

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Юреско Тетяна Анатоліївна

УДК 629.5.01:629.584

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВОДНИХ НАСЕЛЕНИХ
АПАРАТІВ ТЕПЛОІЗОЛЮЮЧИМИ БЛОКАМИ ПЛАВУЧОСТІ**

Спеціальність 05. 08. 03 – Конструювання та будування суден

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2017

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,
завідувач кафедри проектування та
виробництва конструкцій із композиційних
матеріалів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кравцов Віктор Іванович,
Національний авіаційний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри машинознавства;

кандидат технічних наук
Єгоров Олександр Геннадійович,
ТОВ «Морське Інженерне Бюро»,
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться “17” жовтня 2017 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв України, 9, ауд. 360.

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

Автореферат розісланий “12” вересня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

В.В. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день Світовий океан є найбагатшим джерелом ресурсів на планеті, його освоєння є актуальним завданням загалом державного значення, що відкриває перспективи для вирішення багатьох глобальних проблем.

Ефективність освоєння Світового океану нерозривно пов'язана з використанням найбільш дієвих методів океанологічних досліджень, застосуванням новітніх технологій і модернізованого оснащення.

Проведення підводних робіт здійснюється за допомогою технічних засобів в автоматичному режимі або з безпосередньою присутністю людини на борту. Однією з умов населеності екіпажу, враховуючи низькі температури води на глибині (0...+4 °С), є підтримання нормальної температури повітря оточуючого простору, що забезпечують бортові теплогенеруючі пристрої.

Аварійні ситуації на борту підводного населеного апарату (ПНА), які виникають внаслідок технічних несправностей, часто супроводжуються знеструмленням. Припинення обігріву підводного засобу на тривалий час, до 10 год і більше, веде до поступового охолодження внутрішнього простору, що може викликати у людини гіпотермію і привести до загибелі.

Дана проблема неодноразово мала місце при проведенні підводних робіт у Північному морі, а також у водах Атлантичного океану і стимулювала пошук нових шляхів теплового захисту ПНА в непередбачених обставинах.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є використання додаткових блоків плавучості у вигляді суцільного облицювання зовнішньої поверхні міцного корпусу у вигляді шкарлупи. Така конфігурація блоків зменшить тепловитрати і, враховуючи високу силу підтримання блоків (густина менше 600 кг/м³), надасть підводному засобу додаткову плавучість.

Традиційні теплоізолюючі блоки з легковагомих спінених матеріалів (піно та поропласти) мають низький показник співвідношення між гідростатичною міцністю і густиною, обмежені за глибиною занурення до 150...200 м.

Блоки плавучості на основі синтактичного піноскла (матеріал зі спечених скляних мікросфер) з коефіцієнтом теплопровідності 0,035...0,04 Вт/(м·°К), мають значну відкриту поруватість (до 25 %), та, як наслідок – високе водопоглинання, що обмежує глибину експлуатації до 100...200 м.

Блоки зі сферопластика (матриця – епоксидна смола, наповнювач – скляні мікросфери) стійкі до водопоглинання, експлуатуються на глибинах 6000 м, однак мають достатньо високе значення теплопровідності 0,13 Вт/(м·°К) і високу вартість.

Вирішенням питання облицювання поверхні підводної конструкції блоками плавучості з низьким водопоглинанням на глибинах 1500...2000 м, при достатньо високих теплоізоляційних характеристиках (коефіцієнт теплопровідності 0,085 Вт/(м·°К)), є застосування сферопластику з додатковою поруватістю (СДП).

За останні десятиріччя питанням руйнування блоків з традиційного сферопластика під дією різноманітних навантажень присвячена велика кількість

наукових робіт вітчизняних та закордонних вчених: Хорошун Л. П., Федонюк Н. Н., Спіро В. Е., Панфілов М. О., Телегін В. А., Кржечковский П. Г., Бурдун С. Т., Головченко Ю. Б., Копійка С. В. та інші, проте в їх роботах не приділялось уваги дослідженню впливу накопичених пошкоджень на зміну теплофізичних властивостей СДП при дії на блок експлуатаційних навантажень.

Відсутні в літературі і методи прогнозування теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП, а також методика прогнозування терміну служби блоків в залежності від умов експлуатації та з урахуванням дії кліматичного фактору. Розв'язання цих питань в дисертаційній роботі зумовлює актуальність проведення експериментальних та науково-прикладних досліджень у цьому напрямку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в області глибоководних підводних засобів є провідним, визнаним міжнародною спільнотою напрямком наукової та практичної діяльності Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (НУК), який пов'язаний з виконанням законів і постанов Кабінету Міністрів України: закон «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості» від 06.09.2012 р.; постанова №1150 «Про затвердження Державної цільової оборонної програми будівництва кораблів класу "корвет" за проектом 58250» від 9.11.2011 р.; постанова № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року» від 7.09. 2011 р., в яких одним з напрямів є перехід до моделі інноваційного розвитку суднобудування України шляхом впровадження нових матеріалів.

Дисертація включає результати досліджень, які було отримано при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР): НДР № 1629 «Розробка матеріалів плавучості підводної техніки на основі моделювання їх пошкоджуваності в умовах експлуатації» (2007–2008 р.р., номер державної реєстрації 0107U000717), НДР №1715 «Розробка методів проектування судових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів при статичних і динамічних навантаженнях» (2009–2010 р.р., номер державної реєстрації 0109U002221), де здобувач брав участь як виконавець.

Мета наукового дослідження. Метою роботи є удосконалення конструкції підводного населеного апарату за рахунок надання додаткової функції теплоізоляції окремим елементам плавучості зі СДП у вигляді зовнішнього суцільного облицювання міцного корпусу з призначенням ресурсу роботи блоків в умовах експлуатації: тривалі глибоководні занурення, циклічні глибоководні занурення-спливання на поверхню в районах з температурою повітря нижче 0°C.

Основні завдання наукового дослідження. Для реалізації даної мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Вибрати та обґрунтувати напрями удосконалення блоками плавучості конструкції ПНА, що працює в умовах тривалих і циклічних занурень на

глибинах 1500...2000 м та підіймається на поверхню в районах з низькою температурою повітря.

2. Експериментально дослідити механізм накопичення пошкоджень при тривалих гідростатичних навантаженнях та встановити їх вплив на зміну теплоізоляційних властивостей блоків плавучості зі СДП.

Розробити математичну та обґрунтувати фізичну моделі накопичення пошкоджень, побудувати розрахункову модель зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП у складі ПНА під час тривалих занурень на глибини 1500...2000 м.

3. Експериментально дослідити механізм накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП при циклічному зануренні-спливанні ПНА на поверхню в умовах низьких температур повітря (нижче 0 °С).

На основі досліджень розробити математичні моделі накопичення пошкоджень та зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП в складі ПНА під впливом цикло-гідростатичних навантажень.

4. Експериментально встановити взаємозв'язок між пошкоджуваністю та зміною теплоізоляційних властивостей блоків плавучості зі СДП у складі ПНА.

5. Розробити методику, яка на стадії проектування підводної конструкції з глибиною занурення 1500...2000 м дає змогу прогнозувати втрату плавучості апарату і зміну температури всередині міцного корпусу внаслідок накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при експлуатаційних навантаженнях.

6. Удосконалити конструкцію ПНА шляхом модифікації традиційної схеми розташування блоків плавучості відносно міцного корпусу.

Об'єктом дослідження є процес накопичення пошкоджень у теплоізолюючих блоках плавучості в складі конструкції підводного населеного апарату.

Предмет дослідження – ресурс роботи теплоізолюючих блоків плавучості в конструкції підводного населеного апарату в залежності від умов експлуатації.

Методи дослідження:

– статистичні методи обробки результатів експериментів використані для визначення достовірності отриманих результатів досліджень;

– методи кореляційного аналізу використані для визначення зв'язку між пошкоджуваністю і зміною теплоізоляційних властивостей блоку зі СДП при навантаженні гідростатичним тиском;

– методи теорії лінійної в'язкопружності і механіки руйнування використані для отримання математичної моделі прогнозування пошкоджуваності блоку зі СДП в залежності від глибини і часу експлуатації ПНА;

– методи теорії тепломасопереносу і теорії дифузії при проникненні та розподіленні води в порах СДП використані для отримання фізичної моделі прогнозування пошкоджуваності блоків плавучості в складі ПНА з урахуванням масштабного фактору;

– методи теорії ймовірності і математичної статистики використані для перевірки адекватності математичної та фізичної моделі пошкоджуваності блоків зі СДП при тривалих гідростатичних і кліматичних навантаженнях.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні конструкції підводного населеного апарату шляхом надання додаткової функції теплоізоляції окремим елементам плавучості у вигляді зовнішнього суцільного облицювання міцного корпусу, що забезпечує теплову ізоляцію житловому відсіку і, на відміну від існуючих конструктивних рішень, зменшує енергетичні витрати на обігрів, що підвищує рівень безпеки екіпажу в аварійних ситуаціях.

У результаті досліджень:

- вперше, в конструкції ПНА запропоновано використати додаткові блоки плавучості зі СДП густиною $450...500 \text{ кг/м}^3$ у вигляді зовнішнього суцільного облицювання міцного корпусу, які, на відміну від закладних елементів плавучості з пінопластів, окрім збільшення сили підтримання, зберігають тепло всередині апарату під час тривалих занурень на глибини $1500...2000 \text{ м}$ та при аварійному знеструмленні на борту, що підвищує рівень безпеки екіпажу;

- вперше, базуючись на аналізі результатів експериментальних і теоретичних досліджень, встановлено, що ПНА з сферичним міцним корпусом, працюючи на глибинах від 1500 до 2000 м , втрачає плавучість за рахунок накопичених пошкоджень в блоках зі СДП від 5 до 13% при тривалості занурення до 1000 годин, від 8 до 26% при 1000 циклах занурень-спливань при температурах повітря нижче 0°C , теплопровідність при цих пошкодженнях збільшується від $0,085$ до $0,15 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{K)}$;

- удосконалено методику проектування ПНА шляхом урахуванням втрати сили плавучості і теплоізолюючих властивостей блоків зі СДП внаслідок накопичення пошкоджень, що дає змогу визначити втрату сили плавучості всього апарату і спрогнозувати зміну температури всередині житлового відсіку на початкових етапах проектування;

- набули подальшого розвитку розроблені математичні моделі накопичення пошкоджень в блоках зі СДП на основі синтезу моделей лінійної в'язко-пружності та механіки руйнування на базі логістичного розподілу і обґрунтовано фізичну модель на основі аналогії з явищем дифузії, які дозволяють прогнозувати ресурс роботи блоків будь-якої форми та розміру в конструкції ПНА при експлуатаційних навантаженнях.

Практичне значення одержаних результатів:

- удосконалення конструкції блоків плавучості ПНА дозволило отримати додаткову функцію теплоізоляції з метою зменшення теплових витрат на 75% і забезпечення нормальних умов населеності всередині житлового відсіку;

- додаткова теплова ізоляція міцного корпусу ПНА дозволила збільшити його живучість до $10...15$ годин під час аварійних ситуацій;

- запропонована нова конструкція блоків плавучості у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу апарату блоками зі СДП густиною $450...500 \text{ кг/м}^3$ і коефіцієнтом теплопровідності $0,085 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{K)}$ забезпечила подвійну експлуатаційну функцію – плавучості та теплоізоляції, що підвищило конкурентоздатність вітчизняного оснащення підводних технічних засобів для глибин експлуатації до 2000 м ;

– доведено можливість використання теплоізолюючих блоків плавучості зі СДП в конструкціях апаратів, які працюють в «жорстких» кліматичних умовах при зануреннях на глибини континентального шельфу з врахуванням впливу від’ємних температур повітря на зміну ресурсу роботи блоків плавучості;

– запропонований алгоритм прогнозування ресурсу роботи блоків зі СДП дозволяє оцінити втрату плавучості і зміну температури всередині міцного корпусу апарату за вихідними даними: глибина, тривалість занурення, кількість циклів кліматичних навантажень, допустимий рівень пошкоджуваності або скорегувати залишковий ресурс роботи блоків в складі апарату за вказаною у судовому журналі передісторією навантажень.

Практичне застосування результатів досліджень відображено в наступних документах:

– «Программа и методика определения температуропроводности опытных образцов легковесомого материала плавучести сферопластика» УКФА.360107.001 М. – Миколаїв: НУК, 2007. 11 с.;

– «Программа–методика исследовательских испытаний по определению повреждаемости блоков плавучести на основе сферопластика с дополнительной пористостью при длительном нагружении гидростатическим давлением» УКФА.360107.002 М. – Миколаїв: НУК, 2012. 9 с.;

– «Программа–методика исследовательских испытаний по определению повреждаемости блоков плавучести из сферопластика с дополнительной пористостью при циклическом воздействии гидростатического давления воды и ее перехода в кристаллическое состояние при замерзании» УКФА.360107.003 М. – Миколаїв: НУК, 2012. 8 с.;

– «Методика проектирования подводного обитаемого аппарата с учетом уменьшения подъемной силы и снижения теплоизоляционных свойств блоков плавучести из сферопластика с дополнительной пористостью за счет накопления повреждений в условиях эксплуатации». УКФА.360107.007 М. – Миколаїв: НУК, 2015. 12 с.;

– Стандарт підприємства «Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі сферопластика з додатковою закритою поруватістю. Склад і властивості». СТП 2.066753-05.13.08. Затверджено і введено в дію 2008 р. 8 с.

Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін студентам напряму 6.051101 – “Авіа- і ракетобудування” (акт від 19.09.2016).

Результати досліджень, які викладені в роботі, використано при будівництві корабля класу «корвет» в ПАТ «Черноморский судостроительный завод» м. Миколаєва (акт від 18.01.2016) та можуть в подальшому бути використані при проектуванні підводно-технічних систем і комплексів на інших підприємствах, що виготовляють блоки плавучості.

Особистий внесок здобувача. Наведені у дисертації положення і висновки, всі експериментально отримані закономірності і теоретичні моделі розроблені особисто здобувачем. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [1] – проведення експериментального дослідження, обробка

статистичної бази; [2], [3] – проведення експериментального дослідження, перевірка й корегування отриманих результатів, одержання регресійних залежностей; [4] – обробка статистичної бази; [5] – обґрунтування моделі пошкоджуваності блоків, кореляційний аналіз результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи було представлено на 10 конференціях: 28–30, 33-й міжнародних конференціях-виставках «Композиционные материалы в промышленности (СЛАВПОЛИКОМ)» (Ялта, 2008–2010, 2013 рр.); IX міжнародна наукова конференція інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (Миколаїв, 2009 р.); II міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Миколаїв, 2012 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Електротехніка і електромеханіка» (Миколаїв, 2012 р.). Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 2013 р.); VI–VII міжнародній науково-практичній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2015–2016 рр.).

Публікації. Основні результати досліджень, що увійшли до дисертації, викладені у друкованих працях: 7 статтях у фахових наукових виданнях, рекомендованих ДАК МОН України, 1 стаття у наукометричному виданні (з них 3 статті – без співавторів), 10 публікацій у збірниках матеріалів українських і міжнародних науково-технічних конференцій (з них 5 – без співавторів).

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 12 додатків, списку використаних джерел з 158 найменувань. Основний обсяг дисертації міститься на 146 сторінках та має 41 ілюстрацію з текстом, 17 таблиць з текстом. Обсяг додатків складає 100 аркушів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

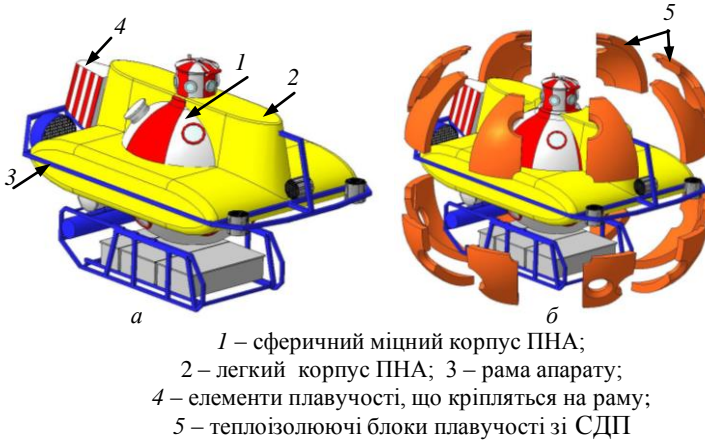
У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні задачі дослідження, сформульовано об'єкт, предмет та основні методи дослідження, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо апробації та опублікування результатів роботи.

У першому розділі визначено актуальність застосування ПНА, наведено найбільш поширені види підводної техніки та розглянуто стан розвитку конструкцій плавучості для них. Проаналізовано їх переваги та недоліки.

Відзначено, що внутрішній обігрів ПНА здійснюється за рахунок акумуляторних батарей, розташованих на борту. У випадках аварій має місце знеструмлення, позбавлені електричної енергії підводні населені засоби з часом охолоджуються до температури заборотної води.

Запропоновано удосконалити ПНА зі сферичним міцним корпусом (рис.1, а), що експлуатується на глибинах 1500..2000 м, шляхом модифікації схеми розташування блоків плавучості, використовуючи блоки зі СДП у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу (рис.1, б) з метою забезпечення

додаткової плавучості, збереження тепла всередині житлового відсіку ПНА при тривалих зануреннях в разі виникнення аварійних ситуацій.



- 1 – сферичний міцний корпус ПНА;
 2 – легкий корпус ПНА; 3 – рама апарату;
 4 – елементи плавучості, що кріпляться на раму;
 5 – теплоізолюючі блоки плавучості зі СДП

Рисунок 1 – Типова конструкція ПНА зі сферичним міцним корпусом

У другому розділі дисертації викладено загальну методику та основні методи дослідження з визначення ресурсу роботи теплоізолюючих блоків плавучості зі СДП в конструкції ПНА в експлуатаційних умовах.

Основне робоче навантаження на блоки зі СДП це – гідростатичний тиск, дія якого супроводжується накопиченням пошкоджень – поступовим руйнуванням повітряних комірок і проникненням води всередину блоку. Це призводить до зменшення сили плавучості блоків, що впливає на баластування всього ПНА та знижує теплоізоляційні властивості СДП, погіршуючи тепловий захист міцного корпусу.

Отже, основна увага в дисертаційній роботі приділяється експериментальному дослідженню процесу накопичення пошкоджень в СДП та його впливу на зміну плавучих і теплоізоляційних властивостей блоків в конструкції апарату в умовах експлуатації.

Експлуатаційні навантаження, що розглядаються – довготривалі занурення, характерні для стаціонарного режиму роботи ПНА, і кліматичний вплив, який притаманний для циклічного занурення апарату та спливання на поверхню в умовах температур повітря нижче за 0°C. При проведенні експериментальних досліджень застосовується факторний експеримент.

Факторами впливу для тривалих навантажень є рівень гідростатичного тиску P (глибина занурення) та тривалість навантаження τ (час занурення); для кліматичних випробувань – рівень гідростатичного тиску P , температура заморожування T , кількість повторно кліматичних навантажень N . Для вказаних експлуатаційних навантажень розроблено відповідні програми-методики проведення експерименту.

Статистичними методами обробки результатів експериментів встановлюється достовірність отриманих результатів досліджень.

Методи кореляційного аналізу застосовуються для встановлення зв'язку між пошкоджуваністю і зміною теплоізоляційних властивостей блоку зі СДП при експлуатаційних навантаженнях.

З використанням методів теорії лінійної в'язкопружності і механіки руйнування будується математична модель накопичення пошкоджень у блоках зі СДП.

У *третьому розділі* дисертації представлені експериментальні дослідження блоків зі СДП при експлуатаційних навантаженнях, які здійснювалися на моделях, що мали циліндричну форму з радіусом $R=10$ мм і довжиною $L=100$ мм. На першому етапі визначено початкові характеристики моделей блоків:

- питома густина знайдена методом гідростатичного зважування ($\rho_0=480$ кг/м³);

- температуропровідність визначено за розробленою методикою при застосуванні методу, що ґрунтується на регулярному тепловому режимі. Початкове значення температуропровідності становить $a_0 = 1,40 \cdot 10^{-7}$ м²/с;

- питому теплоємність СДП визначено виходячи з адитивності за формулою:

$$c = \frac{\sum_i^n c_i m_i}{\sum_i^n m_i}, \quad (1)$$

де c_i – питома теплоємність компонентів СДП (скляні мікросфери, сполучник), Дж/(кг·°К); m_i – маса складових компонентів СДП, кг; n – кількість компонентів.

Початкова питома теплоємність СДП становить $c_0 = 1,28$ кДж/(кг·°К).

- коефіцієнт теплопровідності визначено за формулою:

$$\lambda = a \rho c. \quad (2)$$

Початкове значення коефіцієнту теплопровідності СДП $\lambda_0 = 0,085$ Вт/(м·°К).

Тривалі навантаження. Функцією відгуку в експерименті є пошкоджуваність P та коефіцієнт теплопровідності λ .

Кількісне значення пошкоджуваності P_i для кожного i -го часу витримки під тиском P приймається як відношення об'єму води, що проникла в зразок матеріалу блоку за рахунок руйнування повітряних пор і скляних мікросфер при гідростатичному стисканні, до загального об'єму повітря $V_{\text{п}}$ в матеріалі зразка.

За розробленою методикою партії моделей блоку зі СДП піддавались тривалій дії гідростатичного тиску P рівнів: 18; 26; 30 та 34 МПа, що, відповідно, складають 0,5; 0,7; 0,8 та 0,9 від умовної границі міцності матеріалу блоку при гідростатичному стисканні ($\sigma_{\text{пр}} \approx 37$ МПа) з часом витримки $\tau = 0 \dots 400$ год для кожного рівня тиску.

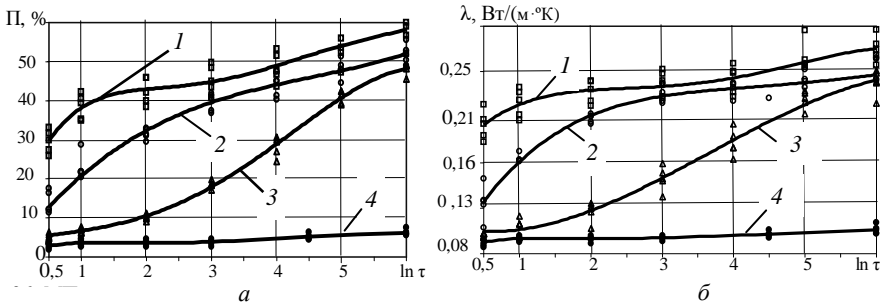
Для рівномірного розташування дослідних точок, шкалу часу витримки зразків під тиском представлено у логарифмічних координатах $\tau_i = e^i$ ($i = 0,5; 1, 2 \dots n$).

В кожній дослідній точці визначено:

- Δm ; масу води, що проникла у зразок, кг;
- P_i рівень пошкоджуваності, %;

– λ_i коефіцієнт теплопровідності зразків блоку зі СДП, Вт/(м^{°К}).

Графіки накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнту теплопровідності в моделях блоку зі СДП представлено на рис.2.



1 – $P = 34$ МПа; 2 – $P = 30$ МПа; 3 – $P = 26$ МПа; 4 – $P = 18$ МПа

Рисунок 2 – Накопичення пошкоджень (а) і зміна коефіцієнту теплопровідності (б) в моделях блоку зі СДП від тривалості навантаження τ гідростатичним тиском P

Результати довготривалих навантажень показали:

– найбільше зростання пошкоджуваності в зразках для всіх рівнів тиску спостерігається на початковому етапі ($\tau \approx 7$ годин);

– при $P=18$ МПа після початкової стадії навантаження процес накопичення пошкоджень уповільнюється і за весь час випробувань досягає лише 6 %;

– при $P=30$ та 34 МПа, близьких до $\sigma_{пр}$, процес руйнування прискорюється і рівень пошкоджуваності досягає 30 %, що дорівнює обсягу повітряних пор у СДП до навантаження. Після цього процес накопичення пошкоджень уповільнюється, так як визначається тільки руйнуванням більш "міцних" мікросфер;

– $P=26$ МПа є граничним для СДП з урахуванням наростання процесів руйнування.

За результатами експериментів знайдено кореляційну залежність між λ і Π та Π і температуропровідністю a , яка показала, що найбільш тісний зв'язок простежується між λ і Π . Коефіцієнт Пірсона склав 0,984, отже теплопровідність в більшій мірі залежить від обсягу накопичених пошкоджень в блоці зі СДП.

Визначено (умовний) критичний рівень пошкоджень блоку, що склав $\Pi_{кр} = 30\%$, при якому густина СДП збільшується до 650...700 кг/м³, коефіцієнт теплопровідності до 0,2 Вт/(м^{°К}), тобто СДП набуває властивостей традиційного сфероластика.

Кліматичні випробування. Згідно з розробленою методикою, обрано рівні тиску P : 18, 22, і 26 МПа, що складають 0,5; 0,6; 0,7 від $\sigma_{пр}$. Кількість циклів кліматичного впливу у дослідях прийнято $N=55$ для кожного рівня тиску P .

Для рівномірного розташування експериментальних точок у логарифмічних координатах $\Pi - \ln N$ кількість циклів кліматичного впливу становила $N = 1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 34; 55$ для кожного рівня тиску P . У кожній дослідній точці з моделями блоку проводились наступні операції:

- навантаження гідростатичним тиском P впродовж $\tau_k = 1$ год;
- заморожування при температурі $-15 \dots -17^\circ\text{C}$ протягом 2 годин до повної кристалізації поглинутої зразком води;
- розморожування у воді при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ продовж 2 годин;
- визначення маси води Δm_i , що проникла у зразок, кг;
- визначення рівня пошкоджуваності Π_i , %;
- визначення коефіцієнту теплопровідності λ_i , Вт/(м \cdot °К).

Результати представлено у вигляді графіків накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнту теплопровідності в моделях блоку зі СДП (рис. 3). Проведені експерименти показали:

- механізм руйнування блоку зі СДП при кліматичних випробуваннях залишається таким, як при тривалих навантаженнях тільки на початковій стадії;
- при однаковому сумарному часі витримки та тиску, рівень пошкоджуваності блоку при кліматичних випробуваннях у 2 рази вище, ніж при тривалих навантаженнях.

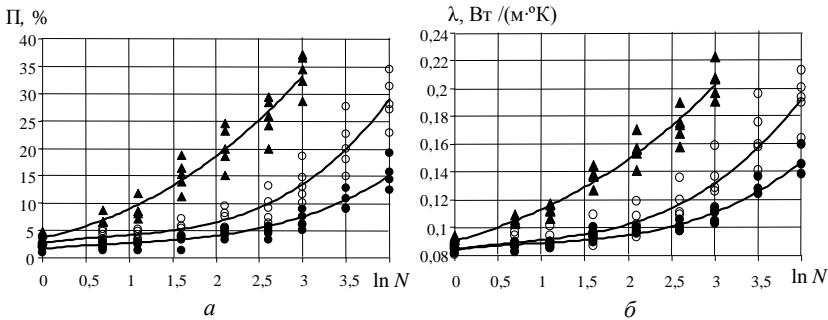


Рисунок 3 – Залежність пошкоджуваності Π (а) та зміни коефіцієнту теплопровідності λ (б) в блоці зі СДП від кількості циклів кліматичного навантаження N при рівнях тиску P : ● – 18 МПа; ○ – 22 МПа; ▲ – 26 МПа

В результаті кліматичних досліджень встановлено, що коефіцієнт теплопровідності залежить тільки від рівня пошкоджуваності СДП (коефіцієнт кореляції $K(\Pi; \lambda) = 0,983$) і не залежить від умов експлуатаційного навантаження.

У четвертому розділі дисертації побудовано математичну модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП (рис.4, а) на основі рівняння лінійної в'язко-пружності та імовірнісної моделі руйнування за Вейбуллом у вигляді логістичного закону розподілу відносно рівня гідростатичного тиску і часу витримки, що має вигляд:

$$\Pi_T(\tau; P) = a_T \left[\left(1 + e^{-(\ln(\tau) - b_T)/c_T} \right) \left(1 + e^{-(P - d_T)/f_T} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

де $a_T = 0,817$; $b_T = 2,206$; $c_T = 2,255$; $d_T = 25,730$ МПа; $f_T = 3,494$ МПа – емпіричні коефіцієнти, визначені обробкою експериментальних даних за методом найменших квадратів.

Експериментально встановлено, що коефіцієнт теплопровідності перебуває в строгій функціональній залежності від пошкоджуваності блоку, тобто математична модель зміни коефіцієнту теплопровідності (рис.4, б) може бути прийнята у вигляді поліному:

$$\lambda_{\tau}(\tau; P) = \lambda_0 + b_{1\tau} \Pi_{\tau} + c_{1\tau} \Pi_{\tau}^2, \quad (4)$$

де $\lambda_0 = 0,085$ Вт/(м·°К) – початковий коефіцієнт теплопровідності СДП; $b_{1\tau} = 0,338$ Вт/(м·°К); $c_{1\tau} = -0,04$ Вт/(м·°К) емпіричні коефіцієнти, визначені обробкою експериментальних даних за методом найменших квадратів.

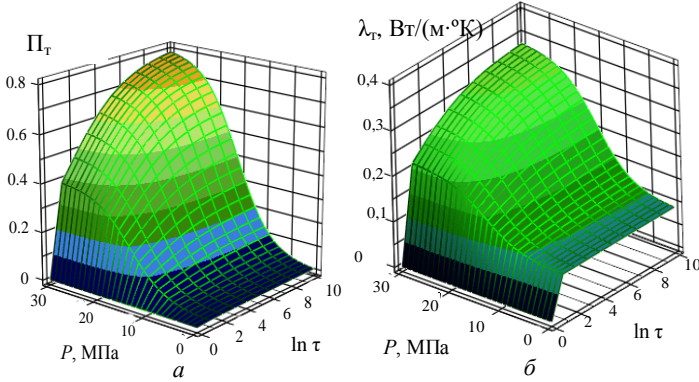


Рисунок 4 – Моделі накопичення пошкоджень (а) і зміни коефіцієнта теплопровідності (б) в блоках зі СДП при тривалому гідростатичному навантаженні

Порівняння результатів розрахунку зміни коефіцієнту теплопровідності СДП, отриманих за моделлю (4), з експериментальними даними показує задовільний результат. Коефіцієнт кореляції між моделями (3) та (4) становить $K(\Pi_{\tau}; \lambda_{\tau}) = 0,97$, що свідчить про збереження функціональної залежності між λ та Π .

Фізичну модель накопичення пошкоджень і механізм проникнення води в структуру матеріалу блоку зі СДП розроблено за аналогією з явищем дифузії в поруватих середовищах.

Згідно другого закону Фіка, рівняння дифузії в циліндричних координатах має вигляд:

$$\frac{\partial \Pi_{\text{д}}}{\partial \tau} = D \left[\frac{\partial^2 \Pi_{\text{д}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_{\text{д}}}{\partial r} \right], \quad (5)$$

де $\Pi_{\text{д}} = \Pi_{\text{д}}(r; \tau)$ – пошкоджуваність зразка при водопоглинанні; D – коефіцієнт дифузії; r – радіальна координата; τ – час від початку процесу водопоглинання.

Розв'язок даного рівняння можна представити у вигляді:

$$\frac{\Pi_{\text{п}} - \Pi_{\text{д}}(r; \tau)}{\Pi_{\text{п}} - \Pi_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0(\mu_n \frac{r}{R}) \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right], \quad (6)$$

де Π_0 – нижній рівень пошкоджуваності, частка повітряних пор, що руйнуються на початковому етапі гідростатичного навантаження, наприклад, при зануренні; Π_n – верхній рівень пошкоджуваності, частка повітряних пор, що може зруйнуватися внаслідок статичної втоми матеріалу блоку; J_0, J_1 – функції Бесселя нульового і першого порядку; μ_n – корені функції Бесселя $J_0(\mu_n) = 0$.

Пошкоджуваність $\Pi_d(r; \tau)$ залежить від трьох параметрів Π_n, Π_0 і D , які можна визначити з експериментальних даних.

Середнє значення функції $\bar{\Pi}_d(\tau)$ відповідає середній за обсягом зразка пошкоджуваності (для довгого циліндру $L/R \geq 10$), і має вигляд:

$$\bar{\Pi}_d(\tau) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \Pi_d(r; \tau) \cdot r dr. \quad (7)$$

Підстановка (6) в (7) дає вираз для середньої пошкоджуваності:

$$\bar{\Pi}_d(\tau) = \Pi_{II} - (\Pi_{II} - \Pi_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right]. \quad (8)$$

При малих рівнях гідростатичного тиску ($P \rightarrow 0$) руйнування структури СДП практично неможливе, тобто $\Pi_0(P) \rightarrow 0$ і $\Pi_n(P) \rightarrow 0$. При високих рівнях тиску руйнування відбувається дуже швидко $\Pi_0(P) \rightarrow 1$ і $\Pi_n(P) \rightarrow 1$.

При середніх рівнях тиску криві $\Pi_0(P)$ і $\Pi_n(P)$, утворюють фігуру схожу з петлею гістерезису (рис.5).

Апроксимація кривих Π_n і Π_0 за методом найменших квадратів при використанні експериментальних даних тривалих навантажень, дозволила визначити невідомі параметри і встановити, що коефіцієнт дифузії не залежить від тиску і становить $D = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ для блоків зі СДП.

Фізична модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП, що побудована на основі дифузійної аналогії, показала досить добру відповідність результатів до експерименту. Коефіцієнт кореляції склав $K(\bar{\Pi}_d; \Pi) = 0,961$, такий же результат дає модель (3) за розподілом Вейбулла.

За аналогією з тривалими навантаженнями, математичну модель накопичення пошкоджень у блоках зі СДП при кліматичних навантаженнях також побудовано на основі логістичного розподілу, однак в залежності від рівня гідростатичного тиску P та кількості повторних дій кліматичних факторів N :

$$\Pi_K(N; P) = \left[\left(1 + e^{a - b(\ln N)^{\alpha_1}} \right) \left(1 + e^{c - dP} \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

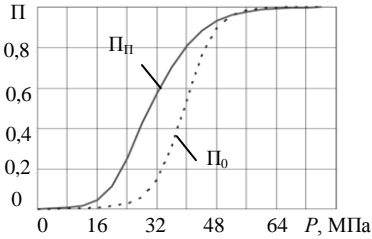


Рисунок 5 – Залежність параметрів пошкоджуваності Π_0 і Π_n від тиску P

де $a=2,518$; $b=0,597$; $c=6,645$; $d=0,277$ МПа⁻¹; $\alpha_1=1,366$ – емпіричні коефіцієнти, визначені при апроксимації результатів випробувань за методом найменших квадратів. Поверхню пошкоджуваності представлено на рис. 6, а.

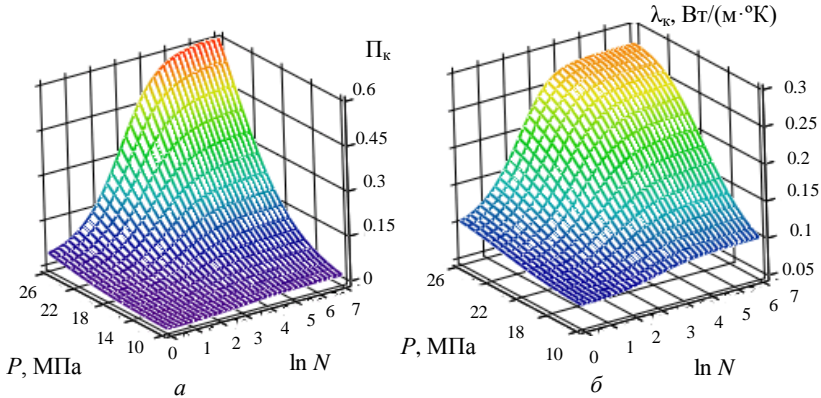


Рисунок 6 – Моделі накопичення пошкоджень (а) і зміни коефіцієнту теплопровідності (б) в блоці зі СДП залежно від рівня тиску P та кількості циклів N кліматичного впливу

Підтверджено адекватність запропонованої моделі за критеріями Стьюдента та Фішера (за дисперсією). Розрахований коефіцієнт кореляції $K(\Pi_k; P)=0,97$, що свідчить про достовірність моделі.

Математична модель зміни коефіцієнту теплопровідності при кліматичних випробуваннях також прийнята у вигляді поліному, графічний вигляд якої представлено на рис. 6, б.

Для встановлення кореляційної залежності між обсягом накопичених пошкоджень при тривалих і кліматичних навантаженнях, при однаковому рівні тиску P (глибина занурення) введено характерний коефіцієнт:

$$K_{\Pi}(\tau) = \frac{\Pi_k(\tau_k \cdot N)}{\Pi_1(\tau)}, \quad (10)$$

де τ – час перебування під тиском при тривалих навантаженнях, год.

За математичними моделями накопичення пошкоджень (3) і (9) при навантаженні блоків зі СДП тиском від 15 до 20 МПа, встановлено діапазон значень $K_{\Pi} = 2...2,3$ при часі $\tau=1000$ годин (рис.7).

Розглянуто вплив циклічного перепаду температур і гідростатичного тиску на блоки і надано оцінку напружено-деформованого стану СДП.

Рішення задачі здійснювалося в циліндричних координатах. З компонентів напружено-деформованого стану присутні: радіальне σ_r , тангенціальне σ_{θ} і осьове σ_z напруження, а всі три деформації зсуву і дотичні напруження дорівнюють нулю.

Аналіз результатів розв'язання задачі показує, що максимальні радіальні напруження σ_r за абсолютною величиною завжди менше тангенціальних напружень σ_{θ} .

Найбільші напруження виникають на початковому етапі замерзання води, поглинутої блоком (при $r_0 \rightarrow R$), і визначаються за формулою:

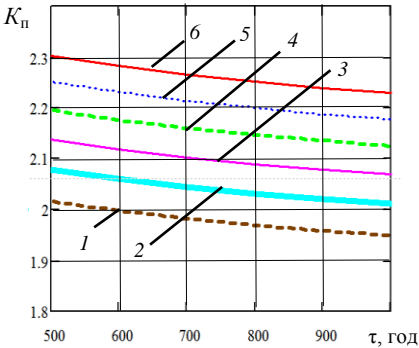


Рисунок 7 – Значення коефіцієнту взаємозв'язку між моделями накопичення пошкоджень при тривалих гідростатичних і кліматичних навантаженнях за $\tau = 1000$ годин при дії тиску P :

1 – 15 МПа; 2 – 16 МПа; 3 – 17 МПа; 4 – 18 МПа; 5 – 19 МПа; 6 – 20 МПа

$$\sigma_{\theta \max} = E \varepsilon_{\text{л}} \Pi_{\text{п}} \eta / (1 - \mu), \quad (11)$$

де $\varepsilon_{\text{л}} = 0,0293$ – відносне лінійне розширення (деформація) води при кристалізації; $\eta = 0,67$ – питома частка повітряних включень в блоці; $\mu = 0,3$ – коефіцієнт Пуассона СДП; $E = 1800$ МПа – модуль пружності СДП.

Максимальні тангенціальні напруження становлять $\sigma_{\theta \max} = 15,6$ МПа при $\Pi_{\text{кр}} = 30\%$. Так як границя міцності СДП при стисканні 39 МПа, підтверджується, що глибина експлуатації блоків повинна бути обмеженою рівнем занурення 1500...2000 м.

У п'ятому розділі розглянуто можливість удосконалення конструкції

ПНА зі сферичним міцним корпусом шляхом модифікації схеми розташування блоків плавучості зі СДП з прогнозуванням їх ресурсу роботи.

Необхідна товщина блоків зі СДП в складі апарату визначалась з умови: вільного занурення ПНА при заданому режимі; збереження температури всередині ПНА не нижче критичного рівня $T_{\text{кр}} = +10^\circ\text{C}$ протягом 12...15 год.

Вільне занурення ПНА здійснюється за умови:

$$F_{\text{тех. зс}} > F_{\text{в}} + F_{\text{пл}}, \quad (12)$$

де $F_{\text{тех. зс}}$ – сила тяжіння ПНА; $F_{\text{в}}$ – сила плавучості (підтримання) конструкції апарату; $F_{\text{пл}}$ – додаткова сила плавучості, що створюють блоки зі СДП товщиною δ в складі ПНА та елементи плавучості, що кріпляться на раму.

Виконані за (12) розрахунки і встановлене значення критичного діаметру ізоляції показали, що товщина блоку повинна становити $\delta \leq 0,20$ м.

Розв'язання температурної задачі з охолодження внутрішнього простору ПНА здійснювалося при застосуванні граничних умов четвертого роду (рис.8) для системи двох тіл (куля в кулі).

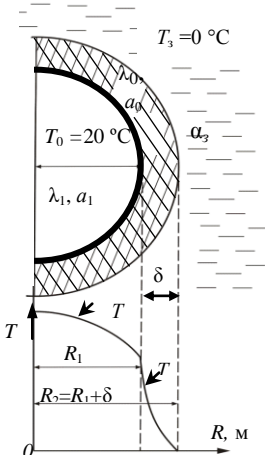


Рисунок 8 – Температурне поле системи двох тіл

Вплив металевого корпусу апарату на процес теплопередачі не суттєвий, оскільки його теплопровідність набагато перевищує теплопровідність блоків зі СДП ($\lambda_{ст} \gg \lambda_{СДП}$), тому в розрахунках не враховувався.

Безрозмірна температура всередині апарату в будь-який момент часу визначається за формулою:

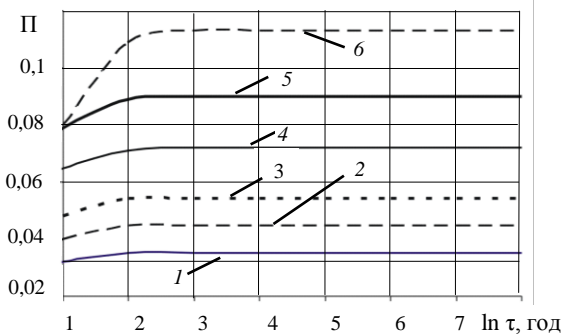
$$\theta = \frac{T_1(x; \tau)}{T_0} = \frac{2R_2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\varphi(\mu_n)} \sin \mu_n \frac{r}{R_1} \sin \mu_n \sin \mu_n \sqrt{K_a} (K_R - 1) \exp(-\mu_n^2 F_0). \quad (13)$$

де μ_n – корені функції Бесселя, що визначаються з граничних умов; K_R , K_a – функціональні коефіцієнти; F_0 – число Фур'є.

За (13) визначено час зниження температури всередині апарату від $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до $T_{кр} = 10^\circ\text{C}$ при товщинах блоку плавучості: $\delta = 0,1$ м – 8 год; $\delta = 0,12$ м – 13 год; $\delta = 0,15$ м – 15 год; $\delta = 0,18$ м – 17 год; $\delta = 0,2$ м – 18 год.

Для кріплення блоків зі СДП на міцний корпус апарату запропоновано розбити всю теплоізолюючу конструкцію за висотою на 8 рівних секцій, які в свою чергу, розбиваються на 2 частини (верхню і нижню), що кріпляться на поверхню епоксидним компаундом. Товщина з'єднувального шару становить 1,5...3 мм. Вплив компаунду на густину і коефіцієнт теплопровідності блоків не враховувався.

За розробленими моделями накопичення пошкоджень спрогнозовано зміну густини та коефіцієнту теплопровідності блоків зі СДП товщиною $\delta = 0,15$ м, оцінено втрату їх сили підтримання в конструкції ПНА при тривалому зануренні $\tau = 1 \dots 1000$ год на глибини 1500...2000 м, результат представлено на рис. 9 і у табл.1.



1 – 1500 м ($P=15$ МПа); 2 – 1600 м ($P=16$ МПа); 3 – 1700 м ($P=17$ МПа); 4 – 1800 м ($P=18$ МПа); 5 – 1900 м ($P=19$ МПа); 6 – 2000 м ($P=20$ МПа)

Рисунок 9 – Пошкоджуваність блоків плавучості зі СДП при тривалому зануренні апарату $\tau = 1 \dots 1000$ год на різні глибини

Експлуатація блоків при кліматичному навантаженні для аналогічних глибин і часу $\tau_k = 1000$ год ($N=1000$ циклів), згідно встановленого коефіцієнта K_{Π} , збільшить

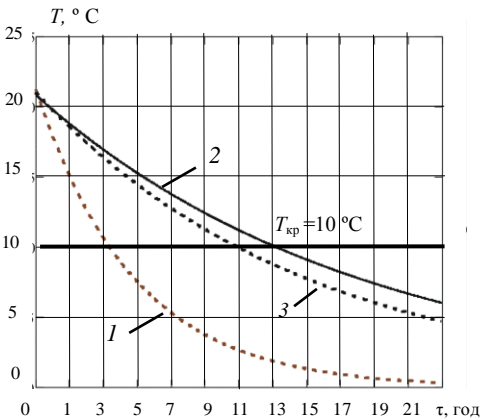
пошкоджуваність в 2 рази. Прогноз зміни густини, коефіцієнту теплопровідності блоків зі СДП і втрати сили плавучості ПНА наведено в табл.1.

Таблиця 1 – Прогнозування зміни плавучих і теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП товщиною $\delta=0,15$ м

Робочий тиск P , МПа	Пошкоджуваність, Π^*	Густина блока* ρ , кг/м ³	Втрата сили плавучості теплоізоляційних блоків ΔF , кН	Коефіцієнт теплопровідності*, λ , Вт/(м·°К)
15	0,035 / 0,07	0,506 / 0,52	1,4 / 1,7	0,1 / 0,112
16	0,045 / 0,09	0,512 / 0,54	1,5 / 2,3	0,101 / 0,118
17	0,054 / 0,11	0,515 / 0,55	1,6 / 2,6	0,104 / 0,132
18	0,072 / 0,14	0,52 / 0,56	1,7 / 2,9	0,112 / 0,135
19	0,09 / 0,18	0,54 / 0,61	2,3 / 4,4	0,118 / 0,14
20	0,113 / 0,23	0,555 / 0,62	2,7 / 4,6	0,132 / 0,15

Примітка: * тривалі навантаження / кліматичні навантаження

За (13) визначено зміну температури від часу всередині апарату, що не обігрівается і без облицювання блоками зі СДП (крива 1, рис.10).



1 – без теплоізолюючих блоків;
 2 – з блоками, що накопичили пошкодження при тривалих зануреннях;
 3 – з блоками, що накопичили пошкодження при кліматичних навантаженнях
 Рисунок 10 – Зміна температури всередині апарату в часі

При теплоізоляції міцного корпусу блоками, що накопили пошкодження при тривалих зануреннях апарату, процес охолодження для всіх рівнів пошкоджень описується кривою 2 (рис.10).

Максимальний рівень пошкоджень при кліматичному навантаженні блоків досяг $\Pi=0,23$ (для $P=20$ МПа), зниження температури показано кривою 3 (рис.10).

Аналіз рис.10 показує, що процес пошкодження блоків зі СДП при експлуатації на глибинах 1500...2000 м має місце та впливає на теплозахисні властивості. Однак, в порівнянні з не облицюваним міцним корпусом, використання блоків зі СДП у

вигляді суцільної шкарлупи забезпечує тепловий захист житлового відсіку ПНА, що доводить доцільність їх використання.

За узагальненими результатами досліджень удосконалено методику проектування ПНА шляхом урахування зменшення сили підтримання і зниження теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП внаслідок

накопичення пошкоджень. Розроблено стандарт підприємства на блоки плавучості підводних технічних засобів.

Проведено розрахунок собівартості технологічного процесу виготовлення блоків плавучості зі СДП та порівняно з вартістю блоків зі сферопластику. Вартість 1 кг СДП складає 325 грн., що на 20 % нижче вартості сферопластика.

У додатках наведено: методики проведення експериментальних досліджень; результати дослідів при тривалих гідростатичних та кліматичних навантаженнях; методика прогнозування втрати сили підтримання і теплозахисних властивостей блоків зі СДП в складі ПНА в залежності від умов експлуатації; стандарт підприємства на блоки плавучості зі СДП; акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу удосконалення конструкції ПНА за рахунок надання додаткової функції теплоізоляції окремим елементам плавучості зі СДП у вигляді зовнішнього суцільного облицювання міцного корпусу з призначенням ресурсу роботи блоків в умовах експлуатації: тривалих глибоководних занурень, циклічних глибоководних занурення-спливань на поверхню в районах з температурою повітря нижче 0°C. Висновки, які узагальнюють сукупність вирішених завдань досліджень, полягають у наступному.

1. Аналіз елементів плавучості в конструкціях ПНА, що працюють в умовах тривалих і циклічних занурень на глибинах 1500...2000 м та підіймаються на поверхню в районах з низькою температурою повітря, а також розгляд проблем, пов'язаних з підтриманням температурного режиму всередині апарату, особливо, в аварійних ситуаціях, показав, що заміна частини закладних елементів плавучості на блоки зі СДП густиною 450...500 кг/м³ у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу зовні, окрім основного призначення – збільшення сили підтримання, перспективна з позиції надання теплоізоляції міцному корпусу. В конструкції ПНА запропонована форма блоків плавучості зі СДП **використана вперше**.

2. Експериментально досліджено механізм накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП при тривалих гідростатичних навантаженнях, який полягає у послідовному руйнуванні повітряних комірок і проникненні води з поверхні всередину блоку. Це дозволило побудувати математичну модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП на основі синтезу моделей лінійної в'язко-пружності та механіки руйнування у вигляді логістичного розподілу відносно рівня гідростатичного тиску (глибини) і часу занурення.

Обґрунтовано фізичну модель за аналогією з явищем дифузії, яка дозволяє прогнозувати ресурс роботи блоків будь-якої форми та розміру в конструкції апарату при експлуатаційних навантаженнях.

Розроблені моделі **отримали подальший розвиток** для прогнозування ресурсу роботи блоків в конструкції ПНА.

Розроблено математичну модель зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП з урахуванням накопичених пошкоджень при тривалому зануренні апарату.

3. Експериментально досліджено механізм накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП при циклічному зануренні-підйомі апарату на поверхню в умовах від'ємних температур. Встановлено, що такі умови роботи апарату збільшують обсяг пошкоджень в блоках зі СДП вдвічі, в порівнянні з експлуатацією при відсутності кліматичних факторів.

Розроблено математичну модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при циклічному впливі гідростатичного тиску та кліматичного фактору, яка, за аналогією з моделлю тривалого навантаження, побудована на основі логістичного розподілу в залежності від рівня гідростатичного тиску (глибини) та кількості циклів кліматичного впливу. Модель уточнено додатковим параметром для врахування впливу фазового переходу води, що накопичена в блоках при зануренні.

Розроблено математичну модель зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП при цикло-гідростатичних навантаженнях апарату.

4. Експериментально встановлено зв'язок між обсягом накопичених пошкоджень і зміною теплоізоляційних властивостей блоків плавучості зі СДП, який показав, що теплопровідність залежить, в основному, від рівня накопиченої пошкоджуваності, а механізм руйнування блоків зумовлений глибиною, тривалістю занурення, циклами занурення-підйому апарату на зміну теплопровідності істотно не впливає, а визначає тільки різну інтенсивність процесу пошкодження.

5. **Вперше**, базуючись на аналізі результатів експериментальних і теоретичних досліджень, встановлено, що ПНА зі сферичним міцним корпусом з робочою глибиною 1500...2000 м втрачає силу плавучості за рахунок накопичення пошкоджень в блоках зі СДП від 5 до 13 % при тривалості занурень до 1000 годин, від 8 до 26 % при 1000 циклах занурень-спливань при температурі повітря нижче за 0°C, теплопровідність при цих пошкодженнях збільшується від 0,085 до 0,15 Вт/(м°K).

6. **Удосконалено** методику проектування ПНА з глибиною занурення 1500...2000 м шляхом урахуванням втрати сили плавучості і теплоізолюючих властивостей блоків зі СДП при накопичених пошкодженнях, що дає змогу визначити втрату сили плавучості всього апарату і спрогнозувати зміну температурного режиму всередині житлового відсіку.

7. Модифікація схеми розташування блоків плавучості в ПНА удосконалила його конструкцію шляхом облицювання міцного корпусу теплоізолюючими блоками плавучості зі СДП, що підвищило автономність роботи ПНА у 3 рази.

8. Практичне застосування результатів роботи відображено в розроблених програмах-методиках експериментального дослідження характеристик блоків плавучості зі СДП, методиці проектування ПНА, стандарті підприємства на блоки плавучості підводних технічних засобів. Результати досліджень було

використано: при виконанні робіт з Державної цільової оборонної програми будівництва кораблів класу «корвет» в ПАТ «ЧСЗ»; при підготовці фахівців Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова.

9. Одними із можливих напрямків подальшого дослідження за тематикою роботи є розробка теоретичних основ створення елементів плавучості з теплоізолюючими властивостями (з композиційних матеріалів) для конструкції ПНА, що експлуатуються на глибинах 2000...5000 м: в районах Північного Льодовитого океану; в Атлантичному океані в зонах гідротермальних джерел.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А. Оценка влияния повреждаемости сферопластика на изменение его теплопроводности. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2007. № 6 (417). С. 102–110.

2. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Моделирование повреждаемости и изменения теплопроводности блоков плавучести на основе синтактика в условиях эксплуатации. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2008. №3 (420). С. 46–51.

3. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Моделирование повреждаемости и изменения теплопроводности блоков плавучести на основе синтактика при климатических испытаниях. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2008. №5 (422). С. 55–60.

4. Кочанов В. Ю., Юреско Т. А. Оценка статистических характеристик повреждаемости блоков плавучести на основе синтактика при климатических испытаниях. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2009. № 2 (425). С. 56–62.

5. Бурдун Е. Т., Кочанов В. Ю., Юреско Т. А. Применение теории диффузии для прогнозирования водопоглощения конструкций дополнительной плавучести на основе сферопластика. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2010. № 2 (431). С. 61–67.

6. Юреско Т. А. Оценка напряженно-деформированного состояния сферопластиков, вызванного кристаллизацией поглощенной воды. Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету*. Дніпропетровськ: Ліра, 2011. №16. С. 286–293.

7. Юреско Т. А. Сферопластик как тепловая изоляция обитаемых подводных технических средств. *Вестник Астраханского гос. техн. ун-та*. Серия : морская техника и технология. Астрахань: АГТУ, 2014. № 2. С. 21–26. [входить до переліку фахових видань ВАК Росії, наукометричної бази РІНЦ].

8. Юреско Т. А. Удосконалення конструкції підводних населених апаратів теплоізолюючими блоками плавучості. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2016. № 4 (466). С. 28–33.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Разработка математической модели накопления повреждений и изменения теплофизических свойств

сферопластика для прогнозирования его работоспособности. *Композиционные материалы в промышленности*: материалы 28 междунар. науч.-практ. конф. (Ялта, Крым, 26–30 мая 2008 г.). Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. С. 584–586.

10. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Повреждаемость и изменение теплопроводности блоков плавучести при климатических испытаниях. *Композиционные материалы в промышленности*: материалы 29 междунар. науч.-практ. конф. (Ялта, Крым, 1–5 июня 2009 г.). Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009. С. 337–339.

11. Юреско Т. А. Математическая модель влияния длительности эксплуатации подводной техники на повреждаемость блоков плавучести. *Импульсные процессы в механике сплошных сред*: материалы междунар. науч. конф., института импульсных процессов и технологий НАН Украины. (Николаев, 17–21 авг. 2009г.). Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. С. 109–110.

12. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Метод прогнозирования водопоглощения сферопластика на основе теории массопереноса. *Композиционные материалы в промышленности*: материалы 30 междунар. науч.-практ. конф. (Ялта, Крым, 7–11 июня 2010 г.). Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2010. С.425–426.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

13. Юреско Т. А. Напряженное состояние материала блоков плавучести при кристаллизации поглощенной воды. *Актуальні проблеми інженерної механіки*: II міжнар. наук.-техн. конф. (Миколаїв, 22–24 жовт. 2012 р.) Миколаїв: НУК, 2012. С. 59–60.

14. Юреско Т. А. Постановка задачи оптимального проектирования теплоизоляции обитаемых подводных средств. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. (Миколаїв, 30–31 жовт. 2012 р.). Миколаїв: НУК, 2012. С.46–48.

15. Юреско Т. А. Теплоизолирующие блоки из композиционного материала для глубоководных обитаемых средств. *Композиционные материалы в промышленности*: материалы 33 междунар. науч.-практ. конф. (Ялта, Крым, 27–31 мая 2013г.). Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2013. С. 240–241.

16. Юреско Т. А. Проектирование теплоизолирующих блоков для глубоководных обитаемых средств. *Сучасні технології проектування, побудови експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: всеукраїнська наук.-техн. конф. з міжнародною участю. (Миколаїв, 22–24 трав. 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 338–341.

17. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А. Теплоізоляційні блоки плавучості в складі населених підводних засобів. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VI Міжнародно науково-технічної конференції*. (Миколаїв, 24–27 верес. 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 49–51.

18. Юреско Т. А., Захарова И. А. Блоки плавучести в конструкции обитаемых подводных средств. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародно науково-технічної конференції.* (Миколаїв, 12–14 жовт. 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016. С. 90–91.

АНОТАЦІЯ

Юреско Т. А. Удосконалення конструкції підводних населених апаратів теплоізолюючими блоками плавучості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – «Конструювання та будування суден». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2017 р.

У дисертації обґрунтовано напрямок удосконалення конструкції підводного населеного апарату (ПНА) теплоізолюючими блоками зі сферопластика з додатковою поруватістю (СДП) з глибиною експлуатації 1500...2000 м.

Експериментально досліджено механізм накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при тривалих зануреннях ПНА на різні глибини, а також при циклічному зануренні-спливанні на поверхню в умовах низьких температур повітря. Отримано значення критичного рівня пошкоджуваності СДП.

Встановлено зв'язок між обсягом накопичених пошкоджень і зміною теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП. Побудовано математичні моделі накопичення пошкоджень і зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП для відповідних видів навантажень. Обґрунтовано фізичну модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП, що ґрунтується на аналогії з явищем дифузії, яка враховує масштабний фактор для оцінки пошкоджуваності блоків будь-якої форми та розмірів.

В результаті досліджень і узагальнення отриманих результатів, розроблено методику, що дозволяє на стадії проектування ПНА спрогнозувати втрату сили підтримання і зміну теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП в залежності від умов експлуатації.

Ключові слова: підводний населений апарат, конструкція, блоки плавучості, пошкоджуваність, сферопластик з додатковою поруватістю, гідростатичний тиск, кліматичний фактор.

АННОТАЦИЯ

Юреско Т.А. Усовершенствование конструкции подводных обитаемых аппаратов теплоизолирующими блоками плавучести. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – «Конструирование и строительство судов». Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2017 г.

Целью работы является усовершенствование конструкции подводного обитаемого аппарата (ПОА) путем замены части основных элементов плавучести

на блоки из сферопластика с дополнительной пористостью (СДП) в виде сплошной облицовки сферического прочного корпуса с назначением ресурса работы блоков в условиях эксплуатации аппарата: длительные глубоководные погружения, циклические глубоководные погружения-всплытия на поверхность в районах с температурой воздуха ниже 0 °С.

В диссертации выбрано и обосновано направление усовершенствования конструкции ПОА теплоизолирующими блоками из СДП плотностью 450...500 кг/м³ для глубин эксплуатации 1500...2000 м.

Экспериментально исследован механизм накопления повреждений в блоках плавучести из СДП при длительных погружениях аппарата на различные глубины. Установлено критическое значение уровня повреждаемости СДП, которое составляет 30 % по объему, снижающее силу поддержания и теплоизоляционные свойства блоков.

На основе исследований построена математическая модель накопления повреждений в блоках из СДП на основе уравнения линейной вязкоупругости в виде логистического распределения относительно уровня гидростатического давления (глубины) и времени погружения.

Обоснована физическая модель процесса накопления повреждений в блоках плавучести из СДП, построенная по аналогии с явлением диффузии. Модель учитывает масштабный фактор для оценки повреждаемости блоков любых размеров и форм.

Разработана математическая модель изменения теплоизоляционных свойств блоков из СДП с учетом накопленных повреждений.

Экспериментально исследован механизм накопления повреждений в блоках плавучести из СДП при циклическом погружении-всплытии аппарата на поверхность в условиях низких температур воздуха (ниже 0 °С). Установлено, что данные условия работы ПОА вызывают в 2...2,3 раза большую повреждаемость блоков из СДП, чем длительное гидростатическое нагружение при аналогичных глубинах и времени погружения.

Разработана математическая модель повреждаемости блоков из СДП при циклическом действии гидростатического давления и климатического фактора, которая, по аналогии с длительным гидростатическим нагружением, построена на основе логистического закона, в зависимости от уровня гидростатического давления (глубины) и количества циклов климатического воздействия. Модель усложнена дополнительным параметром для учета влияния фазового перехода воды, накопленной в блоках при погружении. Адекватность предложенной модели подтверждена с использованием критериев Стьюдента и Фишера (по дисперсии).

Разработана математическая модель изменения теплоизоляционных свойств блоков из СДП с учетом накопленных повреждений в условиях циклически погружений-всплытий аппарата.

Экспериментально установлена связь между повреждаемостью и изменением теплоизоляционных свойств блоков плавучести из СДП, которая показала, что теплопроводность зависит, в основном, от количества

накопленных повреждений, а механизм разрушения блоков, обусловленный глубиной и продолжительностью погружения или циклами погружения-всплытия аппарата, существенно не влияет, а определяет только разную интенсивность процесса.

В результате проведенных экспериментов и обобщения результатов исследования разработана методика проектирования ПОА с учетом уменьшения подъемной силы блоков плавучести из СДП и изменения температуры внутри прочного корпуса за счет накопленных повреждений.

Разработаны программы-методики экспериментального исследования характеристик блоков плавучести из СДП, стандарт предприятия на блоки плавучести подводных технических средств.

Ключевые слова: подводный обитаемый аппарат, конструкция, блоки плавучести, повреждаемость, сферопластик с дополнительной пористостью, гидростатическое давление, климатический фактор.

SUMMARY

Yuresko T.A. The improvement the design of manned submersibles by use of thermal insulating buoyancy blocks. – Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on speciality 05.08.03. – «Design and building of ships». Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, 2017.

The thesis covers the problem of improvement the design of manned submersibles by installation buoyancy blocks with syntactic foam with additional porosity (SFAP). Damage accumulation in SFAP blocks was experimentally studied during prolonged dives of the underwater-inhabited device under different depths and under cyclic dive-surfacing for air temperatures below 0°C. The critical level of SFAP damaging obtained. The relation between the volume of damage accumulation and change in the SFAP block insulation properties is established. The mathematical model of damage accumulation and change in block insulation properties was generated for the respective types of load.

Research and consolidation of the obtained data resulted in development of the special technique. It allows predicting the loss of buoyancy and the change of heat-insulating properties of SFAP blocks depending on the operating conditions on the stage of underwater device design.

Key words: manned submersible, design, buoyancy blocks, damaging, syntactic foam of additional porosity, hydrostatical pressure, climatic factor.

Підписано до друку 07.09.2017 р. Формат 60×84/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 142.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,

Просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publidhing@nuos.edu.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
Реєстру видавництв, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції.

ДК № 2506 від 25.05.2006 р.