантажень зусиллями в якірній лінії за 5 років експлуатації багатоякірної системи НПБУ "Шельф-1" для району І Чорного моря на основі умовного спектра хвилювання

Таким чином, при використанні умовного спектра хвилювання, що точніше враховує реальні умови експлуатації в місці

установки НПБУ, видно, що крива кількості навантажень зусиллями якірної лінії за термін експлуатації ліній у 5 років не перетинається з дослідною кривою витривалості. А саме, кількість циклів навантажень, що іспитується якірною лінією, менше максимально допустимих. При цьому величини показників довговічності та розрахунок за критерієм неруйнування дають можливість змінювати термін служби якірних ліній багатоякірних систем порівняно з регламентуємим технічними умовами. Наприклад, для НПБУ "Шельф-1" для району І Чорного моря його може бути збільшено на 1,5 роки, а якщо відмовитися від з'єднувальних ланок Кентера (як це зроблено за кордоном), його можна збільшити в 2 рази. Очевидно, що для інших районів Світового океану з більш жорсткими вітро-хвильовими умовами термін служби може бути зменшено.

У додатках наведено: технічні характеристики суден та об'єктів океанотехніки для різних глибин моря у різні роки; дані про повторюваність та забезпеченість висот та періодів хвиль, швидкостей вітру для району І Чорного моря, енергетичні спектри хвилювання та вітру для різних ступенів хвилювання; патенти та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано можливість заміни нелінійних залежностей для проектування якірних ліній в діапазоні реальних значень зміни натягу в них — лінійними пружними зв'язками при умові, що ланцюгову лінію буде замінено пружним зв'язком.

2. Вперше отримано метод оцінки впливу маси якірної лінії на кінетичну енергію системи "плавучий об'єкт — якірні канати", за допомогою якого було показано, що якірна лінія має пружні властивості, що залежать від погонною ваги каната, а вплив маси якірної лінії з урахуванням приєднаних мас води порівняно з масою всієї плавучої споруди на кінетичну енергію системи незначний і лежить в межах 1...2 %.

3. Вперше розроблено метод зведення багатоякірного пристрою до динамічної системи, що має поле жорсткості, який дозволяє розглядати поведінку цієї системи

по головному напрямку зовнішнього впливу як результат проєкції на цей напрям жорсткостей окремих якірних ліній. Побудовано полярні діаграми жорсткості багатоякірних систем об'єктів океанотехніки при різному попередньому натягу та з різною кількістю якірних ліній, які дають практичне уявлення про зміни жорсткості всієї системи в цілому при різних напрямках дії зовнішнього навантаження.

4. Удосконалено стосовно до багатоякірних систем метод довготермінового, або умовного, спектрів хвилювання та вітру, що дозволило враховувати вітро-хвильові умови конкретного району експлуатації судна або об'єкта океанотехніки при довготривалій стоянці у відкритому морі.

5. Розроблено комплекс методів та методик оцінки довговічності якірних ліній при тривалій стоянці об'єкта заякоріння у відкритому морі, що дозволив при розрахунках динаміки враховувати вітрові і хвильові характеристики місця розташування судна або об'єкта океанотехніки і пов'язане з ними накопичення втомних руйнувань в якірних лініях при експлуатації в різних районах Світового океану. Аналіз отриманих результатів показав, що врахування вітро-хвильових умов конкретного району експлуатації плавучого засобу дає можливість обґрунтовано змінювати термін служби багатоякірної системи утримання порівняно з рекомендаціями технічних умов. Наприклад, для НПБУ "Шельф-1" для району І шельфу Чорного моря його може бути збільшено на 1,5 роки, а якщо відмовитися від ланок Кентера, що входять до складу якірних ланцюгів (як це зроблено за кордоном), його можна збільшити в 2 рази. Очевидно, що для інших районів Світового океану з більш жорсткими вітро-хвильовими умовами термін служби може бути зменшено.

6. Розроблено модельний стенд для дослідження динаміки багатоякірної системи позиціонування суден та об'єктів океанотехніки та проведено експериментальне дослідження динаміки якірних ліній, утворюючих систему з двох та чотирьох ланцюгів, при різних попередньому натягу і кутах відхилення та одержано криві затухаючих коливань системи. Показано, що коливання якірної системи, що отримано експериментальним та теоретичним (чисельним) шляхами фактично співпадають з точністю до 9 %. Основна відмінність теоретичного та експериментального рішень полягає у тому, що коливання якірної системи моделі затухають більш інтенсивно, тобто амплітуди теоретичної кривої коливань приблизно на 10 % більші за амплітуди експериментальної кривої коливань, що є прийнятним у розрахунках динаміки.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові фахові видання:

1. Бугаєнко, Б. А. Анализ якорных систем технических средств освоения Мирового океана [Текст] / Б.А. Бугаєнко, А.Ф. Галь, А.Ю. Андрейчикова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 6 (417). – С. 45–53.

2. Бугаєнко, Б. А. Жесткость составных якорных канатов и канатов с промежуточным подвешенным грузом [Текст] / Б.А. Бугаєнко, А.Ю. Андрейчикова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 4 (421). – С. 23–30.

3. Бугаенко, Б. А. Взаимосвязь жесткостных, нагрузочных и линейных характеристик якорного каната многоякорной системы позиционирования [Текст] / Б.А. Бугаенко, А.Ю. Андрейчикова // Зб. наук. праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної Зірки інституту ім. П.С. Нахімова. – Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2009. – Вип. 1 (16). – С. 132–136.

4. Бугаенко, Б. А. Методика определения эквивалентного спектра морского волнения для расчета долговечности сварных якорных цепей [Текст] / Б.А. Бугаенко, А.Ф. Галь, А.Ю. Андрейчикова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 5 (428). – С. 38–45.

5. Андрейчикова, А. Ю. Перспективы развития плавучих объектов океанотехники с гибкими связями [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 6 (429). – С. 42–50.

6. Андрейчикова, А. Ю. Определение жесткости многоякорных систем удержания плавучих объектов [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 3. – С. 39–46.

7. Андрейчикова, А. Ю. Експериментальне дослідження динаміки багатоякірних систем позиціонування суден та об'єктів океанотехніки [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Зб. наук. праць Академії військово-морських сил імені П.С. Нахімова. – Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2010. – Вип. 3. – С. 219–226.

8. Бугаенко, Б. А. Определение долговечности якорных связей плавучих сооружений / Б.А. Бугаенко, А.Ю. Андрейчикова // [Електронне видання Вісник Національного університету кораблебудування]: <http://www.ev.nuos.edu.ua>. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 3. – 7 с.

9. Андрейчикова, А. Ю. Экспериментальное исследование динамики многоякорной системы позиционирования плавучих средств океанотехники [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 4. – С. 3–11.

10. Андрейчикова, Г. Ю. Методологія розрахунку довговічності якірних ланцюгів пасивних систем стабілізації суден та засобів океанотехніки [Текст] / Андрейчикова Г.Ю. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 6. – С. 24–30.

11. Бугаенко, Б. А. Оценка долговечности якорных канатов многоякорных систем с учетом накопления усталостных разрушений [Текст] / Б.А. Бугаенко, А.Ф. Галь, А.Ю. Андрейчикова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2011. – № 1. – С. 33–38.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

12. Бугаенко, Б. А. Установка для исследования динамики многоякорной системы позиционирования плавучих сооружений [Текст] / Б.А. Бугаенко, А.Ф. Галь, А.Ю. Андрейчикова // Автоматизация судостроительного производства и подготовка инженерных кадров: состояние, проблемы, перспективы: Материалы Международной научно-методической конференции, 26–27 июня 2007 г. – Николаев: НУК, 2007. – С. 129–130.

13. Бугаенко, Б. А. Оценка циклической прочности якорных связей полупогружных буровых установок [Текст] / Б.А. Бугаенко, А.Ю. Андрейчикова // Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке

судов (БМС–2007): Материалы Международной научно-технической конференции, 25–26 октября 2007 г. – Николаев: НУК, 2007. – С. 102–103.

14. Андрейчикова, А. Ю. Оценка риска разрушения якорных связей ППБУ [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика: Материалы Международной научно-методической конференции. – Николаев: НУК, 2008. – С. 168–170.

15. Андрейчикова, А. Ю. Обеспечение живучести многоякорных систем позиционирования судов [Текст] / Андрейчикова А.Ю. // Живучість корабля та безпека на морі: Тези доповідей IV науково-технічної конференції, 27–28 травня 2009 р. – Севастополь: СВМІ, 2009. – С. 43.

16. Андрейчикова, А. Ю. Долговечность сварных сверхпрочных якорных цепей [Текст] / А.Ю. Андрейчикова, Б.А. Бугаенко, А.Ф. Галь // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції, 16 вересня 2011 р. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 122-124.

17. Андрейчикова, Г. Ю. Методологія оцінки довговічності канатів багатоякірних систем утримання суден та засобів океанотехніки / Андрейчикова Г.Ю. // Проектування та технологія побудови суден та засобів океанотехніки: Тези доповідей Всеукраїнської конференції молодих учених та студентів [Електронне видання]: conference.nuos.edu.ua. - Миколаїв: НУК, 16-18 травня 2011. – 2 с.

18. Пат. на корисну модель № 57969. Стенд для експериментального дослідження динаміки якірних систем позиціонування [Текст] / Г.Ю. Андрейчикова, Б.А. Бугаенко, А.Ф. Галь; Україна, МПК (2011.01) В63В 21/00, В63В 35/00. НУК. – № u201009945; заявл. 10.08.10; опубл. 25.03.11 // Промислова власність, 2011. – Бюл. № 6 (друк.). – 3 с.

АНОТАЦІЯ

Андрейчикова Г.Ю. Довговічність канатів багатоякірних систем позиціонування суден та засобів океанотехніки з урахуванням вітро-хвильових умов. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – Конструювання і будівництва суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2012 р.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної задачі – дослідженню особливостей циклічних навантажень якірних канатів багатоякірних систем суден та об'єктів океанотехніки та розрахунку довговічності якірних ліній в умовах довготермінових стоянок у відкритому морі з урахуванням вітро-хвильових умов місця експлуатації. Розроблено метод визначення коефіцієнту жорсткості складних одиночних якірних ліній та всієї багатоякірної системи в цілому з використанням методу пружинної аналогії. Удосконалено метод умовного, або еквівалентного, спектра хвилювання та вітру стосовно до багатоякірних систем, який дозволяє враховувати вітро-хвильові умови конкретного місця експлуатації судна або об'єкта океанотехніки. Розроблено модельний стенд для дослідження динаміки багатоякірної системи позиціонування суден та об'єктів океанотехніки та проведено експериментальне дослідження динаміки систем якірних ланцюгів. Розроблено

комплекс методів та методик розрахунку довговічності якірних ліній з урахуванням конкретних метеорологічних умов місця експлуатації об'єкта заякоріння при довготривалій стоянці у відкритому морі.

Ключові слова: багатоякірна система, об'єкт океанотехніки, довговічність, вітро-хвильові умови, умовний спектр, жорсткісна характеристика.

АННОТАЦИЯ

Андрейчикова А.Ю. Долговечность канатов многоякорных систем позиционирования судов и средств океанотехники с учетом ветро-волновых условий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – Конструирование и постройка судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2012 г.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи – исследованию особенностей циклических нагрузок якорных канатов многоякорных систем судов и объектов океанотехники и расчету долговечности якорных линий в условиях долговременных стоянок в открытом море с учетом ветро-волновых условий места эксплуатации.

Главная задача – теоретическое определение долговечности якорных канатов по методу условного спектра с возможностью использования оценки величин перемещений и усилий как результатов преобразования стационарного случайного процесса внешнего воздействия с помощью линейной динамической системы на базе экспериментальных данных по стендовым испытаниям электросварных цепей.

Поставленные в диссертации задачи и проведенные исследования решены с применением основных методов теории вероятностей и математической статистики, теории надежности, теоретической механики и теории корабля.

Разработан метод определения коэффициента жесткости сложных одиночных якорных линий и всей многоякорной системы в целом с использованием метода пружинной аналогии, в результате чего многоякорная система позиционирования рассматривается как линейная динамическая система, характеристики которой можно получить путем проекции жесткостей якорных линий, входящих в систему, на главное направление внешнего воздействия. Построены полярные диаграммы жесткости многоякорных систем объектов океанотехники при различном предварительном натяжении и с разным количеством якорных линий, позволяющие получить практическое представление об изменениях жесткости всей системы в целом при различных направлениях действия внешней нагрузки.

Впервые получен метод оценки влияния массы якорной линии на кинетическую энергию системы "плавающий объект – якорная линия", с помощью которого было показано, что влияние массы якорной линии с учетом присоединенных масс воды по сравнению с массой всего плавучего сооружения на кинетическую энергию системы незначительно и лежит в пределах 1...2 %, а в некоторых случаях и значительно ниже 1 %.

Усовершенствован метод условного, или эквивалентного, спектра волнения и ветра применительно к многоякорным системам, позволяющий учитывать ветро-

волновые условия конкретного места эксплуатации судна или объекта океанотехники, а не использовать спектры стационарного бесконечно длинного с постоянными параметрами процесса волнения.

Разработан модельный стенд для исследования динамики многоякорной системы позиционирования судов и объектов океанотехники, и проведено экспериментальное исследование динамики якорных линий, образующих систему из двух и четырех цепей, при различных предварительном натяжении и углах отклонения, получены кривые затухающих колебаний системы.

Разработан комплекс методов и методик расчета долговечности якорных линий с учетом конкретных метеорологических условий места эксплуатации объекта заякорения при долговременной стоянке в открытом море, позволивший при расчетах динамики учитывать ветровые и волновые характеристики местоположения судна или объекта океанотехники.

Достоверность результатов обусловлена использованием известных физических закономерностей и апробированных методов, подтверждается сравнением с результатами, полученными численным методом и экспериментальным путем на специальном модельном стенде, а также с результатами, полученными при расчетах по нормативным документам.

Ключевые слова: многоякорная система, объект океанотехники, долговечность, ветро-волновые условия, условный спектр, жесткостная характеристика.

THE SUMMARY

Andreychikova A.Y. The durability of multy-anchor positioning system ropes of ships and marine technology objects taking into account wind-wave conditions. – Manuscript.

Dissertation for the degree of technical sciences candidate on specialty 05.08.03 – Design and building of ships. – National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolayev, 2012.

Dissertation is devoted to solving of the important applied problem - study of multy-anchor systems anchor ropes of ships and marine technology facilities cyclic loadings and flexible anchor links durability calculation in long-term parking at the open sea, taking into account wind-wave conditions of the operation place. The procedure for determining the complex single anchor lines and multy-anchor systems as a whole inflexibility coefficient using the spring analogy is improved. The method of conventional or equivalent wave and wind spectrum, which takes into account specific wind-wave conditions of vessel or marine technology objects operation place, is produced. The model facility for studying the vessel and marine technology object multy-anchor positioning systems dynamics is developed and experimental research of anchor system dynamic is hold. The complex of methods and methodic of calculating the anchor line durability to the specific meteorological conditions of marine technology object operation at long-term parking in the open sea is developed.

Key words: multy-anchor system, marine technology object, durability, wind-wave conditions, conventional spectrum, inflexibility characteristic.