

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова**

Присташ Світлана Федорівна



УДК 629.5.015.4:539.431

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ КОРПУСУ
ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ, ВИГОТОВЛЕНОГО
НАМОТУВАННЯМ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Бурдун Євген Тимофійович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
завідувач кафедри проектування та виробництва
конструкцій із композиційних матеріалів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Конопльов Анатолій Васильович,
Одеський національний морський
університет, м. Одеса,
завідувач кафедри «Машинознавство»;

кандидат технічних наук
Печенюк Андрій Володимирович,
Національний університет «Одеська морська
академія», м. Одеса,
доцент кафедри теорії та устрою судна.

Захист відбудеться «26» квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: ауд. 360, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007 та на сайті: <http://nuos.edu.ua>.

Автореферат розісланий «25» березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 38.060.02,
д-р техн. наук, професор



В. В. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертацію присвячено аналітичному вирішенню задачі напружено-деформованого стану (НДС) порожнистої замкненої тороїдальної оболонки, яка виготовлена з полімерного композиційного матеріалу методом намотування. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) надає міцним корпусам (вони безнабірні) підводно-технічних засобів переваги перед аналогічними корпусами з традиційних сплавів за відносною (ефективною) масою та за значенням верхнього критичного тиску (граничною глибиною занурення).

На сьогодні, роботи пов'язані з тороїдальними оболонками, як несучими оболонками міцних корпусів, описують лише варіанти оригінальних архітектурно-конструктивних компонувань зовнішнього вигляду підводних апаратів та конструкцій з міцними корпусами у формі тору, обмежуються дослідженнями НДС та стійкості ізотропних та ортотропних тороїдальних оболонок, що навантажені зовнішнім рівномірним тиском, без врахування конструктивно-технологічних особливостей їх виготовлення (К.Ф. Черних, В.О. Шаміна, Т.І. Кошелєва, В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Н.О. Чаплин, Я.М. Григоренко, М.С. Ганєєва, Л.О. Косолапова, О.С. Вольмір, J. Vlachut, В.В. Новожилов та інші). Результатів цих досліджень недостатньо для подальшого удосконалення технічних рішень при проектуванні тороїдального міцного корпусу, оскільки – використання КМ потребує нового підходу до проектування несучої оболонки міцного корпусу в формі замкненого тору з врахуванням конструктивно-технологічних особливостей при виготовленні її методом намотування.

Оцінці залежності верхнього критичного зовнішнього тиску оболонки від виду намотування: поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), спірального намотування та кутів намотування, присвячено роботу кандидата технічних наук Крептюк А.В. Результати згаданої роботи підтверджують ефективність використання намотаного волокном безнабірного міцного корпусу підводного судна.

Питання оцінки міцності корпусу тора зі змінною за меридіаном товщиною, в залежності від геометрії, кута спірального намотування, мінімальної товщини корпусу оболонки та інших, залишаються невирішеними на шляху впровадження тора в підводне суднобудування. В цьому полягає наукова новизна та практична цінність запропонованої розробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота містить результати досліджень, які було отримано при виконанні наступних науково-дослідних робіт (НДР): держбюджетної НДР №1715 «Розробка методів проектування судових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів при статичних і динамічних навантаженнях» (2009-2010 р.р., номер державної реєстрації 0109U002221), держбюджетної НДР №2045 «Наукові основи проектування складів і структур легкового композитних матеріалів плавучості для підводних засобів освоєння ресурсів океану» (2018-2020 р.р., номер державної реєстрації 0118U003871), в яких здобувач брав участь як виконавець. Дисертаційна робота відповідає основним напрямкам досліджень

Кораблебудівного навчально-наукового інституту НУК та узгоджується з наступними нормативними актами України: Законом «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості» № 5209-VI від 06.09.2012 р.; Законом «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», стаття 4, пункт 2 «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки» (№ 5460-VI від 16.10.2012 р.); «Морською доктриною України на період до 2035 року», що затверджено постановою Кабінету Міністрів України №137-209-п (редакція від 28.12.2018 р.); Законом «Про внесення змін до Митного кодексу України (щодо збереження та розвитку вітчизняної суднобудівної промисловості)» № 6475 від 19.05.2017 р.

Мета дисертаційного дослідження полягає в розробці методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном.

Задачі дисертаційного дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Визначити сучасний стан проблеми розрахунку міцності корпусу підводного апарату в формі тору при гідростатичному стисканні та доцільності враховування конструктивно-технологічних факторів виготовлення тору із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою).

2. Теоретично обґрунтувати та розробити математичну модель напружено-деформованого стану та зробити оцінку міцності при гідростатичному стисканні замкненої кругової тороїдальної оболонки, що виготовлена із полімерного композиційного матеріалу способом намотування, яка б враховувала шарувату структуру полімерного композиційного матеріалу та конструктивно-технологічні фактори, в залежності від схеми армування.

3. Отримати аналітичний розв'язок для компонентів напружено-деформованого стану і оцінки міцності тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні, на базі якого виявити залежність міцності від: схеми армування, геометричних параметрів тору, перспективних типів армуючого наповнювача та сполучника, змінності товщини намотаного корпусу.

4. Розробити методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, виготовленого способом намотування, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів, яка включає в себе можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування з метою вибору оптимальної структури армування і складу полімерного композиційного матеріалу.

5. Зробити оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для тороїдальних міцних корпусів при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та

технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів.

Об'єктом дослідження є процес впливу конструктивно-технологічних факторів виготовлення із армованих композиційних матеріалів способом намотування міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми на його напружено-деформований стан і міцність при гідростатичному стисканні.

Предметом дослідження є метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми із армованого композиційного матеріалу, виготовленого способом намотування.

Для виконання досліджень використовувались наступні методи:

- загальнонаукові методи та прийоми дослідження (формалізація, гіпотетико-дедуктивний метод, аналіз та синтез, абстрагування, узагальнення, ідеалізація, індукція, аналогія та моделювання) у всіх виконаних в дисертаційній роботі дослідженнях та при розв'язку практичних задач;

- методи математичного моделювання пружних характеристик ортотропних композиційних матеріалів на основі відомих властивостей компонентів за теоретичною моделлю оцінки за Фойхтом і Рейсом та практичними рекомендаціями класифікаційного товариства Bureau Veritas (Франція);

- положення лінійної теорії пружності шаруватих ортотропних оболонок обертання (гіпотези Ламе) для побудови математичної моделі напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, отриманого способом намотування із полімерних композиційних матеріалів;

- метод Бубнова-Гальоркіна для розв'язання системи диференціальних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні методу розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

В результаті досліджень отримано наступні наукові результати:

1. **Вперше**, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки під впливом гідростатичного стискання на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі. Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину оболонки, що утворюється в результаті використання намотування та рекомендації класифікаційного товариства Bureau Veritas, щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів. [1]

2. За допомогою отриманої математичної моделі **удосконалено** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою). [2, 3]

3. Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу: схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих наповнювачів та сполучників, змінної товщини та її осереднення. Встановлено, що неврахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування та особливостей розрахунку властивостей композиційних матеріалів і використання спрощених методів розрахунку призводить до зменшення напружень в два рази та виникненню помилки в небезпечну сторону [5].

4. **Отримав подальший розвиток** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів [2, 3].

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми з врахуванням конструктивно-технологічних факторів при виготовленні способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

2. Отримані результати та рекомендації можуть бути використані на етапі розробки техніко-економічного обґрунтування перспективних підводних апаратів з тороїдальним міцним корпусом на початкових стадіях проектування.

Практичне застосування результатів досліджень відображено у наступному: «Методика розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із ПКМ способом намотування волокном» (№УКФА. 362111.002.М. НУК ім. адм. Макарова, 2020. 17 с).

Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів кораблебудівного навчально-наукового інституту за спеціальностями 135 – «Суднобудування» та 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (акт від 02.03.2020).

Розроблена в роботі методика впроваджена в ДП «Миколаївський суднобудівний завод» (акт від 12.03.2020 р.) м. Миколаєва для оцінки міцності корпусів підводних апаратів тороїдальної форми на початкових стадіях проектування та може в подальшому бути використана при проектуванні підводно-технічних систем і комплексів на інших підприємствах, що проектують підводні апарати.

Особистий внесок здобувача. Наведені у дисертації положення, всі отримані закономірності і висновки щодо удосконалення методу розроблені особисто здобувачем. В публікаціях, що написані в співавторстві, здобувачу належать такі наукові результати: [1] – виведення рівнянь рівноваги для розрахунку напружено-деформованого стану ортотропних тороїдальних оболонок змінної товщини; [2, 3] – отримання розрахункових даних щодо впливу схеми армування, геометрії тору, типів армуючих наповнювачів та сполучника, змінної товщини та її осереднення в

намотаному тороїдальному корпусі на величину напружень в тороїдальних оболонках під впливом гідростатичного тиску; [4] – аналіз сучасного стану проблеми проектування тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів для підводних апаратів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи було представлено на 20 конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2012–2017, 2019 рр.); Міжнародна конференція «Композиционные материалы в промышленности» (СЛАВПОЛИКОМ) (м. Ялта, 2013 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2014-2015 рр.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон 2018 р.); International scientific congress – summer session «Machines. Technologies. Materials» (м. Варна, 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція "Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування" (м. Миколаїв, 2018 р.); Всеукраїнська наукова конференція "Сучасні технології обробки матеріалів" (м. Миколаїв, 2018 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2013–2020 рр.).

Публікації. Результати роботи опубліковано в 4 статтях у наукових фахових виданнях України (1 без співавторів), періодичних виданнях іноземних держав та виданнях, що входять до наукометричних баз даних (НМБ), 19 тезах доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, 3 додатків, списку використаних джерел із 130 найменувань. Основний обсяг дисертації міститься на 163 сторінках та включає 48 ілюстрацій і 6 таблиць. Обсяг додатків складає 28 аркушів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено об'єкт, предмет та методи дослідження, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, представлено відомості про апробацію та опублікування результатів роботи, а також про її структуру та обсяг.

У першому розділі проведено аналіз існуючих проектів підводних апаратів з міцним корпусом у формі тору. Показано актуальність застосування підводних апаратів з тороїдальним міцним корпусом. Обґрунтовано перспективність роботи.

Розглянуто різні фактори, які визначають раціональність використання міцного корпусу для підводних апаратів: виробнича технологічність, міцність, стійкість оболонки та вага корпусу.

Проведено огляд підводних технічних засобів і конструкцій з тороїдальним міцним корпусом (рис.1): підводні судна і човни (US 3413947 F; GB 2026951; US 8677921; UA 78215); підводні станції та бурові платформи (US 04004429; Ross & Lafolley-Lane,

Великобританія); підводне судно-носій, з тороїдальними елементами в міцному корпусі (US 3561387); водолазний апарат (US 3408822), проект підводного житла Atlantis II та ін. Поява таких проектів обумовлена тим, що тороїдальна форма має ряд переваг (краща гідродинамічна форма, менша товщина стінки).

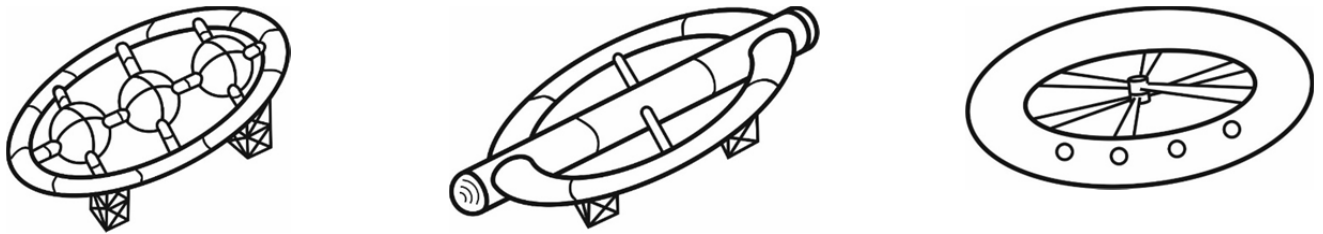


Рис. 1. Види конструкцій (підводних бурових станцій та апаратів) з тороїдальним міцним корпусом

Існує потреба в підводній буровій платформі або буровій установці, пристосованій до буріння на великих глибинах. На сьогодні межа глибоководного буріння складає приблизно 3000 м з кількох причин: максимальна вага райзера, яку може витримати плавуча бурова платформа; необхідність точного позиціонування платформи відносно свердловини. Тому використання підводних бурових платформ позбавить від необхідності використовувати довгі райзери та від необхідності утримувати надводну бурову установку в заданій точці.

Впровадження полімерних композиційних матеріалів в якості конструкційного матеріалу для міцних корпусів істотно вплинуло на проектування підводних технічних засобів освоєння океану (підводних човнів, населених та ненаселених апаратів, бурових платформ та лабораторій). Також, використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), зокрема вуглепластика (ВП) та склопластика (СП), дають резерви для зниження маси корпусів, в порівнянні з традиційно застосовуваними матеріалами (високоміцна сталь, титанові та алюмінієві сплави). З багатьох методів переробки ПКМ добре зарекомендував себе метод автоматизованого намотування зі СП та ВП в підводному суднобудуванні. Даний метод дозволяє виготовити об'ємні вироби практично будь-яких розмірів і реалізувати максимальні показники фізико-механічних властивостей полімерних композиційних матеріалів.

Основним навантаженням на тороїдальний міцний корпус підводного апарату є гідростатичний тиск, який викликає рівномірне статичне стискання міцного корпусу. При цьому в міцному корпусі виникають значні стискаючі напруження. Оскільки задача з оцінки залежності верхнього критичного тиску міцного корпусу підводного апарату від схеми намотування (поперечного намотування в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою) або спірального намотування), глибини експлуатації, та кутів намотування вирішена Крептюк А.В. (результати роботи підтверджують ефективність використання намотаного волокном безнабірного міцного корпусу підводного судна по стійкості), виникає необхідність визначення напружено-деформованого стану при розрахунку на міцність. Напружено-деформований стан (НДС) замкненої в круговому та меридіанному напрямках тороїдальної оболонки, що знаходиться під дією зовнішнього рівномірного тиску, є

предметом ряду досліджень. Актуальність досліджень НДС таких оболонок обумовлена широким використанням тонкостінних оболонкових конструкцій із нових багатошарових композиційних матеріалів, виконаних, в окремих випадках, методом намотування волокном, що дозволяє досягти найбільших значень коефіцієнта заповнення об'єму (КЗО) волокном (до 70...74,05%), що реалізує властивості армуючого наповнювача в складі матеріалу в повній мірі.

Основоположною роботою з розрахунку ізотропних тороїдальних оболонок з постійною товщиною, в тому числі і підкріплених ребрами, є робота Черних К.Ф. та Шаміної В.О. Розрахунком НДС ізотропних тороїдальних оболонок також займався Гребенюк С.Н. Дослідженням НДС намотаної замкненої вуглепластикової тороїдальної оболонки з вузьким діапазоном геометричних параметрів, яка знаходиться під дією рівномірного зовнішнього тиску, проводились J. Blachut, Крептюк А.В. НДС тороїдальної оболонки постійної товщини з квазіортотропною структурою ПКМ досліджували Ганєєва М.С., Вольмір О.С., Новожилов В.В., Косолапова Л.О. Числовими моделями розрахунку НДС ортотропних тороїдальних оболонок займались Чаплин Н.О., Колдунов В.А.

В дослідженнях Комкова М.А. показано, що намотані тороїдальні балони, в порівнянні з однаковими за об'ємом циліндричними балонами, мають меншу масу.

На основі літературного огляду зроблено висновки щодо актуальності роботи, сформульовано мету і задачі досліджень

Основні наукові результати розділу опубліковано у роботі [4].

У другому розділі дисертації обґрунтовано напрям досліджень та обрано основні методи виконання роботи.

При визначенні пружних характеристик ПКМ використовувались традиційний теоретичний метод оцінки за Фойхтом і Рейсом та практично-експериментальні рекомендації класифікаційного товариства Bureau Veritas.

При отриманні аналітичного розв'язку НДС тороїдального міцного корпусу використані положення будівельної механіки корабля, геометрично та фізично лінійної теорії пружності, гіпотези Кірхгофа-Лява теорії тонкостінних оболонок. Метод Бубнова-Гальоркіна – при розв'язанні систем лінійних диференціальних рівнянь для визначення переміщень в системі рівнянь рівноваги.

Метод нелінійного математичного програмування – для формування математичної моделі напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми.

Розглянуто відпрацьовані технологічні схеми виготовлення кругових замкнутих тороїдальних оболонок методом намотування волокном (стрічкою): поперечне намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) (рис.2. а) та спіральне намотування (рис.2. б).

Виконано чисельний аналіз розподілу пружних характеристик ПКМ вздовж ліній головних кривизн замкненої тороїдальної оболонки при використанні різних методів оцінки ефективних пружних характеристик. Аналіз здійснювався на основі дискретної моделі, що враховує закони розподілу товщин шарів уздовж меридіана при поперечному намотуванні в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) і спіральному намотуванні, описаної Комковим М.А. при дослідженні

конструктивно-технологічних особливостей намотування тороїдальних балонів тиску кругового поперечного перерізу. При намотуванні замкнутих тороїдів формується стінка змінної товщини уздовж меридіана з шаруватою ортотропною структурою ПКМ. При цьому товщина стінки тороїда уздовж меридіанного перерізу збільшується від зовнішнього екватора до внутрішнього.

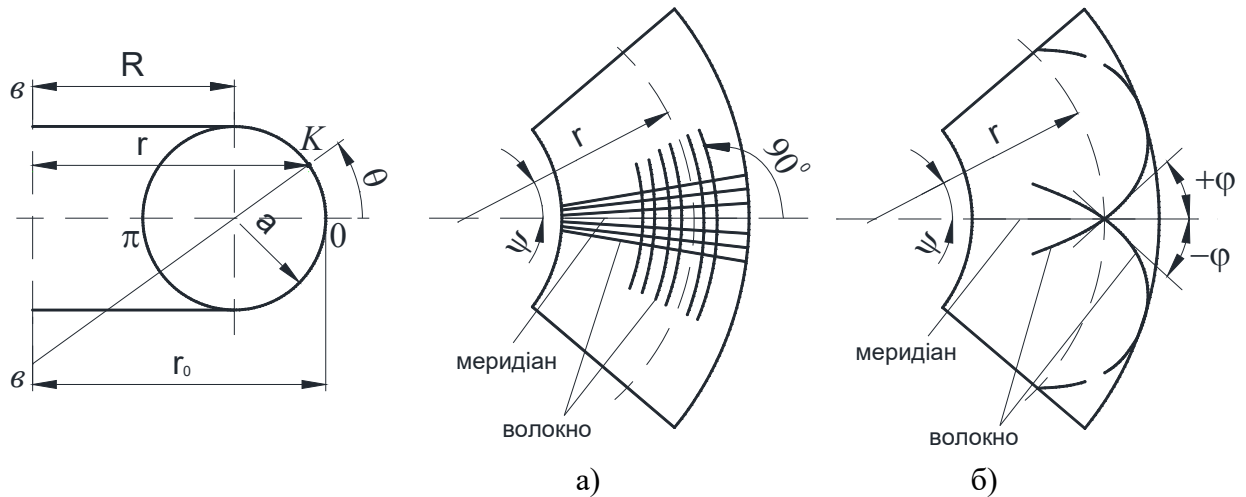


Рис. 2. Геометричні розміри та схеми намотування кругової тороїдальної оболонки виконаної:
а) поперечним намотуванням в комбінації з поздовжнім намотуванням (або викладкою),
б) спіральним намотуванням:

а – внутрішній радіус перерізу меридіана; R – відстань від вісі обертання до центру меридіанного перерізу; r_0 – максимальний радіус обертання (на зовнішньому екваторі); r – відстань від вісі обертання $v-v$ до деякої точки $K(\theta)$ серединної поверхні у меридіанному перерізі; $\pm\phi$ – кути спірального намотування

В якості проектних параметрів, що описують порядок чергування шарів, прийнято товщину повздовжнього шару ($h_2=h(0^\circ)=const$), яка кратна товщині вкладаемого односпрямованого матеріалу, і кількість вкладених в кожному напрямку армування шарів.

Як приклад, для аналізу пружних характеристик розглянуто тороїдальні міцні корпуси із СП та ВП на епоксидному сполучнику виконані намотуванням.

Ефективні пружні постійні E_θ , E_ψ ортотропного ПКМ:

$$E_\psi = B_{\psi\psi} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\theta\theta}}; E_\theta = B_{\theta\theta} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\psi\psi}}, \quad (1)$$

де $B_{jf} = \sum_{i=1}^t B_{jf}^i \bar{h}_i(\theta, k)$; $\bar{h}_i(\theta, k) = \frac{h_i}{h_\Sigma}$ – відносна товщина i -го шару; $h_\Sigma(\theta, k)$ – загальна товщина пакету шарів; $h_i = h_i^M \cdot l_{\phi_i}$ – товщина i -го шару; h_i^M – товщина шару; l_{ϕ_i} – кількість шарів, вкладених в напрямку армування ϕ_i ; t – загальна кількість шарів в пакеті, що вкладені в напрямку армування ϕ_i .

Пружні сталі анізотропного середовища в системі координат тороїдальної оболонки θ , ψ визначено на підставі відомих геометричних співвідношень:

$$\begin{aligned}
B_{\theta\theta}^i &= \bar{E}_1^i \sin^4 \varphi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_2^i \cos^4 \varphi_i; \\
B_{\psi\psi}^i &= \bar{E}_1^i \cos^4 \varphi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_2^i \sin^4 \varphi_i; \\
B_{\psi\theta}^i &= \bar{E}_1^i \mu_{21} (\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) + (\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 4G_{12}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i; \\
B_{ss}^i &= G_{12} + (\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 2\bar{E}_3^i) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i; \\
\bar{E}_1 &= \frac{E_{1ш}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \bar{E}_2 = \frac{E_{2ш}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \bar{E}_3 = 2G_{12ш} + \bar{E}_1 \mu_{21}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Пружні характеристики односпрямованого армуючого шару $E_{1м}$, $E_{2м}$, (в напрямку вздовж (індекс 1) та поперек (індекс 2) армування відповідно) та μ_{21} визначаються з використанням феноменологічного підходу до визначення пружних постійних шару, оснований на розрахунково-експериментальних методах, або розраховуються за властивостями компонентів з використанням теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом:

$$\begin{aligned}
E_{1ш} &= E_B \eta + (1 - \eta) E_M; E_{2ш} = \frac{E_B E_M}{\eta E_M + (1 - \eta) E_B}; \mu_{12ш} = \mu_B \eta + (1 - \eta) \mu_M; \\
\mu_{21ш} &= \frac{\mu_{12} E_{2ш}}{E_{1ш}}; G_{12ш} = \frac{G_B G_M}{\eta G_M + (1 - \eta) G_B}; G_B = \frac{E_B}{2(1 + \mu_B)}; G_M = \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)},
\end{aligned} \tag{3}$$

де η – відносний об’ємний вміст армуючого матеріалу; E_M (E_B) – модуль пружності сполучника (волокна), МПа; μ_M (μ_B) – коефіцієнт Пуассона сполучника (волокна); G_M (G_B) – модуль зсуву сполучника (волокна), МПа.

Буквені індекси В та М в формулах вказують на належність до волокна і матриці відповідно.

Класифікаційне співтовариство Bureau Veritas (Франція) теж дає свої практичні поправки до розрахунку ефективних пружних характеристик для корпусів суден із ПКМ:

$$\begin{aligned}
E_{1ш} &= (E_B \eta + (1 - \eta) E_M) C_{UD1}; \\
E_{2ш} &= C_{UD2} \times \left(\left(\frac{E_M}{1 - \mu_M^2} \right) \times \frac{1 + 0,85 \times \eta^2}{(1 - \eta)^{1,25} + \frac{E_M \times \eta}{E_{B90} \times (1 - \mu_M^2)}} \right); \\
G_{12ш} &= C_{UD12} \times G_M \times \frac{1 + \eta \times \alpha}{1 - \eta \times \alpha}; \quad \alpha = \frac{(\frac{G_B}{G_M}) - 1}{(\frac{G_B}{G_M}) + 1}; \\
\mu_{12ш} &= C_{UDv} \times (\mu_B \times \eta + \mu_M \times (1 - \eta)); \mu_{21ш} = \mu_{12ш} \times \frac{E_{2ш}}{E_{1ш}},
\end{aligned} \tag{4}$$

де E_{B90} – поперечний модуль пружності волокна, МПа; C_{UD1} , C_{UD2} , C_{UD12} , C_{UDv}

– коефіцієнти, що враховують особливості поверхонь армуючих волокон і їх взаємодію з матрицею.

Властивості використаних в розрахунках перспективних марок армуючих наповнювачів та сполучника, що успішно використовуються при виготовленні полімерних композиційних корпусів, наведено в таблиці 1. Відносна об'ємна концентрація армуючого наповнювача прийнята в розрахунках $\eta=0,6$.

Таблиця 1 – Властивості армованих наповнювачів та сполучника, що використовуються в розрахунках

Марка компоненту	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуасона	Міцність при розтягуванні, ГПа
Високомодульне та високоміцне волокно із S-скла ВМПС	93	0,32	4,5 – 4,75
Вуглецеве високомодульне волокно M35J (TORAYCA®)	343	0,31	4,7
Вуглецеве високоміцне волокно Hex Tow®	303	0,31	6,964
Вуглецеве надвисокомодульне волокно CN-90 (Nippon Graphite Fiber Corporation)	860	0,31	3,43
Епоксидна смола ЕДТ-20	3	0,32	0,07

Чисельний аналіз проводився для ВП (рис. 3) та СП (рис. 4) при різних схемах намотування та різному геометричному параметру форми тора k . Отримані результати показують, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом призводить до збільшення пружних характеристик шару в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas для ВП на 20%, а для СП розбіжність складає 5,6%, що призводить до виникнення помилки в небезпечну сторону. Тому надалі методика будується з урахуванням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas для розрахунку пружних характеристик ПКМ.

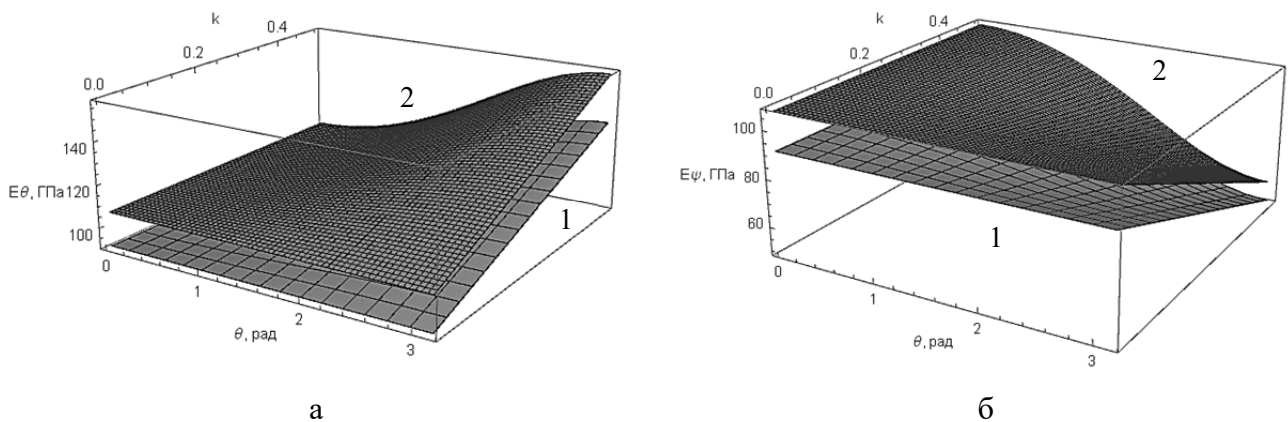


Рис. 3. Залежність модуля пружності E_θ (а) та E_ψ (б) ВП М35J/ЕДТ-20, виконаного поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) волокном, від параметра k вздовж меридіану та кута θ :
1 – практичні рекомендації Bureau Veritas, 2 – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

Встановлено, що зі збільшенням параметра k та наближенням до внутрішнього екватору тороїдальної оболонки модуль пружності E_θ збільшується за рахунок збільшення товщини в цій зоні, а E_ψ , навпаки, зменшується, оскільки частина повздовжніх шарів в загальній товщині стінки оболонки зменшується.

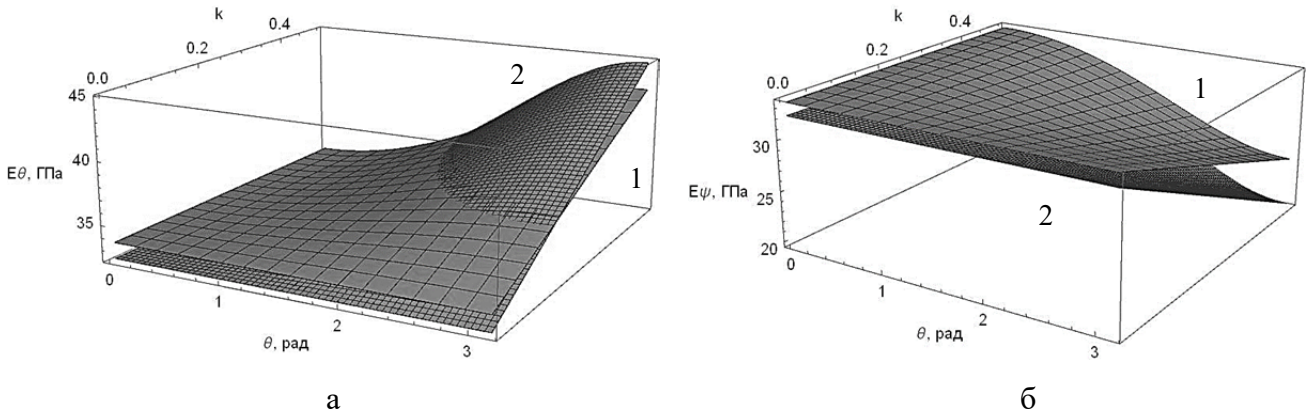


Рис. 4. Залежність модуля пружності E_θ (а) та E_ψ (б) СП S-2 GLASS/ЕДТ-20, виконаного поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) волокном, від параметра k вздовж меридіану та кута θ :

1 – практичні рекомендації Bureau Veritas, 2 – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

Для оболонок, виготовлених перехресним спіральним намотуванням, встановлено, що траєкторія вкладання волокон – геодезична або рівноважна – впливає на діапазон зміни пружних характеристик, і це потрібно враховувати при виборі технологічної схеми намотування з урахуванням умов навантаження тороїдальної оболонки.

Прикладні програми, що використовувались у дослідженнях, включають пакети FreeCAD, Maxima та Apache OpenOffice.

Основні наукові результати розділу опубліковано у роботах [2, 3].

У **третьому розділі** дисертації на основі теорії тонкостінних ортотропних тороїдальних оболонок сформульовано та вирішено задачу напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, що знаходиться під дією зовнішнього гідростатичного тиску. Міцний корпус представлено як замкнену шарувату ортотропну тороїдальну оболонку кругового поперечного перерізу з шарами змінної товщини (рис. 5). Така постановка задачі вперше враховує технологічні можливості реалізації схем армування і нерівномірності розподілу товщини стінки уздовж меридіана, що виникає при намотуванні замкнутих тороїдальних оболонок з врахуванням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas для розрахунку пружних характеристик.

Напружено-деформований стан замкненої тороїдальної оболонки змінної товщини під дією рівномірно розподіленого зовнішнього тиску p [Па] розглядається як вісесиметрична задача (за координатою ψ). Система рівнянь рівноваги для вісесиметричної задачі (рис.2) ортотропної тороїдальної оболонки для т. $K(\theta)$ має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial B T_1}{\partial \theta} - \frac{\partial B}{\partial \theta} + A B k_1 N_1 = 0 \\ -(k_1 T_1 + k_2 T_2) + \frac{1}{A B} \frac{\partial B N_1}{\partial \theta} = p \end{cases}, \quad (5)$$

де $A = a$ і $B = \frac{a}{k}(1 + k \cos \theta)$ – коефіцієнти Ламе для тороїдальної поверхні; $k = \frac{a}{R}$ – геометричний параметр форми тора; k_1, k_2 – головні кривизни; N_1, T_1, T_2 – погонні зусилля.

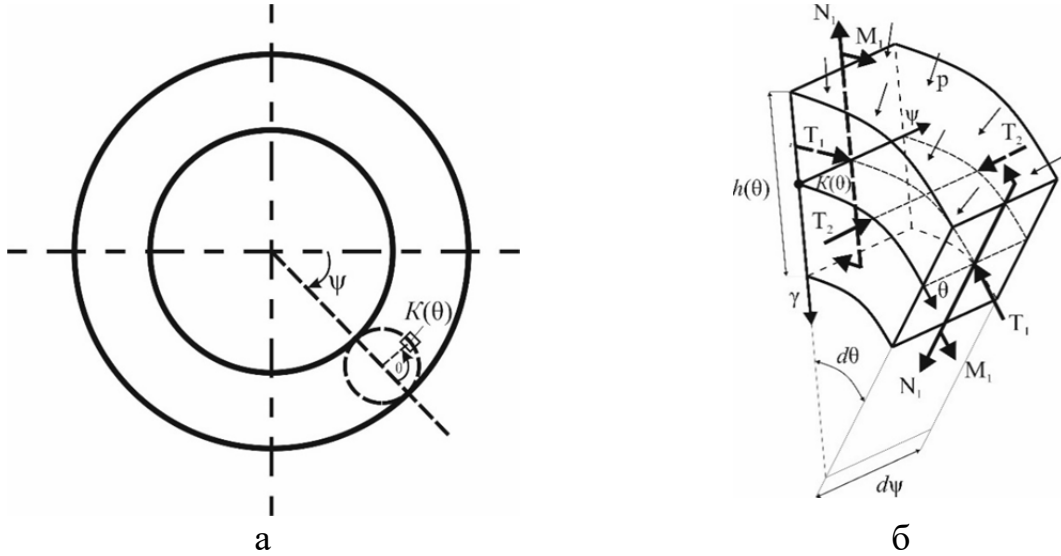


Рис. 5. Геометричні параметри діаметрального перерізу тороїдальної оболонки змінної товщини (а) та погонні зусилля в точці типу $K(\theta)$, серединної поверхні оболонки (б)

В формулі (5) та наступних індекси 1 і 2 відповідають двом криволінійним координатам θ і ψ , відповідно.

В основі теорії згинання тонких оболонок прийнята гіпотеза прямих нормалей, за якою точки, що належать нормалі до серединної поверхні до деформації, залишаються лежати на прямій, нормальній до серединної поверхні, і після деформації. Тобто, в процесі деформації оболонки прямолінійність нормалей декілька порушується: це пов'язано зі зсувами в перерізах, нормальних до серединної поверхні. Тому гіпотеза прямих нормалей зводиться до припущення про те, що зсуви в нормальних перерізах малі в порівнянні з кутами поворотів нормалей і тому деформацією зсуву можна, як правило, знехтувати.

Геометричні співвідношення мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} + k_1 w(\theta), & \varepsilon_2 &= \frac{1}{A B} \frac{\partial B}{\partial \theta} u(\theta) + k_2 w(\theta), \\ \chi_1 &= -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial k_1}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, & \chi_2 &= -\frac{1}{A^2 B} \frac{\partial B}{\partial \theta} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial k_2}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $u(\theta)$ – тангенціальне переміщення т. $K(\theta)$ вздовж кутової координати θ ; $w(\theta)$ – радіальне переміщення т. $K(\theta)$ по радіусу меридіанного перерізу тора.

Вирази для погонних зусиль та моментів в т. $K(\theta)$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{AB} \frac{\partial BM_1}{\partial \theta}, & N_2 &= 0, \\ T_1 &= C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2, & T_2 &= C_{22}\varepsilon_2 + C_{12}\varepsilon_1, \\ M_1 &= D_{11}\chi_1 + D_{12}\chi_2, & M_2 &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

де C_{ij} , D_{ij} – жорсткості композитної оболонки ($i, j=1, 2$).

Пружні характеристики шару E_1 , E_2 , μ_{12} та μ_{21} визначаються за математичними моделями (4).

Підставляючи значення компонентів деформації з (6) в (7), а потім – отримані вирази для внутрішніх зусиль та моментів з урахуванням змінної товщини поперечного шару ($h_{\Pi}(\theta, k) = h_2 \frac{1+k}{1+k \cos \theta}$) в (5) (враховуючи, що жорсткості $C_{ij}(\theta)$, $D_{ij}(\theta)$ функції від θ для розрахунку оболонки змінної товщини), отримаємо рівняння рівноваги в переміщеннях для замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини:

$$\begin{aligned} L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= 0, \\ L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= p, \end{aligned} \quad (8)$$

де $L_{ij}(i, j=1, 2)$ – лінійні диференціальні оператори.

Для замкненої в обох напрямках кругової тороїдальної оболонки рішення повинно задовольняти періодичності відносно кута θ , тому знаходиться у вигляді:

$$u(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} u_m \sin(m\theta), \quad w(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} w_m \cos(m\theta), \quad (9)$$

Інтегруючи рівняння рівноваги (5) за методом Бубнова-Гальоркіна по θ і ψ по поверхні тора, приймається до уваги, що елемент площі тору дорівнює:

$$ABd\theta d\psi = \left[\frac{a^2(1+k \cos \theta)}{k} \right] d\theta d\psi \quad (10)$$

Після перетворень отримано систему безкінечних лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^M (L_{11m}u_m + L_{21m}w_m) = 0 \\ \sum_{m=0}^M (L_{21m}u_m + L_{22m}w_m) = p \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язання системи (11) при заданих $M = 1, 2, \dots, \infty$ дає значення коефіцієнтів u_m та w_m . Підстановка останніх до (9) дає значення функцій переміщень u та w точки $K(\theta)$.

Для оцінки міцності було використано комбінований енергетичний критерій Цай-Ву - Гофмана для плоского напруженого стану згідно практичних рекомендацій класифікаційного співтовариства Bureau Veritas. Мінімальний припустимий коефіцієнт безпеки для тороїдального міцного корпусу підводного апарату складається з коефіцієнтів, які враховують особливості ПКМ та за рекомендаціями класифікаційного співтовариства Bureau Veritas становить $CF=2,59$.

Отримане аналітичне рішення дозволяє визначити переміщення точки $K(\theta)$ тороїдального міцного корпусу, що знаходиться під дією зовнішнього гідростатичного тиску залежно від геометрії тору, використаної схеми намотування, типу армуючих матеріалів і сполучника, коефіцієнта заповнення об'єму, кількості шарів, укладених в кожному напрямку армування, врахування різновисочинності, яка виникає при використанні способу намотування.

Розроблено та приведено методику розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ, яка реалізована в системі математичного моделювання Maxima.

Збіжність отриманих рішень аналізувалась на числових прикладах для прогинів $w(\theta)$ при утриманні по m кінцевого числа членів ряду $M = 0, 1, \dots, 9$.

Із аналізу збіжності отриманих рішень для прогинів $w(\theta)$ (рис. 6) ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини показано, що достатньо утримувати $M = 3$ члени ряду. Також можна зазначити, що максимальний прогин буде при $\theta = \pm\pi/2$.

Із аналізу збіжності отриманих рішень для нормальних зусиль T_1 та T_2 ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини показано, що достатньо утримувати $M = 3$ члени ряду. Також можна зазначити, що максимальне нормальне зусилля T_1 буде при $\theta = \pm\pi$, а максимальне нормальне зусилля T_2 буде при $\theta = \pm\pi/2$.

Із аналізу збіжності отриманих рішень для згинаючого моменту M_1 та перерізуючої сили N_1 ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини показано, що достатньо утримувати $M = 4$ та $M = 5$ члени ряду відповідно. Також можна зазначити, що максимальний згинальний момент буде при $\theta = \pm\pi/2$, а максимальна перерізуюча сила буде при $\theta = \pm 5\pi/6$.

Прийнято рішення, що для розрахунку НДС намотаного тороїдального міцного корпусу, що знаходиться під дією зовнішнього гідростатичного тиску, буде утримуватися $M = 5$ членів ряду.

Для підтвердження адекватності запропонованої методики її було апробовано на рішеннях, що запропонували науковці Запорізького національного університету (Гребенюк С.Н., Сисоєв Ю.А. та ін.) для функції прогинів. Ними була запропонована методика розрахунку ізотропної тороїдальної оболонки постійної товщини, яка була доведена до числових результатів.

Визначено, що результати опубліковані науковцями та отримані в даній роботі дають близькі значення, що свідчить про адекватність запропонованої моделі для визначення компонентів напружено-деформованого стану.

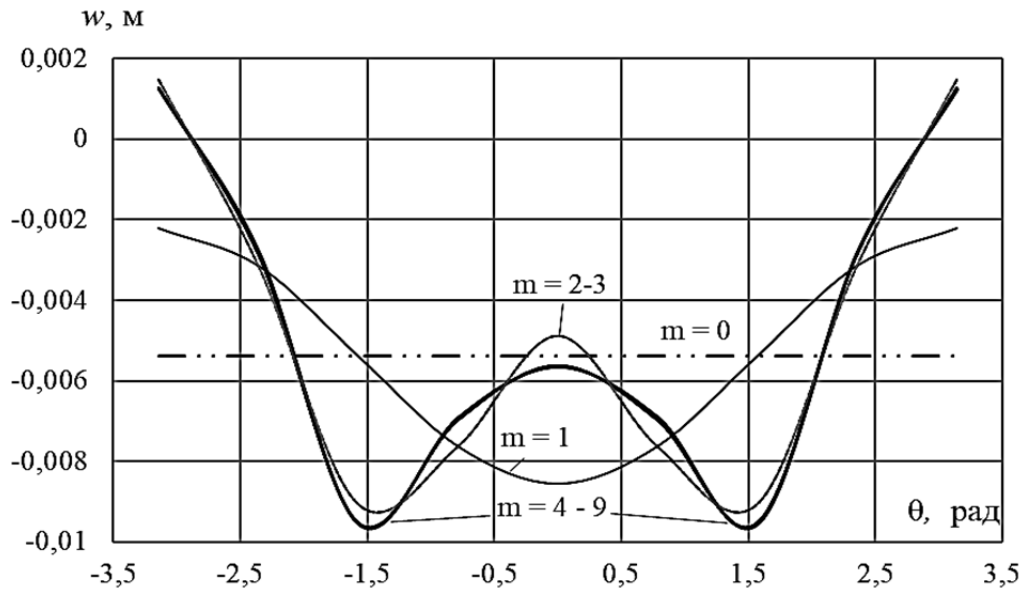


Рис. 6. Збіжність рішень для прогинів ортотропної тороїдальної оболонки при гідростатичному стисканні

Основні наукові результати розділу опубліковано у роботах [2, 3, 4].

У четвертому розділі дисертації виконано дослідження впливу геометричних параметрів тору, схем армування та перспективних типів армуючого наповнювача і сполучника з урахуванням змінної товщини стінки та її осереднення за меридіаном на величину прогинів при гідростатичному стисканні. Досліджено діапазон геометричних параметрів замкнутого кругового тора $0 \leq k \leq 0,3$.

Встановлено, що при збільшенні частини поперечних шарів в загальній масі оболонки величина мембранних напружень σ_θ зменшується на 13% для ВП та 12,6% для СП.

Виконано порівняльну оцінку розробленого методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ на основі розрахункової моделі для поперечного намотування в комбінації з повздовжньою намоткою зі змінною товщиною уздовж меридіана з методом розрахунку, на основі моделі з постійною товщиною стінки. Варіювання кількості шарів відбувалось за допомогою параметра $\delta = (l_2 - l_1) / l_1$. Заміна розрахунку тороїдальної оболонки з шарами змінної товщини на оболонку з осередненою товщиною шарів уздовж поперечного перерізу призводить до зниження радіальних напружень σ_r на 20% (рис.7).

Виконано порівняння прогинів w для тороїдальних міцних корпусів із СП та ВП (виконаних поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням) з традиційно застосовуваними нині металами (міцність корпусів розраховувалася як для ізотропної оболонки змінної товщини в меридіанному перерізі) для міцних корпусів: високоміцна сталь (АК-25), титанові сплави (марки ВТ) і алюмінієві сплави (марки В95).

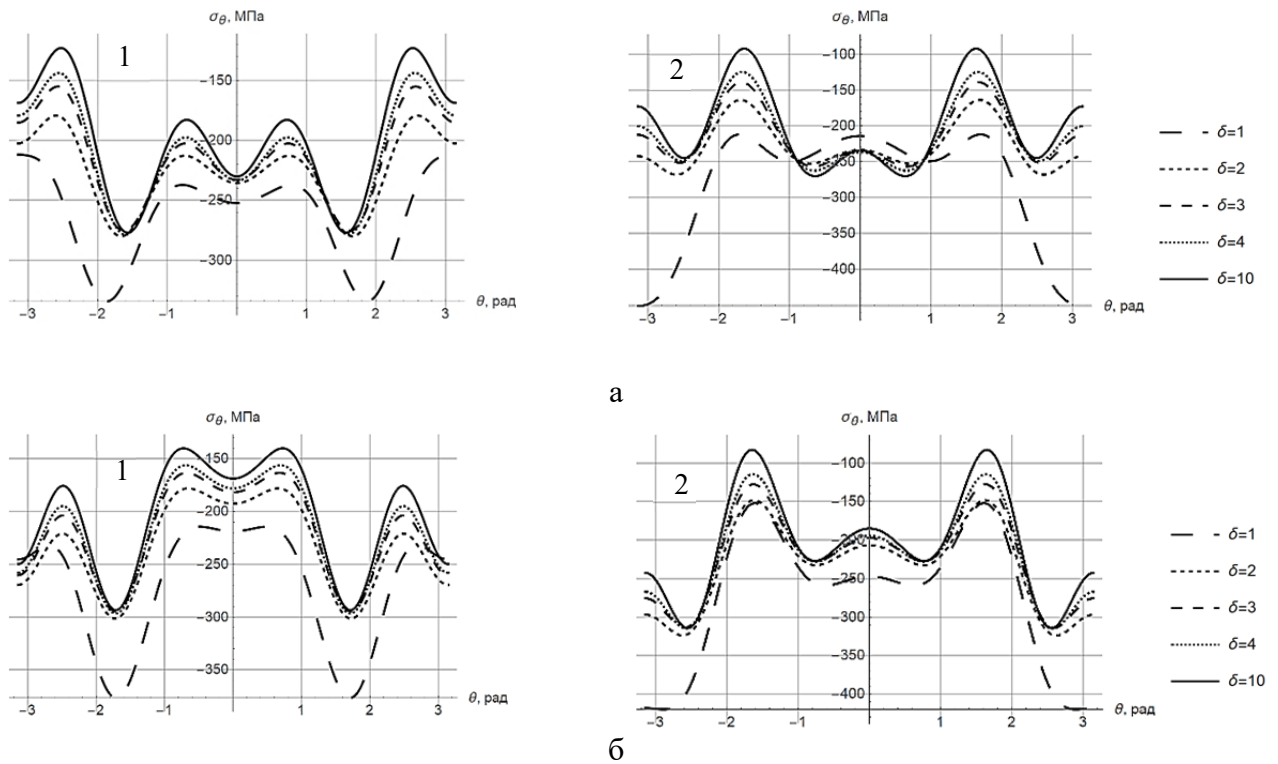


Рис. 7. Епюри розподілу напружень σ_θ для намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $k = 1/3$) на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях на глибині $H = 1000$ м для вуглепластика М35J/Ероху: осередненої товщини (а), змінної товщини (б)

Порівняння показало, що тороїдальний міцний корпус із ВП на основі надвисокомодульних волокон ($E_B = 860$ ГПа) майже не поступається сталі та титановим сплавам (рис. 8). При цьому густина ВП в 4,3 рази менша за густину сталі і в 2,5 рази менша за густину титанового сплаву. Цей факт робить намотаний тороїдальний міцний корпус легшим та технологічнішим в порівнянні з традиційними матеріалами. Тому тороїдальний міцний корпус виготовлений методом намотування із ПКМ має істотні переваги перед аналогічним міцним корпусом із металу.

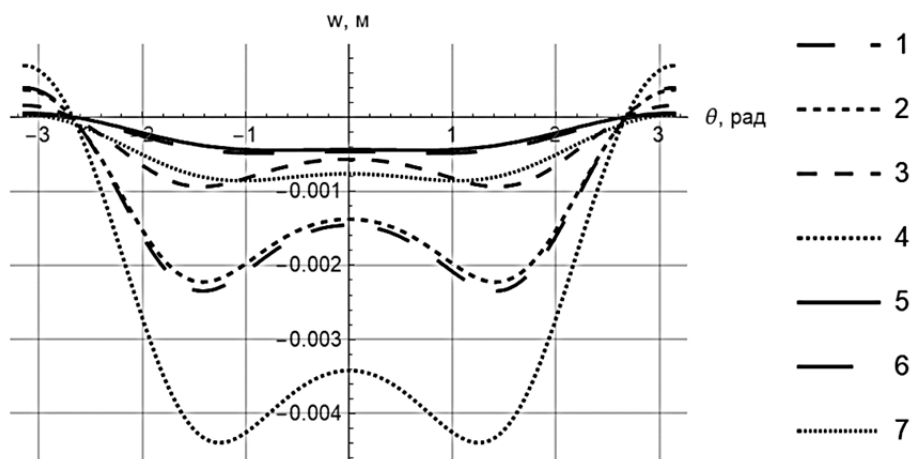


Рис. 8. Залежність прогинів w для тороїдальних міцних корпусів із СП, ВП та традиційних конструкційних матеріалів при $\Delta_m = 0,1$, $k = 0,3$:
1 – ВП М35J/ЕДТ-10; 2 – ВП ІМ10/ЕДТ-10; 3 – ВП CN-90/ЕДТ-10; 4 – СП ВМПС/ЕДТ-10, 5 – сталь, 6 – титанові сплави, 7 – алюмінієві сплави

Виконано порівняльну оцінку розробленого методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ на основі розрахункової моделі зі змінною товщиною уздовж меридіана з методом розрахунку, що базується на теоретичній оцінці пружних характеристик та використовує безмоментне рішення Фепля. Встановлено, що використання другої методики призводить до заниження напружень в два рази, що, в свою чергу, призводить до помилки в небезпечну сторону.

Основні наукові результати розділу опубліковано у роботах [2, 3].

В п'ятому розділі приведено результати оцінки ефективності міцного корпусу тороїдальної форми виготовленого способом намотування із ПКМ за наступними критеріями: 1) відношення маси міцного корпусу m_{MK} до його водотоннажності m_w , яке забезпечує плавучість і є основним критерієм якості міцного корпусу та має бути найменшим; 2) вартість міцного корпусу.

Співвідношення маси тороїдального міцного корпусу m_{MK} до його водотоннажності m_w :

$$\frac{m_{MK}}{m_w} = 2 \frac{a h_m \rho}{a + h_m \rho_w} \quad (10)$$

де ρ – густина матеріалу корпусу, кг/м^3 , ρ_w – густина морської води ($\rho_w = 1027 \text{ кг/м}^3$), h_m – осереднена за меридіаном тороїдального корпусу товщина $h(\theta, k)$.

Досліджено вплив фізико-механічних властивостей традиційних металів для міцних корпусів підводних апаратів, таких як: сталь ($\sigma_{0,2} = 800 \dots 900 \text{ МПа}$), алюмінієві і титанові сплави та СП і ВП (отримані поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням) на масогабаритні показники (m_{MK}/m_w та $\Delta_m = h_m/a$) міцних корпусів тороїдальної форми кругового поперечного перерізу з $k=0,33$ (рис. 9) і $k=0,143$. Товщина для розрахунку маси корпусу визначається з умови міцності.

Встановлено, що для міцних корпусів, виконаних поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням співвідношення m_{MK}/m_w збільшується, на відміну від співвідношення мас, де товщина визначалась з умови стійкості.

На підставі розробленої Грековим В.М. (ФДУП ЦНДІ ім. акад. О.Н. Крилова) достатньої умови вибору матеріалів для міцних корпусів підводних апаратів без детального опрацювання всього проекту отримано оцінку техніко-економічної ефективності використання різних матеріалів для міцного корпусу тороїдальної форми з урахуванням їх вартості при обмеженні за міцністю. Порівняльні дані за вартістю були прийнятими відносно до вартості 1 кг сталі.

Встановлено, що при збільшенні робочої глибини занурення СП без зростання величини модуля пружності волокна неефективні через необхідність збільшення товщини оболонки.

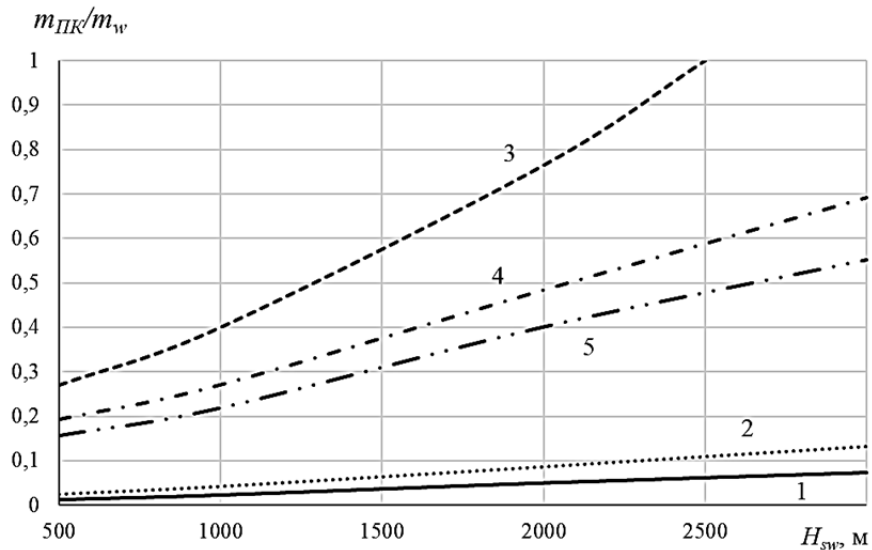


Рис. 9. Залежність m_{MK}/m_w міцних корпусів тороїдальної форми ($k=0,33$) із різних конструкційних матеріалів від робочої глибини занурення:

1 – СП GLASS/ЕДТ-10, 2 – УП М35J/ЕДТ-10, 3 – сталь, 4 – титанові сплави, 5 – алюмінієві сплави

Показано, що виготовлення міцного корпусу тороїдальної форми способом намотування із ПКМ з високою питомою міцністю та жорсткістю дозволить зменшити його масу і вартість та збільшити корисне навантаження підводного апарату.

В додатках наведено: методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із ПКМ способом намотування волокном, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі сформульовано та вирішено низку задач, які забезпечили досягнення поставленої мети наукового дослідження – удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном, а саме:

1. **Вперше**, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки при дії гідростатичного тиску на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі. Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину в результаті використання методу намотування та рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів.

Встановлено, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом призводить до перебільшення пружних характеристик шару, в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas: для ВП на 20%, а для СП розбіжність складає 5,6%.

2. За допомогою отриманої математичної моделі **удосконалено** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою). Проведено аналіз збіжності ряду в розв'язку та прийнято достатньою кількість членів ряду $M = 5$.

3. На основі удосконаленого методу розроблено розрахунково-аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном. Методика надає можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування.

4. Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих наповнювачів та сполучників, змінної товщини оболонки та її осереднення. Встановлено, що неврахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування та особливостей розрахунку композиційних матеріалів і використання спрощених методів розрахунку призводить до заменшення напружень до 50% та виникненню помилки в небезпечну сторону.

5. Проведено оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для виготовлення тороїдальних міцних корпусів, при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів. Встановлено, що для міцних корпусів підводних апаратів тороїдальної форми найбільш раціональними є епоксипластики на основі середніх за модулем та високоміцних вуглецевих волокон.

6. **Отримав подальший розвиток** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації

1. Присташ С.Ф., Бурдун Є.Т. Метод розрахунку міцного корпусу підводного апарату в формі тору, виконаного намотуванням. *Вісник Одеського*

національного морського університету. Одеса, 2017. № 4 (53). С. 152–163. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)

2. Sizonenko O., Burdun E., **Prystash S.** Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by winding. International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII Issue, 6/2018. – P. 240-243 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)

3. Sizonenko O., Burdun E., **Prystash S.** Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by spiral winding. International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII, Issue 11/2018. – P. 466-469 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)

4. **Присташ С.Ф.** Аналіз стану та проблем розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2020. № 2 (53). С. 152–163. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. **Бєла С.Ф.**, Бурдун Є.Т. Рівняння згину тонкостінної ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини із полімерних композиційних матеріалів. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю (Миколаїв, 22–24 трав. 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 220-223. (Форма участі - очна)

6. **Бєла С.Ф.** Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Макаровські читання*: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців, присвячений Дню науки (Миколаїв, 23-24 травня 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 17-18.

7. **Бєла С.Ф.**, Бурдун Є.Т. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Композиционные материалы в промышленности*: матеріали 33 Міжнародної конференції (СЛАВПОЛИКОМ) (Ялта, 27-31 травня 2013р). Ялта, 2013р. С. 226-227. (Форма участі - очна)

8. **Бєла С.Ф.** Рівняння згину міцного корпусу підводного апарату в формі тора виконаного спіральним намотуванням. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 5-7 листопада 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 5-7. (Форма участі - очна)

9. **Бєла С.Ф.** Рівняння згину тороїдального міцного корпусу для підводно-технічних засобів виконаних спіральним намотуванням. *Макаровські читання*:

матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців (Миколаїв, 22-23 травня 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 17. (Форма участі - очна)

10. **Белая С.Ф.**, Петрюк О.В. Напряженное состояние прочного корпуса подводного аппарата в форме тора из композиционных материалов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 20-22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 98. (Форма участі - очна)

11. **Белая С.Ф.** Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов выполненных намоткой. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 6-тої Міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 24-25 вересня 2015 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2015 р. С. 168 – 169. (Форма участі - заочна)

12. **Белая С.Ф.**, Петрюк О.В. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 24 – 27 вересня 2015.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 57-59. (Форма участі - очна)

13. **Белая С.Ф.**, Бурдун Е.Т. Влияние схемы намотки на прочность тороидального прочного корпуса подводного аппарата при гидростатическом сжатии. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 18-20 листопада 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 3 - 6. (Форма участі - очна)

14. Бурдун Е.Т., **Белая С. Ф.**, Оценка эффективности использования композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 19-20 травня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 110 – 112. (Форма участі - очна)

15. **Белая С. Ф.**, Бурдун Е.Т. Напряженно-деформированное состояние тороидального прочного корпуса подводного аппарата при различных схемах намотки. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12 – 14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 84–86 (Форма участі - очна)

16. Бурдун Є.Т., **Присташ С.Ф.** Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату в формі тору. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С. 116 – 118. (Форма участі - очна)

17. **Присташ С. Ф.**, Бурдун Е.Т. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату у формі тору, виготовленого із ПКМ. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної

конференції (Миколаїв, 11 – 13 жовтня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С. 117–118 (Форма участі - очна)

18. Бурдун Є.Т., **Присташ С.Ф.** Аналіз напружено-деформованого стану міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виконаних із ПКМ при різних схемах намотування. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23 – 24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 81-82. (Форма участі - очна)

19. **Присташ С. Ф.** Про розрахунок міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виготовленого із ПКМ методом намотування. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті*: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 29 – 31 травня 2018 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018 р. С. 238-239. (Форма участі - очна)

20. Бурдун Є.Т., **Присташ С.Ф.** Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу підводно-технічного засобу, виготовленого спіральним намотуванням. *Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування*: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 17 – 19 жовтня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 20-21. (Форма участі - очна)

21. **Присташ С.Ф.** Особливості напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу виконаного намотуванням із ПКМ. *Сучасні технології обробки матеріалів*: матеріали всеукраїнської наукової конференції (Миколаїв, 01 – 02 листопаду 2018 р.). Миколаїв: ІПіТ НАН України, 2018 р. С 25. (Форма участі - очна)

22. Бурдун Е.Т., **Присташ С. Ф.**, Гейко С.П., Копійка С.В.. Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик тороїдального міцного корпусу підводного засобу виконаного намотуванням волокном. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 26 – 28 вересня 2019 р.). Миколаїв: НУК, 2019 р. С. 239–243 (Форма участі - очна)

23. Бурдун Є.Т., **Присташ С.Ф.** Аналіз впливу змінної товщини тороїдального корпусу підводного засобу на його напружено-деформований стан. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20-21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С 111-114. (Форма участі - очна)

АНОТАЦІЯ

Присташ С.Ф. Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, виготовленого намотуванням. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будування суден». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

Отримано математичну модель, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину оболонки в результаті використання намотування та рекомендації класифікаційного товариства Bureau Veritas щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів.

За допомогою отриманої математичної моделі удосконалено метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою).

Розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ.

Сформульовано практичні рекомендації щодо проектування тороїдальних міцних корпусів із ПКМ, зокрема із склопластика та вуглепластика, які задовольняють вимогам технологічності та критерію мінімуму маси.

Ключові слова: тороїдальний міцний корпус, напружено-деформований стан, гідростатичний тиск, склопластик, вуглепластик, намотування.

АННОТАЦИЯ

Присташ С.Ф. Совершенствование метода расчета прочности корпуса подводного аппарата тороидальной формы, изготовленного намоткой. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 «Конструирование и строительство судов». - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2021.

Полученная математическая модель, в отличие от существующих моделей, учитывает переменную толщину оболочки в результате использования намотки и рекомендаций классификационного общества Bureau Veritas по оценке упругих характеристик композиционного материала по свойствам его компонентов.

С помощью полученной математической модели усовершенствован метод расчета напряженно-деформированного состояния и оценки прочности корпуса подводного аппарата тороидальной формы при гидростатическом сжатии, что позволило учесть конструктивно-технологические факторы производства из полимерных композиционных материалов способом намотки волокном (или лентой).

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния прочного корпуса подводного аппарата тороидальной формы при гидростатическом

сжатии с учетом конструктивно-технологических факторов изготовления его способом намотки волокном из ПКМ.

Сформулированы практические рекомендации по проектированию тороидальных прочных корпусов из ПКМ, в частности из стеклопластика и углепластика, которые удовлетворяют требования технологичности и критерия минимума массы.

Ключевые слова: тороидальный прочный корпус, напряженно-деформированное состояние, гидростатическое давление, стеклопластик, углепластик, намотка.

SUMMARY

Prystash S. F. Improvement of the method of calculating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape, made by winding. – Manuscript.

The thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.08.03 Design and building of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

The mathematical model, which, unlike existing ones, takes into account the changes of casing thickness, caused by using winding, as well as the recommendations of Bureau Veritas classification society on the evaluation of elastic characteristics of composite materials by the properties of its components, is developed

The method of calculating the stressed-deformed state and evaluating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression was improved using obtained mathematical model. This allowed taking into account construction and technical factors of the production of pressure hull from polymer composite materials by winding with fiber (or tape).

The methodology of calculating the stressed-deformed state of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression, which takes into account construction and technical factors of the production of pressure hull from polymer composite materials by winding with fiber and polymer composite materials.

The practical recommendations on the design of toroidal pressure hulls from polymer composite materials, in particular from fiberglass and carbon fiber, which meet the requirements of manufacturability and the criterion of minimum weight, were issued.

Key words: toroidal pressure hull, stressed-deformed state, hydrostatic pressure, fiberglass, carbon fiber, winding

Підп. до друку 24.03.2021. Формат 60×84/16.
Обл.-вид. арк. 0,9. Ум. друк. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам. 1508-1.

Поліграфічне підприємство СПД Румянцева Г. В.
54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.
Свідоцтво МК № 11 від 26.01.2007 р.