

DOI 10.15589/jnn20170204  
УДК 629.5  
К65

## SUBSTANTIATION OF THE ADEQUATE DESIGN OF BUOYANCY BLOCKS FOR UNDERWATER VEHICLES

## ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БЛОКІВ ПЛАВУЧОСТІ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

**Serhiy V. Kopyika**  
sergii.kopyika@gmail.com  
ORCID: —

**I. O. Zaharova**  
reginazakharova24@gmail.com  
ORCID: —

**Oleksandr H. Yehorov**  
egorovag@meb.com.ua  
ORCID: 0000-0002-2050-8640

**С. В. Копійка,**  
канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>

**І. О. Захарова<sup>1</sup>,**

**О. Г. Єгоров,**  
канд. техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

<sup>2</sup>*Marine Engineering Bureau, Odessa*

<sup>1</sup>*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

<sup>2</sup>*Морське Інженерне Бюро, м. Одеса*

**Abstract.** Characteristics of operation and destruction of the materials of buoyancy blocks of underwater vehicles have been considered. Water absorption, hydrostatic strength and structural heterogeneity of the material are singled out as the main factors determining the design features of buoyancy blocks. The impact of structural parameters of buoyancy blocks on the operational properties of syntactic foam is shown. Recommendations are given as for the adequate shape, size, positioning and fixation of buoyancy blocks made of syntactic foam.

**Keywords:** buoyancy block; ship structures; syntactic foam; prediction; operational parameters; hydrostatic compression strength; water absorption.

**Анотація.** Розглянуто особливості експлуатації й руйнування матеріалів блоків плавучості підводних апаратів. Виділено водопоглинання, гідростатичну міцність і структурну неоднорідність матеріалу як основні фактори, що визначають конструкційні особливості блоків плавучості. Показано вплив конструктивних параметрів блоків плавучості на експлуатаційні властивості сферопластика. Надано рекомендації щодо раціональної форми, розмірів, розташування й закріплення блоків плавучості зі сферопластика.

**Ключові слова:** блок плавучості; суднові конструкції; сферопластик; прогнозування; експлуатаційні параметри; міцність при гідростатичному стисненні; водопоглинання.

**Аннотация.** Рассмотрены особенности эксплуатации и разрушения материалов блоков плавучести подводных аппаратов. Выделены водопоглощение, гидростатическая прочность и структурная неоднородность материала как основные факторы, определяющие конструкционные особенности блоков плавучести. Показано влияние конструктивных параметров блоков плавучести на эксплуатационные свойства сферопластика. Даны рекомендации по рациональной форме, размерам, расположению и закреплению блоков плавучести из сферопластика.

**Ключевые слова:** блок плавучести; судовые конструкции; сферопластик; прогнозирование; эксплуатационные параметры; прочность при гидростатическом сжатии; водопоглощение.

## REFERENCES

- [1] Sagalevich A. M. *Okeanologiya i podvodnye obitayemye apparaty. Metody issledovaniya* [Ocean engineering and underwater inhabited vehicles. Methods of research]. Moskva, Nauka Publ., 1987. 256 p.
- [2] Blintsov V. S., Magula V. E. *Proyektirovaniye samokhodnykh privyaznykh podvodnykh sistem* [Designing self-propelled tethered underwater systems]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 140 p.
- [3] Blintsov V. S. *Privyaznye podvodnye sistemy* [Tethered underwater systems]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1998. 232 p.

- [4] Koptika S. V. *Prognozuvannya mitsnosti ta resursu roboty konstruktsiy plavuchosti pidvodnykh aparativ : dis. kand. tekhn. nauk* [Prediction of the strength and service life of buoyancy structures of underwater vehicles: Cand. Dis.]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2008. 232 p.
- [5] Burdun Ye. T., Titov G. V. *Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na svoystva sferoplastikov* [Impact of operational factors on the properties of syntactic foams]. *Kompozitsionnye materialy v konstruktsiyakh glubokovodnykh tekhnicheskikh sred: Tezisy dokladov mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Composite materials in the structures of deep-water technical media: Abstracts of the Inter-university Scientific and Technical Conference]. Nikolaev, NKI Publ., 1989, pp. 44–46.
- [6] Nikitin V. A., Sazonov I. A., Subbotin V. Yu., Fedonyuk N. N., Nikitin V. A. *Vliyaniye dlitel'nogo gidrostaticheskogo davleniya na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki sferoplastikov* [Impact of prolonged exposure to hydrostatic pressure on the physical and mechanical characteristics of syntactic foams]. *Kompozitsionnye materialy v konstruktsiyakh glubokovodnoy tekhniki: Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Composite materials in deep-water engineering: Abstracts of the All-Union Scientific and Technical Conference]. Nikolaev, NKI Publ., 1991, pp. 111–112.
- [7] Titov G. V., Burdun Ye. T. *Ekspperimentalnoye opredeleniye resursa sferoplastika EDS-7A* [Experimental determination of the service life of the syntactic foam EDS-7A]. *Kompozitsionnye materialy v konstruktsiyakh glubokovodnoy tekhniki: Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Composite materials in deep-water engineering: Abstracts of the All-Union Scientific and Technical Conference]. Nikolaev, NKI Publ., 1991, pp. 142–143.
- [8] Koptika S. V. *Obhruntuvannya skladu sferoplastyka plavuchogo buia glybokovodnoi akustichnoi stantsii* [Substantiation of composition of the syntactic foam for a floating buoy of a deep-water acoustic station]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, Mykolaiv, NUOS Publ., 2008, no. 5 (422), pp. 52–55.
- [9] Krypton Ocean Group. Available at: [www.kryptonocan.com](http://www.kryptonocan.com).
- [10] Geyko S. P. *Tekhnologiya izgotovleniya keramicheskikh sfericheskikh obolochek i elementov plavuchesti na ikh osnove dlya glubokovodnoy tekhniki: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Technology of manufacturing of ceramic spherical shells and buoyancy elements on their basis for deep-water vehicles]. Nikolaev, NKI Publ., 1994. 139 p.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Серед технічних засобів освоєння Світового океану можна виділити таку окрему категорію, як підводні апарати (ПА). Вони можуть бути самохідні, несамохідні, населені [1], незаселені, прив'язні, автономні [2], [3], мають дуже широкий діапазон значень габаритних розмірів, ваги, потужності. Призначення їх може варіюватися від невеликих оглядових до населених з вагою декілька тонн, екіпажем у декілька членів. Незважаючи на відмінності призначення й розмірів, більшість ПА мають у своєму складі системи забезпечення плавучості, надалі — блоки плавучості (БП). Основна задача БП — надавати підводному судну нульової або позитивної плавучості на весь термін експлуатації. Одним з традиційних матеріалів для виготовлення БП виступає сферопластик (*Syntactic foam*) — двофазний матеріал, що складається з матриці і сферичних включень. За структурою — це хаотичне скупчення твердих порожнистих мікросфер, що зв'язані між собою полімерною матрицею. Кількість зв'язуючого (частіше — епоксидної смоли) в сферопластику становить не більше 40% за об'ємом [4].

Основними експлуатаційними характеристиками сферопластиків вважають уявну густину й максимально допустиму глибину занурення БП у складі ПА, які переважно і враховують при проектуванні підводних технічних засобів. Нехтування особливостями виготовлення, використання й руйнування сфе-

ропластиків призводить до зниження ефективності його роботи, зменшення ресурсу роботи БП. На сьогодні не виявлено аргументованих загальних підходів до конструювання БП, що визначає актуальність нижченаведеного дослідження.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Експериментальні й теоретичні роботи щодо характеристик композиційних матеріалів зі сферичними включеннями репрезентовано досить широко. Результати таких досліджень змінювалися з розвитком структури й властивостей сферопластиків. Прикладом експериментального дослідження є робота [4], у якій емпіричним шляхом визначено основні характеристики блоків плавучості зі сферопластика з фенольним й епоксидним зв'язуючими. У роботі [5] експериментально досліджується вплив експлуатаційних факторів, зокрема глибини експлуатації, тривалості експлуатації на залишкові значення характеристик матеріалів блоків плавучості, таких як густина матеріалу плавучості, гідростатична міцність, водопоглинання. Загальні методики експериментального дослідження властивостей матеріалів плавучості описано в тезах доповідей [6, 7]. Основні методики проектування БП наведено в роботі [8]. У цих наукових роботах містяться основні експериментальні дані для розробки рекомендацій проєктанту БП підводних технічних засобів.

**МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ** — формулювання єдиних аргументованих підходів до конструювання блоків плавучості зі сферопластика, які використовуються в населених і ненаселених підводних апаратах.

#### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основними факторами конструкції БП для апаратів з вагою до двох- трьох тонн можна вважати форму, розміри, розташування, способи закріплення в ПА, захист поверхні. Для апаратів більшої ваги з'являються додаткові фактори, такі як: модульність, уніфікація з обладнанням та ін [9].

**Форма БП.** Як правило, блоки виготовляються із суцільного сферопластика, за деякими винятками. На піднімальну силу, допустиму глибину занурення форма БП не впливає. Головним чином, форму (а через форму — площу поверхні) конструкції плавучості слід пов'язувати з такою характеристикою, як водопоглинання. У вітчизняній і світовій практиці більшість дослідників користуються величинами об'ємного водопоглинання, що вимірюються в одиницях г/кг або г/м<sup>3</sup>. Така характеристика може бути прийнятною лише для гомогенних суцільних матеріалів, до яких, вочевидь, не належить сферопластик — мікроструктурно неоднорідний матеріал, як видно на рис. 1.

Проникнення води в матеріал при експлуатації БП відбувається за механізмом, близьким до дифузійного, як показано в роботах [4, 7]. На рис. 2. про-

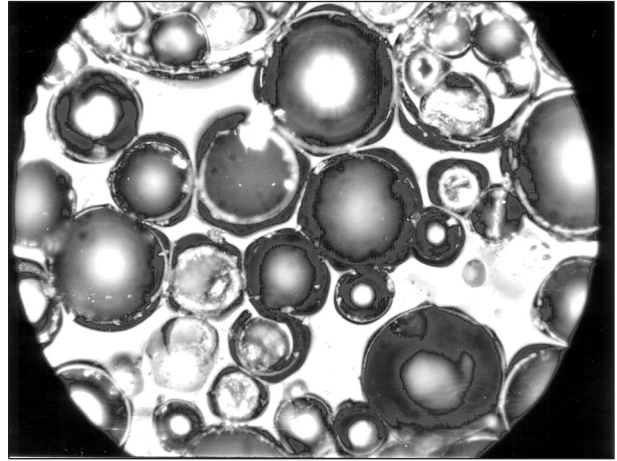


Рис. 1. Мікроструктура сферопластика

демонстровано перебіг процесу водопоглинання блоком сферопластика.

Отже, водопоглинання БП зі сферопластика слід визначати як поверхневе водопоглинання з одиницями вимірювання г/м<sup>2</sup>. Значення водопоглинання може бути розраховане згідно з роботою [4] за формулою:

$$W(P, t) = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \vartheta_i(P, t),$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт впливу часу експлуатації БП на частоту пошкоджень;  $\vartheta_i(P, t) = 1 - e^{-\vartheta_{i-1}(h, t) f(P, t) t}$  —

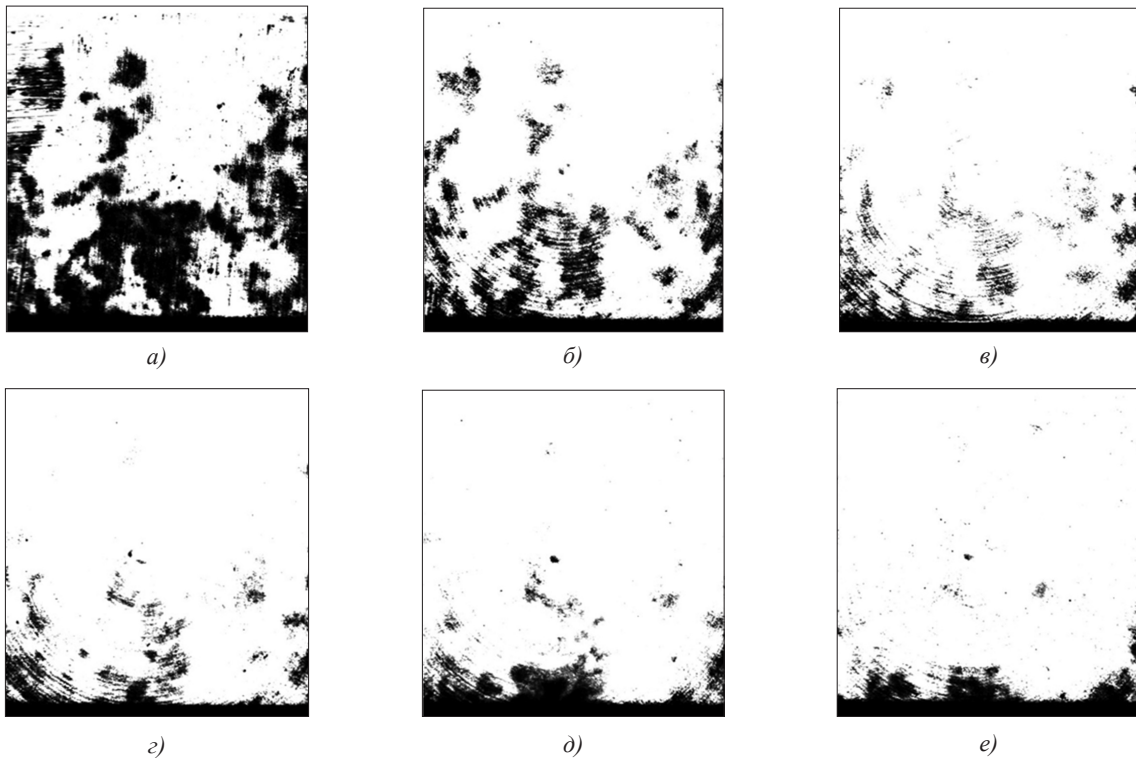


Рис. 2. Локалізація пошкоджених ділянок сферопластика за тривалого водопоглинання на базі 336 год і гідростатичного тиску 70 МПа:

а) на глибині (від поверхні блока) 0,5 мм; б) 1,0 мм; в) 1,5 мм; г) 2,0 мм; д) 2,5 мм; е) 3,0 мм

відносна пошкоджуваність  $i$ -го шару матеріалу;  $f(P)$  визначають через характеристики вихідних компонентів сферопластика.

Для БП в умовах експлуатації  $P = 70$  МПа,  $t = 5000$  год достатньо розрахувати пошкоджуваність 100 шарів матеріалу.

Кількість поглинутої води блоком плавучості при гідростатичному тиску  $P$  за час експлуатації  $t$  визначається як:

$$M(P, t) = W(P, t) S,$$

де  $S$  — площа поверхні, м<sup>2</sup>.

З вищезазначеного випливає факт збільшення кількості поглиненої блоком води при розширенні поверхні конструкції плавучості. Мінімальну відносну поверхню з усіх форм блоків матиме сфера, яка частіше за все є непринятною для конструкцій БП, але може використовуватися для буїв зі сферопластика й подібних об'єктів. Для БП підводних апаратів можна рекомендувати кубічну форму конструкції або форму у вигляді паралелепіпеда. Приклад нераціональної форми БП з розвиненою поверхнею показано на рис. 3. Указана конструкція матиме дуже обмежений ресурс роботи через поступове зменшення плавучості.

**Розміри БП.** Основні характеристики ПА, що визначають розміри блока — необхідна додаткова плавучість (вантажопідйомність) і власні габаритні розміри апарата. Додатково при конструюванні БП слід враховувати явище колапсу матеріалу, що встановлює гідростатичну міцність (максимальну глибину занурення) сферопластика. У момент втрати гідростатичної міцності конструкція плавучості втрачає значну частину плавучості й не може надалі виконувати функцію. Втрата гідростатичної міцності сферопластика — явище динамічне, як показано в роботі [4], та супроводжується динамічною хвилею напружень, що поширюється в матеріалі і за його межами. Динамічна хвиля може викликати імпульсію — ініційоване руйнування сусідніх конструкцій плавучості. Явище імпульсії досліджене в [10].

Ураховуючи особливості руйнування матеріалу плавучості, загальний об'єм плавучості слід розділяти на блоки, втрата плавучості кожного з яких не несе катастрофічних наслідків для всього ПА. Найбільш важливо це робити для населених ПА. Блоки плавучості в складі конструкції апарата повинні розмежовуватися шаром матеріалу, який добре поглинає динамічну енергію (гума, силікон або подібні матеріали).

**Розташування БП.** При конструюванні ПА необхідно дотримуватися симетричності розташування блоків плавучості відносно діаметральної площини й умовного перерізу міделя. Відхилення від симетричності матеріалу плавучості призведе під час тривалої експлуатації технічного засобу, крім втрати самої

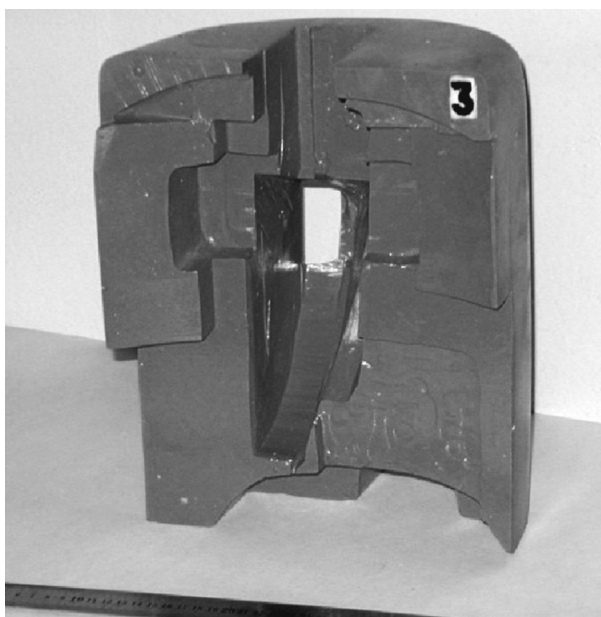


Рис. 3. Блок плавучості із завищеними значеннями водопоглинання

сили підтримки, до появи крену та диференту. Це вимагатиме додаткової плавучості для диферентування й відкренювання апарата.

**Способи закріплення БП.** Конструкції плавучості вимагають закріплення в ПА способом, який забезпечить втримання конструкцій під дією сил плавучості під водою й під дією власної ваги — над водою.

Можливі декілька варіантів закріплення БП:

– вклеювання блока в оточуючі рами конструкції. Виконуючи кріплення, необхідно використовувати компаунди з міцністю на зсув не меншою за 50 МПа й достатньою адгезією до сферопластика. Найбільш ефективні епоксидні компаунди;

– штифтове з'єднання з рамними конструкціями. Для запобігання утворенню концентрацій напружень у масиві сферопластика при всебічному гідростатичному стисненні слід застосовувати для штифтів посадку із зазором за типом Н9/ф9 або Н9/е9. Наявність зазору між штифтом і сферопластиком надає можливості масиву сферопластика для деформування під впливом гідростатики;

– різьбове з'єднання з використанням болтів і гвинтів. Використовуються стандартні кріпильні елементи, що виготовлені з неіржавіючої сталі. Для запобігання утворенню концентрацій напружень у масиві сферопластика при всебічному гідростатичному стисненні, враховуючи різницю об'ємних модулів пружності сталі та сферопластика між кріпильним елементом і матеріалом БП, необхідно встановлювати демфуючий прошарок з матеріалу, який має незначний модуль пружності (300...500 МПа).

**ВИСНОВКИ.** Основним матеріалом для виготовлення БП підводних технічних засобів є епоксидний

сферопластик. Ураховуючи особливості механічних характеристик сферопластиків та умови експлуатації ПА в підводному та надводному режимах, раціональною конструкцією БП слід вважати:

- БП кубічної форми або у вигляді паралелепіпеда зі скругленням ребер радіусом 5...10 мм;
- БП максимальних розмірів, при граничних значеннях об'єму, що за раптового руйнування не матиме

катастрофічних наслідків для конструкції плавучості та всього ПА в цілому;

- БП розташовуються симетрично відносно діаметральної площини й умовного міделя;
- закріплення БП в несучих конструкціях ПА виконуються вклеюванням, штифтовим і різьбовим з'єднанням.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Сагалевич А. М. Океанология и подводные обитаемые аппараты. Методы исследования [Текст] / А. М. Сагалевич. — М. : Наука, 1987. — 256 с.
- [2] Блинцов В. С. Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинцов. — К. : Наукова думка, 1997. — 140 с.
- [3] Блинцов В. С. Привязные подводные системы [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула. — К. : Наук. думка, 1998. — 232 с.
- [4] Копійка С. В. Прогнозування міцності та ресурсу роботи конструкцій плавучості підводних апаратів : дис... канд. тех. наук: 05.08.03: захищена 13.10.2008: затв. 28.04.2009 [Текст] / С. В. Копійка. — Миколаїв, 2008. — 232 с.
- [5] Бурдун Е. Т. Влияние эксплуатационных факторов на свойства сферопластиков [Текст] / Е. Т. Бурдун, Г. В. Титов // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред: тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции. — Николаев : НКИ, 1989. — С. 44–46.
- [6] Никитин В. А. Влияние длительного гидростатического давления на физико-механические характеристики сферопластиков [Текст] / В. А. Никитин, И. А. Сазонов, В. Ю. Субботин, Н. Н. Федонюк // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. — Николаев : НКИ, 1991. — С. 111–112.
- [7] Титов Г. В. Экспериментальное определение ресурса сферопластика ЭДС-7А [Текст] / Г. В. Титов, Е. Т. Бурдун // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. — Николаев : НКИ, 1991. — С. 142–143.
- [8] Копійка С. В. Обґрунтування складу сферопластика плавучого буя глибоководної акустичної станції [Текст] / С. В. Копійка // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв, 2008. — № 5 (422). — С. 52–55.
- [9] Krypton Ocean Group. — Режим доступу: [www.kryptonocyan.com](http://www.kryptonocyan.com).
- [10] Гейко С. П. Технология изготовления керамических сферических оболочек и элементов плавучести на их основе для глубоководной техники: автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / С. П. Гейко. — Николаев : НКИ, 1994. — 139 с.

© С. В. Копійка, І. О. Захарова, О. Г. Єгоров

Надійшла до редколегії 15.03.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. Л. І. Коростильов