

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У наш час розширюються області використання підводних технічних засобів у зони гідротермальних джерел («чорних та білих курильників»). Температура води в цих місцях сягає 300...400 °С за рахунок перемішування магматичних газів та води. Така висока температура викликає проблеми при проектуванні та обмеження експлуатації підводної техніки.

Однією з причин обмеження можливості експлуатації підводних апаратів в зонах океану з підвищеною температурою є наявність в них блоків плавучості в яких однією зі складових присутній полімер. Найбільш поширеними в наш час є блоки плавучості на основі сферопластиків (зв'язуюче – полімер, наповнювач – скляні мікросфери). При підвищених до 400 °С температурах їх використання обмежене теплостійкістю полімерної матриці (не більше 100 °С). Або, менш поширені блоки плавучості на основі синтактичного піноскла (матеріалу зі спечених скляних мікросфер) мають значну первинну відкриту пористість (до 25 %), та, як наслідок, низький рівень міцності при гідростатичному стисканні і високе водопоглинання, тобто невелику глибину експлуатації (до 200 м). Висока ціна блоків плавучості зі сферопластику і синтактичного піноскла також обмежує їх використання. Досвід застосування неорганічних спінених матеріалів для виробництва конструкцій суден дуже обмежений, а для виробництва блоків плавучості – відсутній. Вирішення питань набуття блоками плавучості високої теплостійкості за рахунок неорганічних спінених матеріалів одночасно з достатньою міцністю розширить можливості використання підводної техніки для районів Світового океану з температурою до 400 °С, суттєво знизить собівартість блоків плавучості, що дозволить значно підвищити конкурентоздатність українських підводних технічних засобів.

На сьогоднішній день відсутня інформація про залежність границі міцності при гідростатичному стисканні від густини неорганічної піни при короткочасних і тривалих навантаженнях та механізмів руйнування блоків плавучості з неорганічних пін (перед усім піноскла) від структури матеріалу, параметрів виготовлення блоків плавучості та експлуатаційних факторів. Це обумовлює актуальність розв'язання наукової прикладної задачі – вдосконалення конструкції підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості на базі спіненого неорганічного матеріалу (піноскла) в залежності від глибини та часу експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дослідження в області глибоководних легковагових матеріалів є провідним, визнаним міжнародною спільнотою напрямком наукової та практичної діяльності НУК.

Наведені в представленій дисертації матеріали використані у науково-дослідних роботах (2001 – 2010 рр.), які виконувалися в університеті в рамках національних програм «Освоєння вуглеводневих ресурсів українського сектора Чорного та Азовського морів», «Нафта і газ України до 2010 року»:

– НДР № 1445 «Разработка методов расчета прочности корпусных конструкций при разных условиях нагружения, не регламентируемых нормативными документами» (ДР № 0102U001018). – 2001 – 2002;

- НДР №1629 «Розробка матеріалів плавучості підводної техніки на основі моделювання їх пошкоджуваності в умовах експлуатації» (ДР № 0107U000717). – 2007 – 2008;
- НДР № 1715. «Розробка методів проектування суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів при статичних і динамічних навантаженнях». – 2009 – 2010.

При проведенні досліджень за науковими темами автор дисертаційної роботи брав участь як виконавець.

Мета і завдання наукового дослідження. *Метою наукового дослідження дисертаційної роботи є вдосконалення конструкції підводного апарату на стадії проектування блоками плавучості підвищеної теплостійкості з піноскла, що враховує технологію їх виготовлення, формування і монтажу на апарат, а також встановлення ресурсу роботи блоків з урахуванням тривалості навантаження їх гідростатичним тиском.*

Для її реалізації необхідно вирішити такі *основні завдання наукового дослідження*:

- вибрати та обґрунтувати напрями вдосконалення блоків плавучості для підводного апарату, що працює у районах океану з підвищеною температурою до 400 °С;
- експериментально дослідити механізм руйнування блоку плавучості з підвищеною теплостійкістю під дією гідростатичного тиску;
- експериментально визначити механізм накопичення пошкоджень та розробити методику прогнозування міцності та ресурсу роботи блоку плавучості при тривалій дії гідростатичного тиску;
- розробити математичну модель руйнування блоку плавучості, виготовленого з матеріалу з підвищеною теплостійкістю при гідростатичному стисканні з урахуванням фізичної моделі елементарної комірки та механічних властивостей матеріалу;
- розробити метод формування крупногабаритних блоків плавучості підвищеної теплостійкості та монтажу їх на підводному апараті;
- розробити методику проектування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень та стандарт підприємства на них.

Об'єктом дослідження є пошкодження блоків плавучості з підвищеною теплостійкістю для підводного апарату, що тривало працює на різних глибинах.

Предмет дослідження – ресурс роботи блоків плавучості підвищеної теплостійкості підводних апаратів в залежності від технологічних параметрів їх виготовлення.

Методи дослідження:

- метод повного факторного експерименту використано для дослідження залежностей фізико-механічних характеристик блоків плавучості від параметрів їх виготовлення;
- метод кореляційного та регресійного аналізу використано для визначення зв'язку між характеристиками матеріалу блоку плавучості та умовами експлуатації;

- статистичні методи обробки результатів експериментів використані для визначення достовірності отриманих результатів досліджень;
- методи теорії ймовірностей використані для модифікації розподілів випадкових величин, таких як геометричні параметри елементарної комірки пористого композиційного матеріалу блоку плавучості, що необхідні для побудови моделі їх пошкоджуваності;
- методами прикладної механіки пластин в лінійній постановці отримано залежності гідростатичного руйнівного тиску від параметрів елементарної комірки пористого матеріалу блоку плавучості при експлуатації на глибині;
- методом верифікації проведено аналіз працездатності математичної моделі пошкоджуваності блоків плавучості за результатами експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше вдосконалено конструкцію підводного апарату за допомогою блоків плавучості з теплостійкістю до 400 °С, які надають йому можливість працювати у глибинах океану з підвищеною температурою води. У результаті досліджень:

- вперше замість сферопластику використано піноскло уявною густиною 550...700 кг/м³ для блоків плавучості підводного апарату який працює в районах океану з термальною активністю до 400°С, що перевищує світовий рівень теплостійкості існуючих блоків плавучості підводних технічних засобів;
- вперше експериментально досліджено механізм руйнування блоків плавучості з піноскла при дії гідростатичного тиску води, який полягає у послідовному руйнуванні стінок комірок піноскла з поверхні в глибину блоку, що дозволяє визначати зменшення підйомної сили підводного апарату при зануренні на глибину до 2000 м;
- вперше розроблено математичну модель пошкодження блоку плавучості з піноскла в умовах гідростатичного стискання на основі фізично обґрунтованої моделі елементарної комірки піноскла з урахуванням розподілу технологічної пористості піноскла, на базі рівнянь будівельної механіки корабля для круглих пластин, яка дозволяє визначати підйомну силу підводного апарату в залежності від глибини його занурення;
- вперше, базуючись на аналізі результатів теоретичного та експериментального досліджень, визначено, що підводний апарат при тривалості занурення до 400 годин втрачає підйомної сили за рахунок накопичення пошкоджень у блоках плавучості з піноскла початковою густиною 550 кг/м³ при роботі на глибині до 400 м не більше 3 %, до 2000 м – не більше 12 %; з початковою густиною 650 кг/м³ на глибині до 400 м не більше 1 %, до 2000 м – не більше 3 %;
- удосконалено методику проектування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень і стандарт підприємства на них, які дозволяють спрогнозувати втрату плавучості підводним апаратом.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Обґрунтовано діапазон густини 550...700 кг/м³ блоків плавучості підвищеної теплостійкості до 400°С з піноскла дає можливість їх використання в складі підводних апаратів, що працюють на глибині до 2000 м.

2. Отримано залежності впливу технологічних параметрів виготовлення блоків плавучості з піноскла на їх міцність та ресурс роботи, що дозволяє прогнозувати працездатність та ресурс роботи підводного апарату на глибині, або по судовому журналу підводного судна зробити розрахунки накопичених пошкоджень та визначити остаточний ресурс роботи апарату.

3. Побудовано математичну модель пошкодження блоку плавучості при гідростатичному стисканні, що надає проєктантові можливість розрахувати допустиму глибину занурення апарату при відомій густині блоку плавучості та припустимому рівні його пошкоджуваності.

4. Розроблено метод формування крупногабаритних блоків плавучості з піноскла та монтажу їх на підводний апарат.

Практичне застосування результатів досліджень відображено в наступних документах:

– Програма і методика експериментальних досліджень накопичення пошкоджень у блоку плавучості із композиційного неорганічного матеріалу від дії експлуатаційних факторів при тривалих випробуваннях [Текст] УКФА 730131 – 005М. – Миколаїв: НУК. – 2009 – 13 с.;

– Методика прогнозування об'ємної пошкоджуваності і поверхневого водопоглинання блоків плавучості із композиційного неорганічного матеріалу при тривалому гідростатичному навантаженні [Текст] УКФА 730131 – 006М. – Миколаїв: НУК. – 2010. – 17с.;

– Методика проєктування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень [Текст] УКФА 360062-001М– Миколаїв: НУК. – 2011. – 14 с.;

– Стандарт підприємства. Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі піноскла. Склад і властивості. СТП 2.066753 – 05.14.10. Затверджено і введено в дію 1.04.2010. – 9 с.;

– Деклараційний патент на корисну модель № 5234/1 Україна, МПК(2009) C03C 11/00, B63B 5/00. Спосіб виготовлення блоків плавучості на основі піноскла /Н.С.Соломонюк; Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № u2009 12518; заявл. 03.12.09; опубл. 10.06.10 // Промислова власність. 2010. – Бюл. № 11. – 3 с.

Реалізація та впровадження наукових розробок. У роботі сформульовано рекомендації до складу та структури матеріалів блоків плавучості, які використані під час виконання науково-дослідних робіт 2000 – 2010 рр. Результати наукових розробок застосовані при викладанні дисциплін: «Спеціальні питання міцності і динаміка суден та морських плавучих споруд» – студентам напряму 6.051201 – «Суднобудування та океанотехніка» (акт від 21.06.11); «Технічна та композиційна кераміка», «Проектування та конструювання тришарових конструкцій із КМ», «Термодинаміка та теплообмін» студентам напряму 6.051101 – «Авіа- і ракетобудування» (акт від 30.06.11).

Результати досліджень, які викладені в роботі, використано при проєктуванні військового корабля класу «корвет» в Казенному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» м. Миколаєва (акт від 30.10.11) та можуть в наступному

використовуватися 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 руйнування блоків плавучості з піноскла розроблені особисто здобувачем. З робіт, що опубліковані у співавторстві, на захист виносяться тільки ті частини, що розроблені особисто автором.

Апробація результатів дисертації Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на конференціях різних рівнів: міжнародна конференція «Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций» (4 – 7 июня 2010, Ялта), 19, 24, 27, 29 міжнародні конференції-виставки “Композиционные материалы в промышленности. (СЛАВПОЛИКОМ)” (Ялта, 1999, 2004, 2007, 2009 р.); міжнародні конференція “Кораблестроение: образование, наука, производство” (Миколаїв, 24-25 вересня 2002) та «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов» (2 – 6 июня 2004, Николаев); науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу НУК (УДМТУ), (Миколаїв, 2000 – 2010).

Публікації. Основні результати досліджень, що увійшли до дисертації, викладені у друкованих працях: 6 статтях в фахових виданнях, що рекомендовані ВАК України для публікацій результатів дисертаційних досліджень (з них – 5 статей є одноосібними), в патенті України на корисну модель без співавторства, 3 звітах з НДР, 8 тезах Міжнародних наукових та науково-практичних конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, 9 додатків, списку використаної літератури з 99 найменувань. Дисертація викладена на 226 сторінках, з яких обсяг основного змісту дисертаційної роботи 119 сторінок, 48 рисунків на 43 сторінках, 30 таблиць на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір і актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами та темами, вказано особистий внесок автора у виконанні дисертаційної роботи; визначено мету і завдання дослідження; сформульовано об'єкт, предмет та основні методи дослідження; показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, що виносяться на захист; наведені дані щодо апробації та опублікування результатів роботи.

У першому розділі визначена актуальність застосування підводних апаратів в районах «чорних курильників», проведено аналіз існуючої підводної техніки та стану розвитку конструкцій плавучості для них. Проаналізовані їх переваги та недоліки.

Гідротермальні джерела відкриті у 1978 році на Східно-Тихоокеанському піднятті командою Ж.-І. Кусто. Розташовані вони в районах серединних океанічних хребтів на глибині 1500...4000 м. Температура води в них сягає 300...400 °С, тому можливе розчинення багатьох металів. Експедицією Академії наук СРСР на судні «Академік М.Келдиш» під керівництвом А.М.Сагалевича в 1986 році на каліфорнійському рифті знайдені особливі мікроорганізми групи архею (одна з найпримітивніших форм життя на нашій планеті), життя яких ґрунтується на

хемосинтезі. Тобто, гідротерми є важливими при дослідженні живих організмів і біологічних екосистем, невідомих раніше. У дослідників виникає дві основні проблеми: як захистити чутливі елементи апаратури від впливу високих температур та одночасно забезпечити нейтральну плавучість підводного апарату у зоні дії підвищених температур.

Підводні апарати бувають самохідні, несамохідні, залюднені та незалюднені, прив'язні та автономні. Їх габаритні розміри, вага, потужність залежать від функціонального призначення, яке може варіюватися від невеликих оглядових незалюднених апаратів (підводних роботів) до залюднених з вагою декілька тон, екіпажем в декілька осіб. Апаратне оснащення варіюється в залежності від поставлених задач. Одним з важливих компонентів конструкції підводної техніки виступають блоки плавучості. Найчастіше вони розташовані між міцним та легким корпусом підводного апарату. Приклад розташування блоків плавучості в прив'язному незалюдненому апараті «Аргобуй» представлено на рис.1.

На сьогодні найбільше поширення набули блоки плавучості зі сферопластику (syntactic foam) – двофазного матеріалу, що складається з полімерної матриці і скляних мікросфер. Використання такого матеріалу в складі блоку плавучості забезпечує йому уявну густину в діапазоні $450 \dots 700 \text{ кг/м}^3$ та роботу апарату на глибині 6000 м. Дослідження властивостей сферопластиків проводилось українськими (П.Г.Кржечковським, Є.Т.Бурдуном, В.А.Нікітиним, І.О.Сазоновим, С.В.Копійкою та ін) та зарубіжними вченими (Н.А.Панфіловим, Матвєєвим Г.В., С.А.Атрощенко, Г.Д.Федоровским, Віміакі Кудо та ін). Однак сферопластики неможливо тривало експлуатувати при температурі вище температури скловання

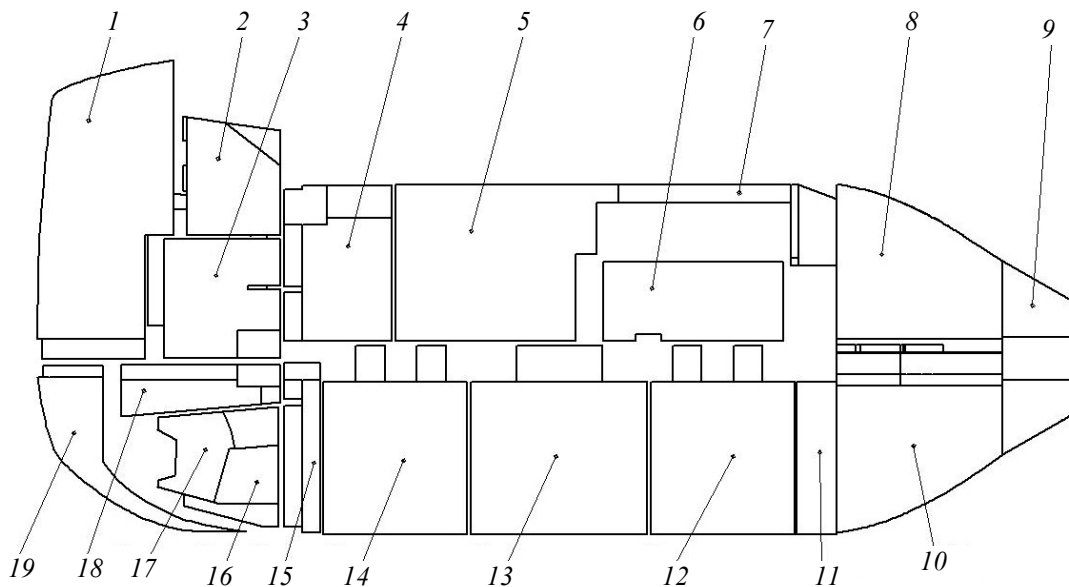


Рис.1. Схема розташування блоків плавучості в «Аргобуй»:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1,2 – хвостові верхні блоки плавучості; | 10 – нижній носовий блок; |
| 3 – середній хвостовий блок; | 11, 12, 13, 14, 15 – нижні корпусні |
| 4,5,7 – верхні корпусні блоки; | блоки; |
| 6 – боковий блок; | 16,17, 18, 19 – хвостові нижні блоки |
| 8,9 – верхні носові блоки; | плавучості |

полімерного зв'язуючого ($100...120\text{ }^{\circ}\text{C}$), наприклад, у зонах тектонічних розломів земної кори.

Блоки з синтактичного піноскла, розроблені Казіміренко Ю.О. значно краще в цьому відношенні. Вони виготовляються шляхом спікання скляних порожнистих мікросфер, без полімерної зв'язки, тому мають теплостійкість до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Але синтактичне піноскло має значну відкриту пористість, що обмежує його використання без захисного покриття.

До того ж, блоки плавучості зі сферопластику і синтактичного піноскла мають високу вартість (зі сферопластика – $16...30\text{ у.о/кг}$, синтактичного піноскла – $15...18\text{ у.о/кг}$), що також обмежує їх використання.

Отже, для роботи блоків плавучості при підвищеній температурі до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ раціонально застосовувати неорганічні піни. Запропоновано для конструкцій плавучості з підвищеною теплостійкістю використати закритопористе піноскло, яке в наш час використовується в якості будівельного тепло- та звукоізоляційного матеріалу. Але його винахідник І.І.Китайгородський передбачив можливість його застосування для елементів плавучості, понтонних мостів та рятувального обладнання.

Запропоновано вдосконалити незалюднений прив'язний апарат «Аргобуй» блоками підвищеної теплостійкості з піноскла з метою його проникнення у райони океану з підвищеною температурою.

У другому розділі дисертації викладено загальну методику та основні методи дослідження фізико-механічних властивостей і ресурсу роботи блоків плавучості підвищеної теплостійкості з піноскла для підводних апаратів (рис.2).

Визначення залежності фізико-механічних характеристик блоку плавучості з піноскла від складу газоутворюючої шихти та технологічного процесу спінення проведено за допомогою повного факторного експерименту.

Статистичними методами обробки результатів експериментів встановлено достовірність отриманих результатів досліджень.

За отриманими результатами повного факторного експерименту методами кореляційного і регресійного аналізу знайдено залежність між густиною матеріалу блоку плавучості та характеристиками, які мають важливе значення для плавучості підводного апарату: технологічною відкритою пористістю $\zeta_0(\rho)$, пошкоджуваністю $\xi(\rho)$ та поверхневим водопоглинанням блоків $w(\rho)$ залежно від глибини занурення.

Для визначення поверхневого водопоглинання та для побудови математичної моделі пошкоджуваності блоку плавучості необхідно знати такі параметри матеріалу блоку плавучості, як частоту розподілу ймовірності та розподіл ймовірності діаметрів пор $F_h(h,\rho)$ і товщини стінок граней пор $F_d(d,\rho)$ в матеріалі блока плавучості. Визначення розподілів виконується експериментально та обробляється методами теорії ймовірностей для модифікації розподілів випадкових величин.

Одним з основних завдань дисертації є побудова математичної моделі руйнування блоків плавучості з піноскла з урахуванням фізичної моделі елементарної комірки та механічних властивостей матеріалу-матриці блоку $p(\rho, \xi, \zeta_0, \sigma_s)$, де p – гідростатичний тиск, σ_s – границя міцності матеріалу-матриці під час розтягування. Аналітичне рішення дає можливість визначати вплив різних

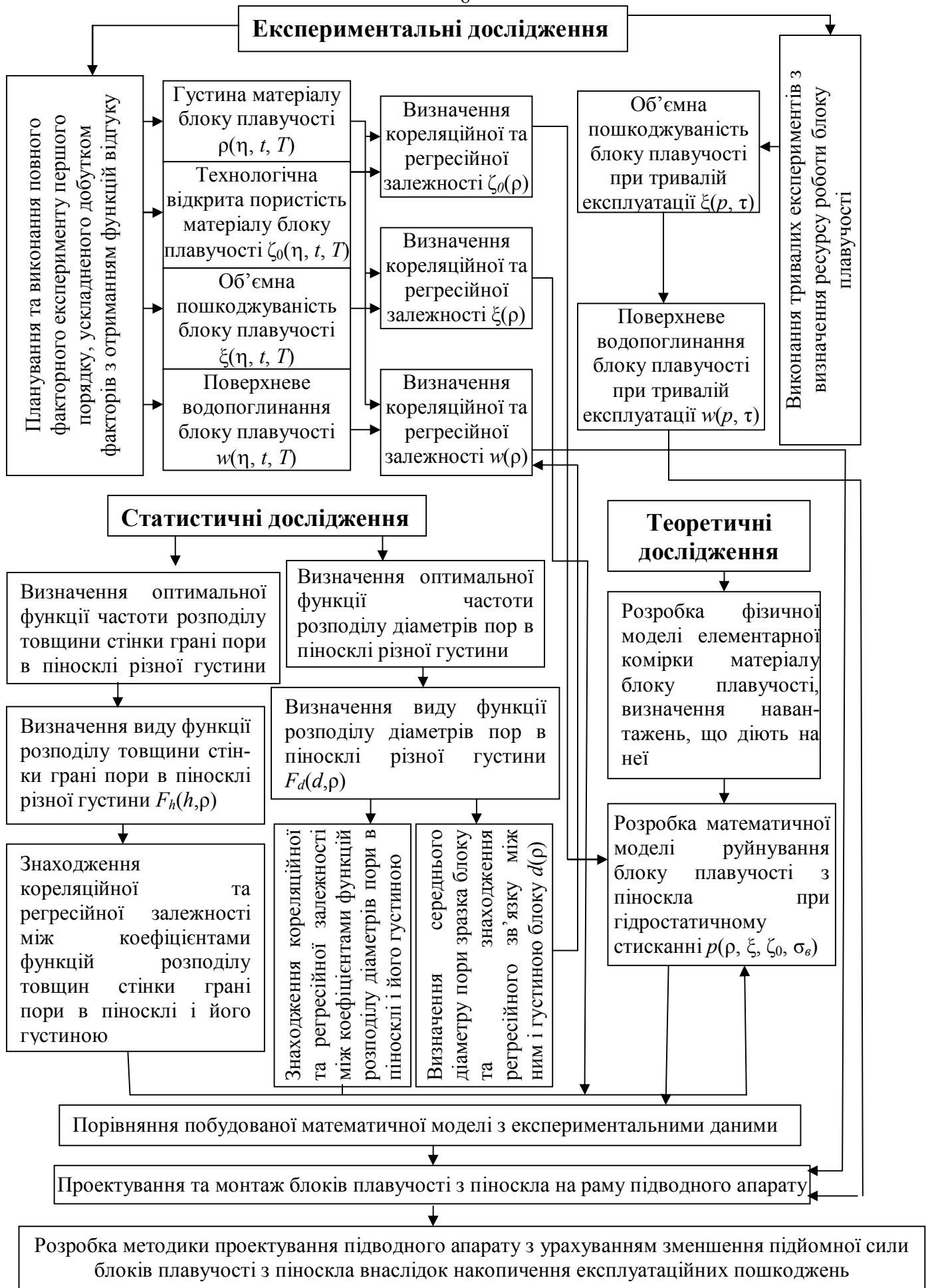


Рис.2. Структурологічна схема дисертаційної роботи

факторів структури матеріалу на руйнування блоків плавучості при експлуатації на глибині без виконання великого обсягу експериментів. Отримана математична модель підтверджується порівнянням з експериментально визначеним значенням об'ємної пошкоджуваності.

Оскільки блок плавучості знаходиться під водою тривалий час, ресурс роботи блоку визначається з урахуванням пошкоджуваності і поглинання води блоком через незахищену поверхню при тривалій дії гідростатичного тиску. При руйнуванні блоку плавучості з піноскла не існує границі міцності при гідростатичному стисканні й існуючі методики, які розроблені для визначення тривалої міцності інших блоків плавучості, наприклад, виготовлених зі сферопластику, неможливо застосувати. Тому для блоків плавучості з піноскла розроблено методики визначення тривалої міцності та прогнозування об'ємної пошкоджуваності $\xi(p, \tau)$ і поверхневого водопоглинання $w(p, \tau)$ при тривалому гідростатичному навантаженні.

За результатами експериментальних і теоретичних досліджень розроблено методику проектування блоків плавучості з піноскла.

У третьому розділі дисертації наведено технологію виготовлення плит з піноскла та приведені експерименти по визначенню властивостей цих плит при короткочасному та тривалому навантаженні гідростатичним тиском.

Для виробництва плит піноскла був вибраний порошковий спосіб виготовлення блоків плавучості з піноскла, який вивчено такими вченими в області дослідження властивостей піноскла, як Демідович Б.К., Шилл Ф., Горлов С.А. Спосіб побудовано на спіканні скляного порошку та газоутворювача з подальшим спіненням в процесі поступового нагрівання всієї маси скла, що спеклася. Але технологія виготовлення піноскла скоректована таким чином, щоб густина піноскла не перевищувала $250 \dots 300 \text{ кг/м}^3$, тобто діапазон густини більший за 300 кг/м^3 є мало вивченим, оскільки в будівництві більш важке піноскло має вищу тепло- та звукопровідність.

Подрібнений склобій тарного скла, змішується з порошком кам'яновугільного коксу в пропорції $100 : (2 \dots 3)$ вагових частин. Отриману газоутворюючу шихту засипають в металеві форми, змащені антиадгезивом (водною суспензією каоліну або порцеляновим шлікером), ущільнюють на вібростенді і розташовують в печі, заздалегідь нагріту до температури спінення $T = 840 \dots 880^\circ\text{C}$. Шихту витримують при визначеній температурі до утворення пор у склі в результаті випалювання газоутворювача впродовж $10 \dots 20$ хвилин. Піноскло поступово охолоджують разом із закритою піччю, оскільки внаслідок різкого охолодження в матеріалі блока з'являються залишкові напруження, що знижують його міцність.

Для отриманих зразків піноскла визначено залежність густини ρ і технологічної відкритої пористості ζ_0 від складу піноутворюючої шихти (η) і технологічних факторів (t, T). Найбільш чутливий вплив на ρ і ζ_0 створює температура витримки в печі, що викликане зміною в'язкості скла і більш активним газоутворенням. Температура спінення значно зменшує густину (до 300 кг/м^3) і збільшує відкриту пористість (до 12%), що є небажаним, оскільки при зануренні у воду відкриті пори заповнюються водою і блок втрачає плавучість. Тому рекомендується для виготовлення блоків плавучості використовувати нижню границю можливого діапазону температур спінення скла – 840°C . Збільшення

кількості газоутворювача також знижує густину і при низькій температурі це є позитивним фактором.

Густина блоку плавучості і його відкрита пористість корелюють між собою (рис.3), оскільки їх коефіцієнти кореляції більше заданого табличного

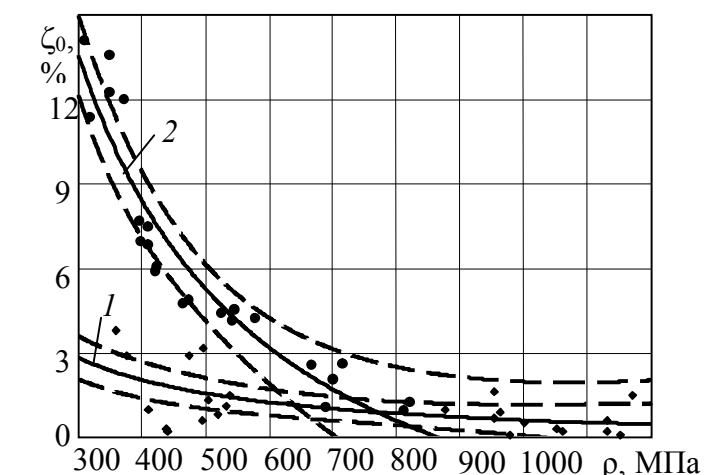


Рис.3. Залежність технологічної відкритої пористості блоку плавучості, отриманого при $T = 840^{\circ}\text{C}$ (лінія 1) и $T = 880^{\circ}\text{C}$ (лінія 2) від його густини з 95 %-вим довірчим інтервалом (штрихові лінії)

при гідростатичному стисканні. Для піноскла характерним є безперервний процес накопичення пошкоджень (пошкоджуваність) в закритій частині пористої структури, що не дозволяє знайти значення границі міцності при гідростатичному стисканні для досліджених блоків плавучості.

Проведено експериментальну кількісну оцінку пошкоджуваності, з рівнями відносного об'єму зруйнованих пор: 5; 10; 20; 30 %. Знайдено залежність і побудовані поверхні відгуку для зразків при відповідних об'ємах руйнування в залежності від технологічних факторів виготовлення блоків. Адекватність рівнянь регресії перевірена за критерієм Фішера (таблиця 1).

Таблиця 1

Розрахунок критерію Фішера для рівнянь пошкоджуваності

Пошкоджуваність, %	Розрахункове значення критерію, $F_{\text{розр}}$	Критичне значення критерію, $F_{\text{кр}}$
5	0,348	4,46
10	0,014	5,32
20	0,272	4,46
30	0,693	5,32

Для рівнянь всіх вище вказаних рівнів зруйнованих пор $F_{\text{розр}} \leq F_{\text{кр}}$, тому моделі визнано адекватними до об'єкту дослідження. Тоді рівняння регресії мають вигляд:

при 5 %-вому руйнуванні

$$p_5(\eta, t, T) = 62,15 - 29,73\eta + 3,31t + 0,047T + 0,31\eta \cdot t - 4,75 \cdot 10^{-3} t \cdot T + 0,026\eta \cdot T ;$$

$r_{1-\alpha/2} = r_{0,975} = 0,423$. З цієї залежності неможливо виключити температуру витримки в печі, оскільки при нижчій температурі при решті однакових факторів і однаковій густині виходить блок, у якого відкрита пористість до 4 разів нижче. Між відкритою пористістю та густиною піноскла, виготовленого при температурі 880°C , існує сильний зв'язок ($r = 0,889$), а з густиною піноскла, виготовленого при температурі 840°C – середній ($r = 0,518$).

Проведено дослідження поверхневого водопоглинання та пошкоджуваності блоку плавучості

при 10 %-вому руйнуванні

$$p_{10}(\eta, t, T) = 270,8 - 126,2\eta + 9,95t - 0,272T + 0,348\eta \cdot t - 12,6 \cdot 10^{-3} t \cdot T + 0,133\eta \cdot T ;$$

при 20 %-вому руйнуванні

$$p_{20}(\eta, t, T) = 396,9 - 215,3\eta + 20,77t - 0,401T + 0,336\eta \cdot t - 25,1 \cdot 10^{-3} t \cdot T + 0,232\eta \cdot T ;$$

і при 30 %-вому руйнуванні

$$p_{30}(\eta, t, T) = 980,0 - 441,5\eta + 25,26t - 1,016T - 1,034\eta t - 32,4 \cdot 10^{-3} tT + 0,473\eta T .$$

Оптимальною температурою виробництва блоку плавучості, при якій він має найменшу пошкоджуваність, є також $T = 840^\circ\text{C}$. Кількість газотворювача в експерименті приймається в діапазоні $\eta = 2,6 \dots 3,0 \%$, з метою отримання необхідної густини ($405 \dots 700 \text{ г/см}^3$). Збільшення часу витримки при температурі 840°C позитивно впливає на міцність блоку (рис.4). Але допускати об'ємну

пошкоджуваність більше 10 % не рекомендується, тому що повітря в порах на відповідний об'єм замінюється водою, яка спричиняє собою зменшення плавучості блоку.

Поверхнєве водопоглинання зразків блоків плавучості визначено з урахуванням його початкової відкритої пористості, яка створює додаткову поверхню для контакту блоку і води, за формулою

$$w = \frac{m - m_0}{F_{\text{нов}} + F_{\zeta}} , \quad (1)$$

Рис.4. Гідростатичний тиск, що діє на блок, який виготовлено при $T = 840^\circ\text{C}$ і часі витримки $t = 10$ хв (суцільні лінії) і $t = 20$ хв (пунктирні лінії), залежно від кількості газотворювача при різних рівнях пошкоджуваності: лінії 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %.

де m_0 – первинна маса зразка, m – маса зразка після занурення у воду, F_{ζ} – розвиненість поверхні блоку плавучості, що обумовлена обсягом технологічної відкритої пористості ζ_0 , яка розраховується за формулою

$F_{\zeta} = 6\zeta_0 V / \bar{d}$. Середній діаметр пори $\bar{d}$ визначено при статистичному дослідженні розмірів пор і їх розподілів в шліфах зразків шляхом переводу проекції цих розмірів в дійсні розміри пор за методикою Салтикова. Точки, що отримані в результаті навантаження зразка гідростатичним тиском, апроксимовані функцією

$$w = \frac{a}{e^{(b-p)/c} + 1} \quad (2)$$

До функції (2) входять три коефіцієнти, які мають сильну кореляційну залежність від густини блоку ρ (таблиця 2) та визначаються залежностями:

$$a(\rho) = -3,5 \cdot 10^{-10} \rho^3 + 0,78, \quad b(\rho) = 12,7 \cdot 10^{-9} \rho^3 + 7,4, \quad c(\rho) = 2,4 \cdot 10^{-9} \rho^3 - 6,57 . \quad (3)$$

Підстановкою (3) в рівняння (2) отримано залежність поверхневого водопоглинання від густини блоку та гідростатичного тиску, яким навантажений блок плавучості:

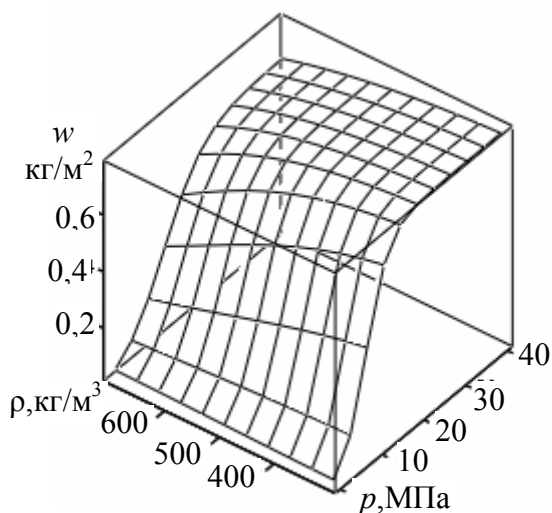
Таблиця 2

Результати кореляційного аналізу коефіцієнтів функції (2) в залежності від густини блоків плавучості з піноскла

Параметр, що розраховується	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Вибірковий коефіцієнт кореляції, <i>r</i>	0,692	0,829	0,844
Табличний коефіцієнт кореляції, $r_{1-\alpha/2} = r_{0,975}$	0,287		
Характер зв'язку даних	середній	сильний	сильний

$$w(\rho, p) = \frac{-3,5 \cdot 10^{-10} \rho^3 + 0,78}{\exp\left(\frac{12,7 \cdot 10^{-9} \rho^3 + 7,40 - p}{2,4 \cdot 10^{-9} \rho^3 - 6,57}\right) + 1} \quad (4)$$

Поверхня, що описана формулою (4), показана на рис.5. Блок плавучості проходить три етапи розвитку поверхневого водопоглинання: нестабільне (початкове) руйнування – при гідростатичному тиску $p \leq 3 \dots 4$ МПа; рівномірне водопоглинання – в діапазоні тиску (3...4) – (13...25) МПа; етап насичення – при гідростатичному тиску $p \geq (13 \dots 25)$ МПа. Тиск залежить від густини блоку.



Для тривалих випробувань вибрано 2 рівні густини зразків блоків: 550 та 650 кг/м³. Випробування проведено на 4х рівнях гідростатичного тиску: 3; 4; 5 і 6 МПа, при часі дії гідростатичного тиску до 400 годин.

Значення пошкоджуваності визначаються в залежності від часу дії тиску та його рівня. Для зручності розрахунків інтервали

безрозмірного часу $\bar{\tau} = \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)$ ($\tau_0 = 1$ година) представлено в таблиці 3.

Рис.5. Залежність поверхневого водопоглинання блоку від його густини та гідростатичного тиску

Таблиця 3

Значення часу для прогнозування пошкоджуваності і поверхневого водопоглинання

$\bar{\tau}$	-0,5	0	0,5	1	2	3	4	5	6
τ , год.	0,6	1	1,67	2,72	7,39	20	54	148	403

Апроксимацію поверхневого водопоглинання *w* блоку плавучості залежно від тиску для фіксованого часу експлуатації проведено методом найменших квадратів з використанням функції

$$w(\bar{\tau}, p) = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{b(\bar{\tau}) - \ln p}{c(\bar{\tau})}\right)}. \quad (5)$$

Визначено кореляційний зв'язок та регресійну залежність між параметрами $b(\bar{\tau})$, $c(\bar{\tau})$ та часом витримки під тиском $\bar{\tau}$.

На рис.6 представлена залежність поверхневого водопоглинання від часу експлуатації для блоків різної густини при можливих рівнях гідростатичного тиску. З рисунку видно, що зменшення водопоглинання блоку відбувається непропорційно до збільшення його густини. На малих рівнях тиску (до 3 МПа) поверхневе водопоглинання практично однакові для обох рівнів густини. При збільшенні тиску від 6 МПа водопоглинання зростає приблизно в 5 разів. Ця різниця свідчить про те, що в матеріалі проходять додаткові руйнування, як в квазіізотропному.

Блоки плавучості в часі проходять 3 стадії руйнування:

– I стадія нестійкого руйнування відбувається на початку експлуатації при $\tau \leq 10$

годин;

– II стадія рівномірного руйнування (практично прямолінійна ділянка кривої) відбувається в середині експлуатації $\tau \geq 10$ годин, верхня границя часу залежить від густини блоку;

– III стадія насичення супроводжується уповільненням накопичення пошкоджень.

Це пояснюється тим, майже всі перегородки між порами зруйновані і об'ємна пошкоджуваність близька до об'ємного вмісту пор блоку. Якщо густина блоку плавучості менше за 550 кг/м^3 , його об'ємна

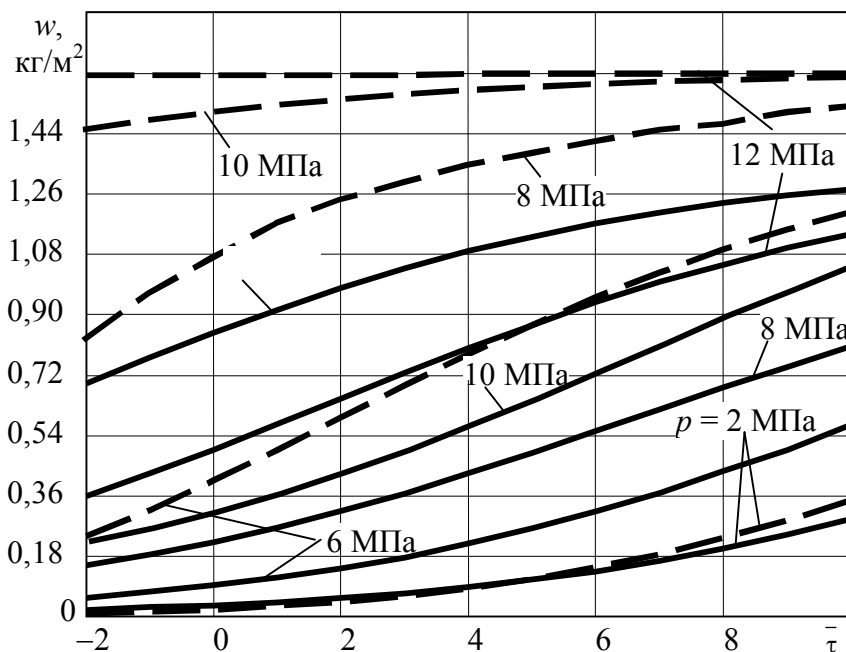


Рис.6. Поверхнєве водопоглинання блоків плавучості з густиною $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$ (пунктирні лінії) та $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ (суцільні лінії) при встановлених рівнях гідростатичного тиску p

пошкоджуваність і поверхнєве водопоглинання різко збільшуються, зменшуючи його ресурс роботи. При цьому I стадія практично відсутня і руйнування починається з II стадії.

У четвертому розділі побудовано математичну модель руйнування пор блоку плавучості, оскільки не завжди можливе проведення експерименту для аналізу пошкоджуваності блоку плавучості. Прийнято наступні гіпотези і припущення:

- до блоку плавучості можна застосувати першу теорію міцності (максимальних нормальних напружень), оскільки він виготовлений з крихкого матеріалу (скла);
- структура матеріалу блоку – піна, в якій існує розподіл комірок за розміром;
- форма комірок піни однакова і має вигляд додекаедра.

З об'єму блоку виділено елементарну комірку – додекаедр (рис.7, а). Грані додекаедра мають форму практично рівномірних за товщиною п'ятикутних пластинок (рис.7, б), товщина яких дорівнює товщині мембрани в центрі. Таким чином, при прогнозуванні закладено помилку в безпечну сторону.

Блок плавучості працює в умовах гідростатичного стискання. Якщо блок плавучості не захищений спеціальним покриттям, відбувається поступове пошкодження пор проламуванням їх в найтоншому місці – в центрі граней, що дає можливість розглянути напружено-деформований стан кожної окремої грані, представивши її як круглу пластину, що навантажена рівномірним тиском, жорстко закріплена по краях, як це показано на рис.7 (в). Напружений стан пластини розраховується за лінійною теорією пластин. Виходячи з того, що руйнування матеріалу блоку описується теорією максимальних нормальних напружень, критичний тиск можна розрахувати за формулою

$$p_{кр} \geq \frac{24\sigma_s \left(\frac{h}{d}\right)^2}{(1+\nu)\left(1+30,2\left(\frac{h}{d}\right)^2\right)}. \quad (6)$$

Критичний тиск залежить від співвідношення товщини стінки пори до її діаметру h/d . У свою чергу, h/d залежить від густини матеріалу. Для встановлення цієї залежності було проведено дослідження шліфів зразків блоків плавучості, які отримані при різних технологічних режимах і, відповідно, мають різну уявну густину ($\rho = 300 \dots 1170 \text{ г/см}^3$). Проведено статистичний аналіз частоти розподілу ймовірності товщини стінок граней та діаметрів пор в блоках різної густини. Розподіл ймовірності товщини стінок граней найбільш близький до розподілу Коші, розподіл діаметрів пор – до нормального розподілу:

За допомогою цих функцій розподілу знайдено рівень пошкоджуваності піноскла в залежності від товщини стінки пори h за формулою

$$\xi(h, \rho) = \frac{\arctg\left(\frac{h - b_2(\rho)}{a_2(\rho)}\right) + \arctg\left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)}\right)}{\frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)}\right)}, \quad (7)$$

а залежно від діаметру пори d :

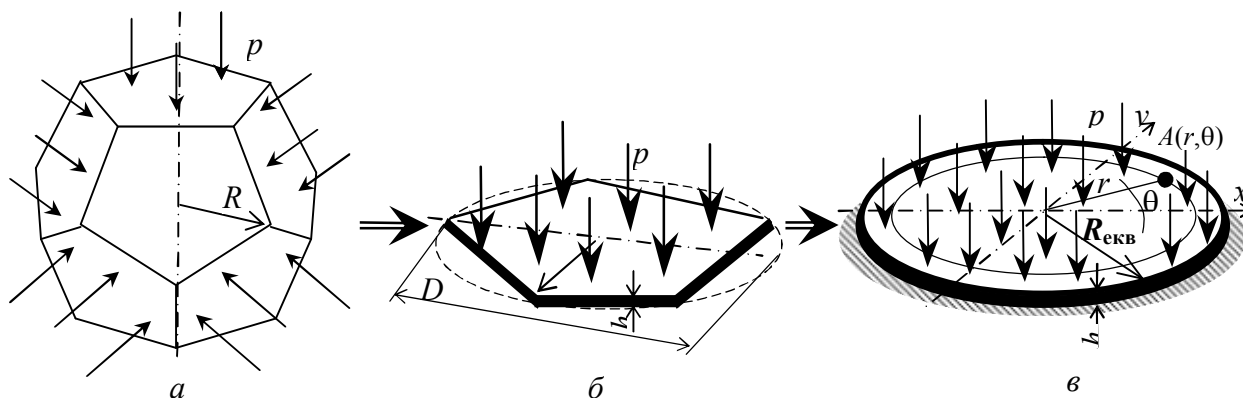


Рис.7. Схематичне представлення навантаженого стану комірки (а) блока плавучості та її грані (б, в)

$$\xi(d, \rho) = 1 - F_d(d) - \zeta_0(\rho) = 1 - \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho)}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho) - d}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) \right) - \zeta_0(\rho). \quad (8)$$

Залежності коефіцієнтів $a_1(\rho)$, $b_1(\rho)$, $a_2(\rho)$, $b_2(\rho)$ отримані за допомогою кореляційного та регресійного аналізу. Оскільки одна зруйнована грань веде до руйнування однієї пори, то $\xi(h, \rho) = \xi(d, \rho)$.

Так як функція $\xi(d, \rho)$ визначається через функцію помилок Гауса, діаметр неможливо представити в явному вигляді. Таким чином, можна отримати залежність тиску руйнування від пошкоджуваності блоків через параметр d , після підстановки (7) і (8) у формулу (6). Результат підстановки має вигляд

$$\begin{cases} p(d, \rho) = \frac{24\sigma_s \left(b_2(\rho) - a_2(\rho) \operatorname{tg} \left(\arctg \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) - \xi(d, \rho) \left(\arctg \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) + 1 \right) \right) \right)^2}{(1 + \nu) \left(d^2 + 30,2 \left(b_2(\rho) - a_2(\rho) \operatorname{tg} \left(\arctg \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) - \xi(d, \rho) \left(\arctg \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) + 1 \right) \right) \right)^2 \right)}, \\ \xi(d, \rho) = \left(1 - \frac{\rho}{2,5} \right) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho)}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho) - d}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) \right) - \zeta_T(\rho) \right] \end{cases} \quad (8)$$

де $\zeta_T(\rho)$ – технологічна відкрита пористість матеріалу блоку плавучості, виготовленого при температурі спінення T .

Рівень пошкоджуваності для блоків, виготовлених при температурі 840°C є нижчим, ніж при 880°C, оскільки при 840°C рівень технологічної відкритої пористості менше. Але при збільшенні густини блоку ця відмінність зменшується, і лінії пошкоджуваності для зразків блоків однакової густини сходяться (рис.8).

Проведено порівняння математичної моделі і експериментальних даних з визначення пошкоджуваності блоку плавучості. Теоретичний тиск руйнування виявляється значно заниженим для малих рівнів пошкоджуваності (5 та 10 %). При збільшенні обсягу руйнувань розрив між ними скорочується, а при 30 % пошкоджуваності вона потрапляє в 95 %-вий довірчий інтервал експериментальної кривої і перетинає саму криву. Розбіжність між експериментом та теоретичними даними $k = p_{\text{екс}}/p_{\text{теор}}$ представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти розбіжності експериментально отриманої пошкоджуваності з теоретичними даними

Рівень пошкоджуваності блоку плавучості, %	Коефіцієнт k для різної густини ρ (кг/м ³) блоків плавучості				
	400	500	600	700	800
5	1,4	1,6	1,63	1,65	1,77
10	1,45	1,5	1,67	1,68	1,70
20	1,32	1,30	1,30	1,28	1,26
30	1,28	1,2	1,1	1,07	0,95

У п'ятому розділі розроблено метод формування блоків плавучості з плит піноскла та кріплення їх на раму апарату.

Виготовляти плити піноскла товщиною більше 150 мм нераціонально, оскільки густина плити за висотою спінення плити змінюється на 7...12 %. Тому запропоновано блоки більшого розміру виготовляти з'єднанням з кількох плит піноскла. З'єднання проводиться мастикою на основі рідкого скла та отверджувача – кремній фтористого натрію із заповнювачем з порошку відходів піноскла з розміром частинок 0,05...0,1 мм та тальку. Кількість тальку складає 17...27 вагових частин, порошку піноскла – 18...28 вагових частин. Товщина з'єднувального шару мастики становить 1,5...2 мм. При цьому густина готового блоку плавучості зростає не більше ніж на 5 %. Така мастика має високу адгезію до піноскла, не потребує додаткової обробки поверхні плит. Тим же самим методом пропонується з'єднувати блоки плавучості між собою з використанням замкових з'єднань між ними.

Кріплення блоків на раму підводного апарату рекомендовано виконувати неіржавіючими з'єднувальними деталями (гвинти, шпильки), що монтуються на кремнійорганічному водостійкому компаунді Віксінт У-4-21 з теплостійкістю до 500 °С. Він застосовується для склеювання металевих і неметалевих хімічно-агресивних матеріалів (мідь, нікель і т.п.), не викликаючи корозії.

Збільшення густини блоків плавучості зменшує їх підйомну силу та позначається на такі морехідні якості всього підводного судна, як швидкохідність, керованість, метацентрична висота, крен, диферент, остійність. Дані характеристики можуть бути прийняті змінними в часі при експлуатації апарату.

Проведені дослідження використовуються для розрахунку зміни густини блоків від пошкодження гідростатичним тиском для НПА «Аргобуй», якщо кожен з них працює в складі апарату, за формулою

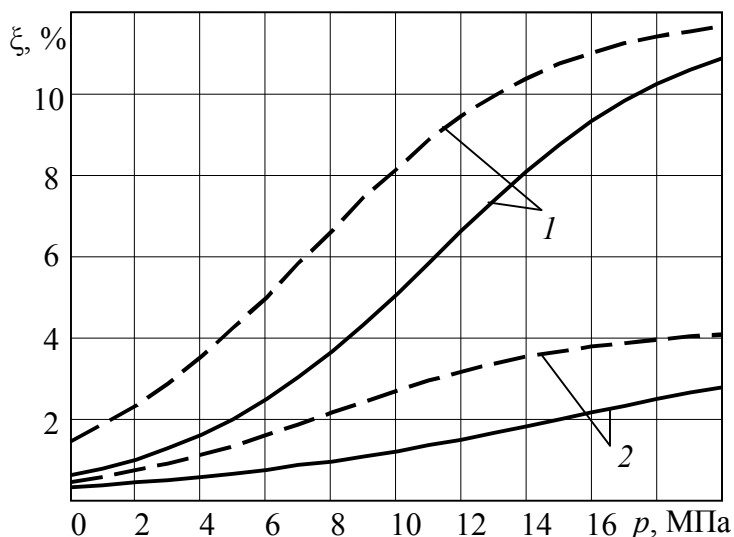


Рис.8. Зменшення підйомної сили НПА «Аргобуй» за рахунок накопичення пошкоджень в блоках плавучості при 10 годинах (суцільні лінії) та 400 годинах (штрихові лінії) експлуатації і гідростатичному тиску p : 1 – блоки густиною 550 кг/м³; 2 – 650 кг/м³.

$$\rho(p, \tau) = \rho + \frac{w(p, \tau)F}{V}, \quad (9)$$

де F – повна площа поверхні блоків, м², V – об'єм блоків, м³.

Графіки втрати плавучості НПА «Аргобуй» за рахунок водопоглинання блоків представлені на рис.8. Блоки густиною 650 кг/м³ зменшують підйомну силу апарату не більше ніж на 3...4 % при тиску 20 МПа та 400 годинах експлуатації. А блоки густиною 550 кг/м³, при тих самих умовах роботи апарату – на 12 % (рис.8), але кінцева густина у них є меншою ніж у більш важких блоків, тобто вони мають перевагу в плавучості.

Розроблено методику проектування блоку плавучості для підводних апаратів, блок-схема якої представлена на (рис.9).



Рис.9. Схема методики проектування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень

У шостому розділі проведено розрахунок вартості блоків плавучості з піноскла та порівняння її з вартістю існуючих блоків плавучості, виготовлених зі сферопластику та синтактичного піноскла. Розрахована вартість 1 кг піноскла складає 1,51 у.о., що в 5...7 разів нижче вартості синтактичного піноскла та сферопластика.

У додатках наведено результати апроксимації пошкоджуваності зразків піноскла в рамках повного факторного експерименту, представлено функції частоти розподілів ймовірності діаметрів та товщини граней пор в піносклі, методики дослідження і прогнозування властивостей блоків плавучості з піноскла, об'ємна пошкоджуваність і зміна густини блоків плавучості при тривалому гідростатичному навантаженні для НПА «Аргобуй», стандарт підприємства на блоки плавучості з піноскла, що розроблені здобувачем, акт метрологічної проробки дослідницьких випробувань дисертаційної роботи, деклараційний патент на корисну модель та акти про впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

За вибраними та обґрунтованими напрямками дослідження вдосконалено конструкцію підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості з піноскла, що враховують технологію їх виготовлення, формування і монтажу на апарат, а також встановлено ресурс роботи блоків з урахуванням тривалості навантаження їх гідростатичним тиском.

1. Визначено, що блоки плавучості з піноскла густиною 550...700 г/см³ дозволяють тривало працювати підводному апарату при температурі до 400°C на глибині, що перевищує світовий рівень існуючих блоків плавучості за теплостійкістю.

2. Обрано спосіб виготовлення плит піноскла та досліджено механізм руйнування блоку плавучості з піноскла при дії гідростатичного тиску, який полягає у послідовному руйнуванні стінок комірок піноскла з поверхні в глибину блоку, що дозволяє визначати втрату підйомної сили підводного апарату при короткочасному зануренні на глибину до 2000 м.

3. Побудовано математичну модель руйнування блоку плавучості із закритопористого піноскла з урахуванням фізичних властивостей елементарної комірки піноскла у вигляді правильного додекаедру та механічних властивостей матеріалу-матриці, яка демонструє що міцність блоку знижується зі зменшенням відношення товщини стінок граней до діаметру пор блоку h/d та зі збільшенням технологічної відкритої пористості вище 3 %;

4. Визначено зміну підйомної сили НПА «Аргобуй» за рахунок поверхневого водопоглинання блоками плавучості з піноскла, що залежить від гідростатичного тиску та часу занурення апарату при часі експлуатації від 10 до 400 годин:

- для блоків густиною 550 кг/м³ на глибині до 400 м – 1...2 %, на глибині до 1000 м – 5...8 %, на глибині до 2000 м – 11...12 %;
- для блоків середньою густиною 650 г/см³ на глибині до 400 м – 1 %, на глибині до 1000 м – 2...3 %, на глибині до 2000 м – 3...4 %.

5. Розроблено метод формування крупногабаритних блоків плавучості з піноскла за допомогою силікатної композиційної мастики на основі рідкого скла, наповненого тальком та відходами піноскла та монтажу їх на підводний апарат за допомогою неіржавіючих з'єднувальних деталей, закріплених кремнійорганічним теплостійким герметиком.

6. Розроблено наступні методики експериментального дослідження характеристик міцності та ресурсу роботи блоків плавучості при дії гідростатичного тиску:

- Програма і методика експериментальних досліджень накопичення пошкоджень у блоку плавучості із композиційного неорганічного матеріалу від дії експлуатаційних факторів при тривалих випробуваннях [Текст] УКФА 730131 – 005М. – Миколаїв: НУК, 2009 – 13 с.;

- Методика прогнозування об'ємної пошкоджуваності і поверхневого водопоглинання блоків плавучості із композиційного неорганічного матеріалу при тривалому гідростатичному навантаженні [Текст] УКФА 730131 – 006М. – Миколаїв: НУК. 2010, – 17с.

7. Розроблено наступні документи для вдосконалення проектування підводного апарату:

- Методика проектування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень [Текст] УКФА 360062-001М: введ. в дію 1.03.2011 – Миколаїв: НУК, 2011, – 14 с.;

- Стандарт підприємства «Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі піноскла. Склад і властивості.», СТП 2.066753 – 05.14.10. введений в дію 28.03. 2010. – 9 с.;

які дозволяють коригувати підйомну силу підводного апарату при тривалому зануренні на глибину до 2000 м.

8. Отримано Деклараційний патент на корисну модель № 5234/1 Україна, МПК(2009) C03C 11/00, B63B 5/00. Спосіб виготовлення блоків плавучості на основі піноскла /Н.С.Соломонюк; Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № u2009 12518; заявл. 20.11.09; опубл. 10.06.10// Промислова власність. 2010. – Бюл. № 11. – 3 с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації опубліковано в наукових працях:

1. **Соломонюк, Н.С.** Блоки плавучести повышенной теплостойкости из пеностекла для необитаемого подводного аппарата «Аргобуи» [Текст] / Н.С.Соломонюк // Проблемы техники. – 2011. – № 2 – С. 104 – 112.

2. **Бурдун, Е.Т.** Результаты исследования блоков плавучести из пеностекла для подводных аппаратов [Текст] / Е.Т.Бурдун, Н.С.Соломонюк // – Збірник наукових праць НУК. –2010. – № 3 (432) – С.32 – 38.

3. **Соломонюк, Н.С.** Повреждаемость блока плавучести из пеностекла для подводных аппаратов. [Текст] / Н.С.Соломонюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/7 (52) – С. 47 – 53.

4. **Соломонюк, Н.С.** Прогнозирование повреждаемости при гидростатическом обжати блоков плавучести из пеностекла для подводных аппаратов [Текст] / Н.С.Соломонюк // Збірник наукових праць НУК. – 2009. – № 1 (424). – С. 91 – 98.
5. **Соломонюк, Н.С.** Поверхностное водопоглощение и повреждаемость блока плавучести при гидростатическом обжати [Текст] / Н.С.Соломонюк // Збірник наукових праць НУК. – 2009. – № 5 (428) – С. 54 – 59.
6. **Соломонюк, Н.С.** Анализ повреждаемости закрытопористого пеностекла, работающего при гидростатическом давлении [Текст] / Н.С.Соломонюк // Збірник наукових праць НУК. – 2007. – № 2 (413) – С. 19 – 25.
7. Деклараційний патент на корисну модель № 5234/1 Україна, МПК(2009) C03C 11/00, B63B 5/00. Спосіб виготовлення блоків плавучості на основі піноскла [Текст] / Соломонюк Н.С.; заявник і патентотримач Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № u2009 12518; заявл. 03.12.09; опубл. 10.06.10 // Промислова власність. – 2010. – Бюл. № 11 – 3 с..

Особистий внесок здобувача в працях, опублікованих у співавторстві. В роботі [2] виконано експериментальне дослідження впливу технологічних параметрів виготовлення піноскла на густину та технологічну відкриту пористість блоку плавучості.

Праці, які додатково відображають результати дисертації:

1. **Бурдун, Е.Т.** Прогнозирование объемной повреждаемости и поверхностного водопоглощения конструкций дополнительной плавучести из пеностекла при длительной эксплуатации подводных технических средств [Текст] / Е.Т.Бурдун, Н.С.Соломонюк // Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций: материалы 2 международной научно-технической конференции.(7 – 11 июня, Ялта). – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», – 2010. – С. 431 – 433.
2. **Соломонюк, Н.С.** Прогнозирование повреждаемости при гидростатическом обжати блоков плавучести из пеностекла для подводных аппаратов [Текст] / Н.С.Соломонюк // «Композиционные материалы в промышленности». Материалы 29 международной конференции.(1 – 5 июня, Ялта) – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», – 2009. – С. 344 – 345.
3. **Соломонюк, Н.С.** Оптимізація складу та структури піноскла із захисним покриттям для використання в якості матеріалу плавучості / Н.С.Соломонюк // Матеріали науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу.(23 – 25 квітня, Миколаїв) — 2008. – С. 225 – 226.
4. **Соломонюк, Н.С.** Оптимизация состава и определение связи между свойствами закрытопористого пеностекла [Текст] / Н.С.Соломонюк // Композиционные материалы в промышленности. Материалы 27 международной конференции.(28 мая – 1 июня, Ялта) – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», – 2007. – С. 463 – 464.
5. **Астахов, О.Е.** Изучение повреждаемости защищенного и незащищенного пеностекла [Текст] / О.Е.Астахов, Е.Т.Бурдун, Н.С.Соломонюк // Композиционные материалы в промышленности. Материалы 24 международной конференции.(1 – 4 июня, Ялта) – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», – 2004. – С. 5 – 8.
6. **Соломонюк, Н.С.** Оптимизация состава, структуры, и параметров технологического процесса получения пеностекла [Текст] / Н.С.Соломонюк //

Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов (БМС-2004). Материалы международной научно-практической конференции (2 – 6 июня, Николаев). – 2004. – С. 89 – 90.

7. **Ошуркова, Н.С.** Экспериментальное исследование повреждаемости закрытопористого пеностекла, работающего при гидростатическом обжатии [Текст] / Н.С.Ошуркова // Кораблебудування. Освіта, наука, виробництво. Матеріали міжнародної конференції (24 – 25 вересня). – Миколаїв: УДМТУ – Т.2 – 2002. – С. 111 – 112.

8. **Ошуркова, Н.С.** Анализ напряженного состояния элементарной ячейки в массиве пеностекла при гидростатическом обжатии [Текст] / Н.С.Ошуркова // Композиционные материалы в промышленности. Материалы 19 международной конференции (11 – 13 мая, Ялта). – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», – 1999. – С. 47 – 53.

Особистий внесок здобувача в працях, опублікованих у співавторстві В роботі [5] автором виконані експерименти по визначенню пошкоджуваності піноскла із захисним покриттям та без нього.

АНОТАЦІЯ

Соломонюк Н.С. Вдосконалення конструкції підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості. Рукопис дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.08.03. – "Конструювання і будування суден". Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 2012 р.

В дисертації вибрано та обґрунтовано використання блоків плавучості підвищеної теплостійкості з піноскла для незалюдненого прив'язного апарату «Аргобуй». За допомогою повного факторного експерименту визначено склад і технологію виготовлення плит піноскла, виходячи з мінімуму поверхневого водопоглинання піноскла при гідростатичному стисканні. Експериментально визначено ресурс та рекомендовані режими роботи блоків плавучості з піноскла при тривалій експлуатації підводного апарату на глибині.

Побудовано математичну модель пошкоджуваності блоку плавучості на базі фізичної моделі елементарного комірки у вигляді правильного додекаедру з урахуванням механічних властивостей скла.

Розроблено метод формування блоків з піноскла та їх монтажу на раму підводного апарату.

За проведеним аналізом й узагальненням результатів досліджень розроблено методику проектування підводного апарату з урахуванням зменшення підйомної сили блоків плавучості з піноскла внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень.

Розроблено методики експериментального дослідження та прогнозування характеристик міцності і ресурсу роботи блоків плавучості при дії гідростатичного тиску та стандарт підприємства на блоки плавучості з піноскла. Отримано деклараційний патент на корисну модель на спосіб виробництва блоків плавучості з піноскла.

Ключові слова: підводний апарат, гідростатичний тиск, блок плавучості, піноскло, пошкоджуваність, пористість, поверхнєве водопоглинання.

АННОТАЦІЯ

Соломонюк Н.С. Усовершенствование конструкции подводного аппарата блоками плавучести повышенной теплостойкости. Рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – "Конструирование и строительство судов". Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев, 2012 г.

В диссертации выбрано и обосновано направление использование блоков плавучести повышенной теплостойкости из пеностекла для необитаемого привязного аппарата «Аргобуй».

С помощью полного факторного эксперимента определены состав и технология изготовления пеностекла плотностью $0,46...0,70 \text{ г/см}^3$ для таких блоков.

Экспериментально определено поверхностное водопоглощение пеностекла для блоков плавучести при длительном действии гидростатического давления. Согласно полученным результатам даны рекомендации по режимам работы блоков плавучести на глубине.

Построена математическая модель зависимости разрушающего гидростатического давления от повреждаемости блока на базе физической модели элементарной ячейки пеностекла в виде правильного додекаэдра. Учтены механические свойства стекла. При анализе модели сделан вывод, что деградирующими факторами, влияющими на уровень водопоглощения, являются уменьшение отношения толщины стенок граней к диаметру пор и увеличение технологической открытой пористости в пеностекле. Сравнение теоретической модели с экспериментальными данными показало, что при малых уровнях повреждаемости (5, 10 % по объему) модель дает ошибку в безопасную сторону, при высоких уровнях (20, 30 %) – практически совпадает с экспериментом.

Разработан метод формования и монтажа блоков из пеностекла на раму подводного аппарата. Для крупногабаритных блоков толщиной больше 150 мм несколько плит пеностекла соединяются неорганической мастикой на основе жидкого стекла, наполненного отходами пеностекла и тальком. Затем блокам механической обработкой придается необходимая форма. Между собой блоки крепятся такой мастикой и с помощью замковых соединений. На раму подводного аппарата блоки крепятся нержавеющей сталью на кремнийорганическом температуростойком компаунде.

В результате проведенного анализа и обобщения результатов исследований разработана методика проектирования подводного аппарата с учетом уменьшения подъемной силы блоков плавучести из пеностекла вследствие накопления эксплуатационных повреждений.

Разработаны методики экспериментального исследования характеристик прочности и ресурса работы блоков плавучести при действии гидростатического давления и стандарт предприятия на блоки плавучести из пеностекла. Получен декларационный патент на полезную модель на способ изготовления блоков плавучести из пеностекла.

Ключевые слова: подводный аппарат, гидростатическое давление, блок плавучести, пеностекло, повреждаемость, пористость, поверхностное водопоглощение.

ABSTRACT

Solomonuk N.S. Improvement of the submarine construction by the higher-heatstability buoyancy blocks. Manuscript of dissertation is for conferment of graduate degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.08.03. – “Design and building of ships”. National university of shipbuilding named of the admiral Makarov, Nikolaev, 2012

The research's directions of foamglass buoyancy blocks' properties for the peopleless submarine “Argobuoy” are chosen and grounded in the dissertation. The optimum composition and technology of the buoyancy blocks' making are certain by the complete factor experiment, coming from the minimum of the foamglass's destruction and superficial the water absorption at the hydrostatical compression. Plot density against technological opened porosity is certain by the correlation and regressive analysis, but it is impossible to eliminate the temperature of making to the foam.

The foamglass buoyancy block's resource is determined experimentally and the working modes are recommended.

The mathematical model of buoyancy block's destruction was built on the base of physical model of elementary cell as a dodecahedron. The statistical analysis of diameter's and pore-wall thickness' probability distribution and mechanical properties of the material are taken into account on the mathematical model building. The engineer can be calculate the foamglass buoyancy blocks destruction at the hydrostatical compression without having the experiment and make the people and techniques secure.

The foamglass blocks' method of forming and their assembling on the submarine frame are developed.

The experimental research methods of the buoyancy blocks destruction and working resource at the hydrostatical pressure and enterprise standard on the foamglass buoyancy blocks were developed. The declarative patent on an useful model on the method of making of foamglass' buoyancy blocks is got.

Keywords: submarine, hydrostatical pressure, buoyancy block, foamglass, destruction, porosity, superficial the water absorption.

