

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Юреско Тетяна Анатоліївна

УДК 629.5.01:629.584

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.08.03 – Конструювання та будування суден

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Т.А. Юреско
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Бурдун Євген Тимофійович, канд. техн. наук, доцент

Миколаїв 2017

АНОТАЦІЯ

Юреско Т. А. Удосконалення конструкції підводних населених апаратів теплоізолюючими блоками плавучості. – Кваліфікаційна наукова праця 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, МОН України, Миколаїв, 2017.

В дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-прикладну задачу удосконалення конструкції підводного населеного апарату (ПНА) за рахунок надання додаткової функції теплоізоляції окремим елементам плавучості зі сферопластика з додатковою поруватістю (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.

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**.

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 .

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.

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.

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.

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).

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.

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.

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.

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 тепла 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 апарата блоками зі СДП густиною $450...500 \text{ кг/м}^3$ і коефіцієнтом теплопровідності $0,085 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{К)}$ 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 судновому журналі передісторією навантажень.

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.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати 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*

международ. 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 международ. 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 международ. 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 международ. 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.

ANNOTATION

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.

In the dissertation work was solved application task – improvement of the design of manned submersible by installation buoyancy blocks with syntactic foam with additional porosity (SFAP) in the form of outside shell for strength hull. With the designation at the design stage of the resource of the operation of the blocks, taking into account depths and diving time, cyclical dive-surfacing to the surface at air temperature below 0°C.

Analysis of buoyancy elements in the structure of manned submersibles operating under conditions of long and repetitive diving at depths of 1500...2000 m and rising to the surface at air temperature below 0° C and consideration of problems associated with maintaining the temperature regime inside the apparatus, especially in emergency situations, showed that the replacement of a part of the elements by buoyancy SFAP blocks with a density of 450...500 kg /m³) in the form of outside shell for strength hull except for the main purpose - an increase in the maintenance force, is promising in terms of providing thermal insulation to a durable housing. The proposed form buoyancy SFAP blocks in the design of the underwater-inhabited device is used for the first time.

The main workload on the buoyancy SFAP blocks is hydrostatic pressure. The action of which is accompanied by the accumulation of damage - the gradual destruction of air cavities and the penetration of water into the block. Damage leads to a decrease in the buoyancy of the blocks, which affects to the ballasting system of the whole manned submersibles, and reduces the heat-insulating properties of the SFAP blocks, which worsens the thermal protection of the strength hull.

So, the main attention in the dissertation work is given to the experimental study of the damage accumulation in SFAP blocks and its effect on the change in the floating and heat-insulating properties of the blocks in the structure of manned submersibles under operating conditions.

Operational loads long-term dives typical for the stationary operating mode of the underwater-inhabited device and climatic tests that are inherent for cyclic immersion of the underwater- device and ascent to the surface in conditions of air temperatures below 0 °C were considered.

Mechanism of damage accumulation in buoyancy SFAP blocks under long-term hydrostatic loads is experimentally investigated. The mechanism consists in the consequent destruction of air cavities and the penetration of water from the surface into the block. This allowed building a mathematical model of damage accumulation in buoyancy SFAP blocks on the basis of the linear viscoelasticity equation in the form of a logistic distribution with respect to the hydrostatic pressure level (depth) and the immersion time.

The mathematical model of change insulating properties in the SFAP blocks was developed taking into account the accumulated damage during a long immersion of the apparatus.

The physical model of accumulation damages in the SFAP blocks based on the analogy with the phenomenon of diffusion was developed. The model allows taking into account the scale factor and it estimating the damageability of blocks of any shape and size.

The developed models had further development for predicting the resource life of the blocks in the design of manned submersible .

The Mechanism of damage accumulation in buoyancy SFAP blocks cycles of submergence-ascent of the manned submersible on the surface at air temperature below 0°C is experimentally researched. It is established that such operating conditions of the underwater vehicle increase the volume of damages in the SFAP blocks units by 2 times in comparison with operation in the absence of climatic factor.

The mathematical model of damages accumulation in the SFAP blocks under cyclic action of hydrostatic pressure and climatic factor is developed. The model is

analogous to long-term loading, created on the basis of the logistic law, only depending on the level of hydrostatic pressure (depth) and the number of cycles of climatic influence. The model is complicated by additional parameters to take into account the effect of the water phase transition accumulated in the blocks upon immersion. The model is complicated by additional parameters to take into account the effect of phase transition the water, which was accumulated in the blocks upon immersion.

The mathematical model of change insulating properties in the SFAP blocks was developed for the cyclic hydrostatic loads.

The relation between the volume of damage accumulation and change in the SFAP blocks insulation properties is experimentally established. This showed that the thermal conductivity depends mainly on the level of accumulated damage. The mechanism of the destruction of blocks, stipulated to the depth and duration of immersion or the cycles of submergence-ascent of the apparatus, does not significantly affect, but determines only the different intensity of the process.

The technique is improved which, at the design stage of underwater-inhabited device with immersion depth 1500...2000 m, predicts a loss of buoyancy force and a change of temperature inside strength hull as a result of damage accumulation in the SFAP blocks units at specified operational loads.

As a result, was found that the apparatus with a depth of operation 1500...2000 m, loses its buoyancy due damage accumulation in the SFAP blocks from 5 to 13 % with a dive time of up to 1000 hours, from 8 to 26 % at 1000 cycles of diving-spill at temperatures air below 0 °C, the thermal conductivity increases with these damages from 0,085 to 0,15 W/(m·°K).

The technique has been developed that allows predicting the loss of buoyancy and the change the thermal insulation properties of SFAP blocks under given operating conditions at the design stage of underwater vehicle.

Modification of buoyancy bloks arrangement units in the manned submersible improved its design, by cladding the strength hull the heat-insulating buoyancy blocks from the SFAP which allowed to increase the autonomy operation the manned submersible in 3 times.

One of the possible directions for further research on the subject of work is the use of heat insulating buoyancy blocks (from composite materials) in the design of manned submersible for operation at depths 2000...5000 m: in the Arctic Ocean regions; in the Atlantic Ocean in the zones of hydrothermal sources.

Practical significance of the results:

- the use of buoyancy blocks in the form of a continuous shell made it possible to obtain an additional function of thermal insulation, to reduce heat losses by 75 %, and to ensure normal habitation conditions within a strength hull;

- additional thermal insulation of the strength hull allowed increasing its survivability to 10...15 hours and reducing the probability of crew death in emergency situations;

- the proposed design of buoyancy blocks with SFAP density of $450...500 \text{ kg/m}^3$ and coefficient of thermal conductivity of $0,085 \text{ W/(m}^\circ\text{K)}$ in the form of outside shell for strength hull ensured a dual operational function - buoyancy and thermal insulation. This was increased the competitiveness of domestic equipment for underwater technical facilities with depth of operation up to 2000 m;

- the possibility of using heat-insulating buoyancy blocks with SFAP in the constructions of devices operating in «hard» climatic conditions during immersions to the depths of the Continental Shelf is proved;

- the proposed algorithm for predicting the life resource of buoyancy blocks with SFAP makes it possible to estimate the loss of buoyancy and the temperature change inside the strength hull of the manned submersible from the initial data: depth, duration of the dive, the number of climatic loads cycles, the permissible level of damage or adjust the residual life of buoyancy blocks in the apparatus as per the log of the loads indicated in the logbook;

- practical application of the results work is reflected in the developed programs-methods of experimental study the characteristics of buoyancy blocks with SFAP, the design methodology of the manned submersible, the enterprise standard on the buoyancy blocks of underwater technical means. The results of the research were used for: the implementation of the State Targeted Defense Program for the

construction of ships of the corvette class in the Smart Maritime Groupe; training specialists of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	19
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1	
ОГЛЯД СТАНУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНИХ РОБІТ З НАПРЯМКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ ЗАСОБІВ.....	30
1.1 Актуальність використання глибоководних населених апаратів.....	30
1.2 Глибоководні водолазні комплекси.....	34
1.3 Умови населеності підводних засобів	35
1.4 Аналіз елементів плавучості підводної техніки	37
1.5 Основні технічні характеристики підводного населеного апарату	43
Висновки за розділом 1	45
РОЗДІЛ 2	
ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ЕМПІРИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ..	46
2.1. Аналіз методів дослідження.....	47
2.2 Планування експерименту.....	49
2.2.1 Планування експерименту з тривалими навантаженнями ...	49
2.2.2 Планування експерименту з кліматичним впливом.....	50
2.3 Статистичний і кореляційний аналіз результатів.....	51
2.4 Теоретичні залежності для побудови математичної і фізичної моделі	52
2.5 Перевірка адекватності розроблених моделей	52
Висновки за розділом 2.....	55
РОЗДІЛ 3	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTІ І ЗМІНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЛОКІВ ПЛАВУЧОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ.....	56

	16
3.1. Виготовлення експериментальних моделей блоків плавучості.....	56
3.2 Визначення початкових характеристик моделей блоків плавучості	57
3.3 Тривалі гідростатичні випробування.....	62
3.3.1 Аналіз результатів	66
3.3.2 Кореляційний аналіз зв'язку між досліджуваними характеристиками.....	68
3.4 Кліматичні випробування.....	69
3.4.1 Аналіз результатів	72
3.5 Дослідницьке обладнання.....	75
Висновки за розділом 3.....	78

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНА ТА ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ І ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В БЛОКАХ ПЛАВУЧОСТІ ЗІ СФЕРОПЛАСТИКА З ДОДАТКОВОЮ ПОРУВАТИСТЮ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ.....	80
4.1 Математична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості при тривалих гідростатичних навантаженнях.....	80
4.2 Математична модель зміни коефіцієнта теплопровідності в блоках плавучості при тривалих гідростатичних навантаженнях.....	83
4.3 Аналіз результатів експериментальних і теоретичних розрахунків ...	85
4.4 Фізична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості на основі теорії дифузії.....	86
4.4.1 Механізм водопоглинання в блоках плавучості.....	87
4.4.2 Порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних результатів.....	92
4.5 Математична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості при кліматичних навантаженнях.....	93
4.5.1 Механізм руйнування блока	93

4.6 Математична модель накопичення пошкоджень при кліматичних навантаженнях.....	96
4.7 Математична модель зміни коефіцієнта теплопровідності в блоках плавучості при кліматичних навантаженнях.....	99
4.8 Кореляційна залежність між математичними моделями накопичення пошкоджень в умовах навантаження	100
4.9 Напружено-деформований стан блоку плавучості, що викликаний кристалізацією поглиненої води.....	102
Висновки за розділом 4	112
РОЗДІЛ 5	
УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВОДНОГО НАСЕЛЕНОГО АПАРАТУ ТИПУ ТЕПЛОІЗОЛЮЮЧИМИ БЛОКАМИ ПЛАВУЧОСТІ	114
5.1 Визначення товщини блоків плавучості для теплоізоляції апарату.....	115
5.1.1 Товщина блоків з умови вільного занурення апарату.....	115
5.1.2 Товщина блоків з умови критичного діаметру ізоляції.....	117
5.1.3 Товщина блоків з умови збереження температури всередині апарату при аваріях.....	119
5.2 Кріплення блоків плавучості на поверхню апарату.....	124
5.3 Прогнозування характеристик блоків плавучості в умовах експлуатації.....	127
5.4 Економічний розрахунок собівартості блоків плавучості	134
5.5 Перспективи подальших досліджень	141
Висновки за розділом 5	142
ВИСНОВКИ	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
Додаток А. «Программа–методика исследовательских испытаний по определению повреждаемости блоков плавучести на основе сферопластика с дополнительной пористостью при длительном нагружении гидростатическим давлением»	163

Додаток Б. «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»	173
Додаток В. «Программа и методика определения температуропроводности опытных образцов легковесомого материала плавучести сферопластика».....	183
Додаток Г. Початкові характеристики моделей блока плавучості до гідростатичних навантажень.....	194
Додаток Д. Характеристики моделей блока плавучості після тривалих гідростатичних навантажень.....	198
Додаток Е. Початкові характеристики моделей блока плавучості до кліматичних навантажень.....	213
Додаток Ж. Результати кліматичних випробувань	217
Додаток И. «Акт метрологической проработки исследовательских испытаний диссертационной работы»	228
Додаток К. «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».	232
Додаток Л. Стандарт підприємства «Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі сферопластика з додатковою закритою поруватістю. Склад і властивості».....	247
Додаток М. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	256
Додаток Н. Список публікацій за темою дисертації.....	259

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

СДП	– сферопластик з додатковою поруватістю
ПНА	– підводний населений апарат
ГВК	– глибоководний водолазний комплекс
ρ_0	– початкова уявна густина сферопластика з додатковою поруватістю, кг/м^3
λ_0	– початковий коефіцієнт теплопровідності блоків зі сферопластика з додатковою поруватістю, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{К)}$
α_0	– початковий коефіцієнт температуропровідності блоків зі сферопластика з додатковою поруватістю, $\text{м}^2/\text{с}$
c_0	– початкова теплоємність блоків зі сферопластика з додатковою поруватістю, $\text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{К)}$
П	– пошкоджуваність блока плавучості
P	– гідростатичний тиск, МПа
$\sigma_{\text{пр}}$	– границі міцності матеріалу блоку плавучості при гідростатичному стисканні, МПа
τ	– час тривалого гідростатичного навантаження, год
m_0	– початкова маса зразка блоку на повітрі до навантаження
m_z	– маса зразка з вантажем у воді до навантаження тиском
m_{zP}	– маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску
$V_{\text{П}}$	– загальний обсяг повітряних включень в матеріалі блока плавучості, м^3
$V_{\text{ДП}}$	– обсяг додаткової поруватості в структурі матеріала блока плавучості, м^3
$V_{\text{ВМС}}$	– обсяг закритої поруватості, що міститься всередині мікросфер матеріала блока плавучості, м^3
N	– кількість циклів кліматичного впливу

τ_k	– час навантаження гідростатичним тиском при кліматичних випробуваннях, год
T	– температура кліматичного впливу, °C
P_0	– нижній рівень пошкоджуваності блоку плавучості
P_{II}	– верхній рівень пошкоджуваності блоку плавучості
D	– коефіцієнт дифузії (масопереносу), м ² /с
J_0, J_1	– функції Бесселя нульового і першого порядку
K	– коефіцієнт кореляції
ε_T	– температурні деформації
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	– радіальне, тангенціальне і осьове напруження, МПа
α	– коефіцієнт лінійного температурного розширення, °C ⁻¹
δ	– товщина блока плавучості, м
K_ε	– критерій теплової активності системи
K_λ	– критерій відносної теплопровідності системи
α_3	– коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні апарату, Вт/(м ² ·°K)
α_v	– коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні апарату, Вт/(м ² ·°K)
θ	– відносна температура внутрішнього простору
$\tau_{ох}$	– час охолодження внутрішнього простору апарату, год
ΔF	– втрата сили плавучості блоків, кН
$T_{кр}$	– критична температура, °C

ВСТУП

Світовий океан займає дві третини поверхні нашої планети, в значній мірі визначає життя мешканців на Землі. Глибоководний світ – це сховище величезної кількості корисних копалин, енергетичних і біологічних ресурсів, і є альтернативним джерелом запасів суші, що виснажуються.

Актуальність теми. На сьогоднішній день Світовий океан є найбагатшим джерелом ресурсів на планеті, його освоєння є актуальним завданням загальнодержавного 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 °C), 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/м^3), 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 $0,035...0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$, 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 $0,13 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$ 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 $0,085 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$), 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 Є. 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 суднових 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 °C).

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 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 Вт/(м·°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 кг/м³ і коефіцієнтом теплопровідності 0,085 Вт/(м·°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. 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: [64] – проведення експериментального дослідження, обробка статистичної бази; [116], [117] – проведення експериментального дослідження, перевірка й коректування отриманих результатів, одержання регресійних залежностей; [104] – обробка статистичної бази; [135] – 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-ій 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.

РОЗДІЛ І

ОГЛЯД СТАНУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНИХ РОБІТ З НАПРЯМКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Актуальність використання глибоководних населених апаратів

З давніх часів люди прагнули проникнути в підводний світ, в історії відомо багато імен підкорювачів морських глибин. Важливим етапом в еволюції розвитку населеної підводної техніки було створення дослідницьких підводних апаратів. Розробником конструкції першого населеного підводного апарату вважається Огюст Пікар, який в 1948 р. спустив на воду апарат FNRS-2 (вагою 200...300 т), що досяг глибини 1400 м.

У 1960 році Жак Пікар і американець Дон Уолт довели можливість занурення людини на великі глибини, досягнувши в модернізованому батискафі «Трієст» глибини 10919 м Маріанської впадини Тихого океану [1]. Занурення, що здійснювалися в ті часи проводилися тільки з науковою метою і носили поодинокий характер.

Інтенсивний розвиток глибоководних технічних засобів розпочався у середині 70-х років ХХ століття, основною причиною чого послужив пошук і видобуток вуглеводневих ресурсів (нафти і газу) на морському континентальному шельфі. Головними завданнями цього періоду було збільшення глибини водолазних занурень до 400...500 м і розвиток глибоководної техніки: суднових водолазних комплексів, керованих і населених підводних апаратів, роботів для проведення підводно-технічних робіт і обслуговування морських нафтогазовидобувних платформ [2–4].

За останні десятиліття технічний прогрес призвів до удосконалення підводної техніки, створення нового модернізованого обладнання для оснащення апаратів, що розширило їх можливості, підвищило технічний рівень та безпеку проведення підводних робіт [5, 6].

На сьогоднішній день серед робіт, які проводяться на глибинах Світового океану, можна виділити наступні: розвідка і розробка мінеральних ресурсів, проведення спеціалізованих досліджень; моніторинг і видобуток морських біологічних ресурсів; розведення і видобуток морепродуктів; будівництво та обслуговування гідротехнічних споруд; підйом затонулих об'єктів, аварійно-рятувальні роботи [7–9] і т.д.

Залежно від мети використання, підводні засоби поділяють на наступні види:

- ненаселені підводні апарати – підводні технічні засоби, управління якими здійснюється з поверхні. Різні за призначенням і конструкцією: прив'язні, що буксируються, телекеровані і автономні [10–12]. Досвід проектування і створення ненаселених підводних апаратів, таких як «Полярна зірка», «Сафокл», «Інспектор», «Дельта-П», «Агент-1» та інші, є у Національного університету кораблебудування ім. адм Макарова (Україна) [13, 14];

- підводні роботи поділяються на дослідні, інспекційні, пошукові, аварійно-рятувальні [15, 16], роботи для видобутку корисних копалин і проведення екологічних заходів [17–19];

- підводні населені апарати (ПНА) – підводні технічні засоби, що дозволяють людині перебувати на борту під час занурень, дають можливість проводити натурні візуальні спостереження і виконувати геофізичні дослідження підводного миру.

Актуальність використання ПНА в дослідженні морських глибин і проведенні аварійно-рятувальних робіт не викликає сумніву [20, 21].

Інститутом океанології ім. П.П. Ширшова АН СРСР з використанням автономних ПНА проведено серію наукових експедицій у Червоному морі, на озері Байкал, а також в різних районах Світового океану. Проведенні дослідження внесли вагомий внесок у розвиток науки про морські глибини [22].

На сьогоднішній день Державному океанаріуму України належать діючі ПНА: «Риф», «Лангуст», «Омар» і «Тетис» (рис.1.1). Апарати цієї серії

працювали в Чорному і Білому морі, здійснюючи різні види робіт, включаючи ліквідацію аварії підводного трубопроводу на Каспійському морі [23, 24].



Рисунок 1.1 – Дослідницькі ПНА [23]

Серед закордонних ПНА широко відомі: «Тинро-2», «Север-2», «Мир 1», «Мир 2», (СРСР), «Элвин», «Алюминаут», «Триест-2» (США), «Архимед» (Франція), «Пайсис» (Канада). За допомогою цих апаратів виконано значну науково-дослідницьку програму в районі Азорських островів, в Атлантичному океані на стиках літосферних плит на глибинах від 2500 до 3000 м.

Серед них слід відзначити заслуги ПНА «Пайсисів» (Канада), яким належить вивчення дна озера Байкал, серія рейсів на Чорному морі з вивченням рифових зон океану, ущелин та кратерів підводних вулканів на глибинах до 2000 м [25–29].

Всесвітньо відомі глибоководні населені апарати третього покоління «Мир 1» і «Мир 2» (рис.1.2) з глибиною занурення 6000 м і більше, мають можливість досліджувати до 98% поверхні дна Світового океану [30, 31]. Їх аналогами серед закордонних глибоководних апаратів з глибиною занурення до 6000 м є ПНА: «Sea Cliff» (США), «Nautile» (Франція) [32].

Крім науково-дослідницької роботи автономні ПНА є головним інструментом системи рятування підводників [33]. В 70-х роках компанією DSRV (США) випущено перші глибоководні рятувальні апарати: «Mystic» і «Avalon». Крім науково-дослідницької роботи автономні ПНА є головним

інструментом системи рятування підводників [33]. В 70-х роках компанією DSRV (США) випущено перші глибоководні рятувальні апарати: «Mystic» і «Avalon». Поштовхом стала загибель атомного підводного човна «Thresher» (1963 р.).



а)



б)

а) – «Мир» [30]; б) – «Nautilus» [32]

Рисунок 1.2 – Дослідницькі глибоководні ПНА

Надалі рятувальні ПНА побудовано в Великобританії, Германії, Швеції, Італії, Китаї, Японії та Росії. Серед них слід відзначити: апарат проекту 18270 «Бестер» (Росія) (рис.1.3, а) та «Немо» (рис.1.3, б.) [34, 35].



а)



б)

а) – «Бестер»; б) – «Немо» [34]

Рисунок 1.3 – Автономні рятувальні ПНА

1.2 Глибоководні водолазні комплекси

Незважаючи на успіхи і популярність ПНА, обійтися без використання водолазної праці при проведенні аварійно-рятувальних робіт [36–38], будівництві та обслуговуванні підводних споруд на сьогоднішній день неможливо [39–41].

Засоби транспортування водолазів до підводного об'єкту і назад, в залежності від робочої глибини занурення поділяються:

- водолазні альтанки або «мокрый» колокол (напівколокол) для середніх глибин 12...60 м;
- «сухий» колокол – невід'ємна частина глибоководного водолазного комплексу (ГВК) для глибин понад 60 м (рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Рятувальний водолазний колокол [40]

За методами проведення підводних робіт ГВК поділяться на дві групи:

- ГВК, що забезпечують короточасні разові спуски водолазів;
- ГВК, що забезпечують тривале багатодобове перебування водолазів під тиском в середовищі штучних дихальних сумішей.

Комплекси можуть бути пересувними (у вигляді окремих блоків, що розміщуються в тому чи іншому порядку на судно-носії або платформі) і стаціонарними (вбудованими в корпус судна-носія) [42–44].

Глибоководний водолазний колокол має сферичну або циліндричну форму. Перевага віддається сферичній формі, так як вона має більшу міцність у порівнянні з циліндричною при рівних товщинах стінки і внутрішніх об'ємах.

Підтримання всередині колоколу нормального атмосферного тиску дозволяє, додатково, використовувати його в якості спостережної камери при дослідженнях морів і океанів [45, 46].

Досвід зі створення ГВК у вітчизняного виробництва невеликий. Міннефтегазпромом СРСР ГВК створювалися в одиничних екземплярах, серед яких «Акванавт-300» для судна «Свіяга» з робочою глибиною занурення 300 м та ГВК для суден «Алагез» і «Ельбрус» з глибиною занурення –250 м.

До того ж вітчизняні ГВК у порівнянні із зарубіжними аналогами мали ряд недоліків: більшу вагу (у 1,5...2 рази), великі габарити пультів управління, арматури, приладів та інше [37, 47].

На сьогоднішній день компанії, що займаються проектуванням і будівництвом ГВК, а також обладнанням для нього є: ЦКБ «Лазурит» (м. Санкт-Петербург, Росія [48]), «Три Х. дайвінг компані» (Норвегія), «С. Ж-Доріс», (Франція), «Caley Ocean Systems» (Великобританія, рис.1.6, а), «Draegar» (Німеччина).

Компанія «Draegar» випустила ряд ГВК, серед яких колокол «САБК» (рис.1.6, б), що додатково поєднує в собі функцію палубної декомпресійної камери, а також колокол, що розрахований на 12 водолазів для глибини занурення до 400 м [49, 50].

1.3 Умови населеності підводних засобів

Однією з основних вимог до перебування людини всередині ПНА і ГВК є підтримання нормальних мікрокліматичних умов: температури повітря в межах

15 ... 25°C при відносній вологості 40...60 % [25, 51, 52]. Дані умови забезпечуються системами вентиляції і регенерації повітря, робота яких здійснюється за рахунок акумуляторних батарей, безпосередньо розташованих на борту. Суднові водолазні комплекси, як стаціонарні, так і пересувні, як правило, не мають власного джерела електроенергії і живляться від бортової мережі судна-носія.

Специфіка роботи екіпажу ПНА і ГВК полягає в зануренні у невідоме середовище, де часто має місце аварійна чи близька до неї ситуація, зумовлена технічними несправностями, підводними стихіями або іншими чинниками [53, 54].

Аварійні ситуації на борту неодноразово мали місце при проведенні підводних робіт у Північному морі, а також у водах Атлантичного океану. Тривале перебування екіпажу в холодному середовищі, до 10 годин і більше, становить небезпеку для здоров'я і життя людини [52].



а)



б)

а) – компанії «Caley Ocean Systems»; б) –компанії «Draegar» [49, 50]

Рисунок 1.6 – Водолазні колоколи

Одним із шляхів вирішення проблеми збереження нормальних умов мікроклімату всередині ПНА і ГВК є зовнішнє облицювання конструкції міцного корпусу блоками плавучості з теплоізолюючими властивостями.

1.4 Аналіз елементів плавучості підводної техніки

В конструкції підводної техніки важливим елементом є блоки плавучості, що забезпечують силу підтримання та остійність апарату, надають можливість маневрувати в підводних шарах океану.

У ПНА, що працюють на середніх і великих глибинах, міцному корпусу не вистачає плавучості і для врівноваження маси апарату цей недолік компенсують шляхом розміщення блоків плавучості за бортом у вигляді поплавців. Як закладні елементи плавучості, блоки розміщують у вільних місцях конструкції ПНА, тому конфігурація і розміри блоків найрізноманітніші. Прикладом є ненаселений апарат «Аргобуй» (рис.1.7) з блоками плавучості, що виготовлений в Національному університеті кораблебудування [13], апарат «Атлеш» та апарат «Скарус» [55].



Рисунок 1.7 – Підводний апарат «Аргобуй» з закладними блоками плавучості зі сферопластика (на передньому плані) [13]

Інший варіант розміщення блоків – всередині, між міцним та легким корпусом (ПНА «Мир 1» та ПНА «Бестер» [30, 33]), а також як заповнювач тришарових конструкцій.

Запропонована конструкція блоків плавучості у вигляді суцільного облицювання (шкарлупи) зовнішньої поверхні міцного корпусу апарату, окрім збільшення сили підтримання, одночасно теплоізолює міцний корпус, що

дозволить зберегти тепло всередині апарату під час тривалих занурень на глибини та при аварійних ситуаціях, в разі знеструмлення на борту, що підвищить рівень безпеки екіпажу.

Традиційно, в якості теплоізоляції використовуються блоки з пінополіуретанів (рис.1.8) (коефіцієнт теплопровідності $\lambda=0,02...0,05$ Вт/(м·°K)), пінополістиролу ПС-4 (коефіцієнт теплопровідності $\lambda=0,03...0,04$ Вт/(м·°K)) та інших видів пінопластів. Однак, дані блоки мають низький показник співвідношення між гідростатичною міцністю і густиною матеріалу, обмежені за глибиною занурення до 150 м, мають невеликий термін експлуатації (до 5 років), а також горючі та токсичні [56].

Блоки плавучості на основі піноскла, які також затребувані в конструкціях глибоководних засобів і добре працюють в зонах гідротермальних джерел з температурою експлуатації до 400 °С, мають високе водопоглинання в режимі циклічних занурень-вспливань, а отже – низькі теплоізоляційні показники [55].



Рисунок 1.8 – Водолазний колокол компанії Trelleborg-offshore з теплоізолюючими блоками на основі пінополіуретану [50]

Блоки плавучості на основі синтактичного піноскла (зі спечених скляних мікросфер), використовуються як теплоізолятори (коефіцієнт теплопровідності становить $0,035...0,04$ Вт/(м·°K)) на суднах для перевезення гарячих наливних

вантажів, однак мають значну відкриту поруватість (до 25 %), та, як наслідок, високе водопоглинання, що обмежує глибину експлуатації до 100...200 м [57].

На сьогоднішній день, в конструкціях глибоководних апаратів користуються широким попитом блоки плавучості зі сферопластика (syntactic foam, рис.1.9) густиною $600\ldots650 \text{ кг/м}^3$ з глибиною експлуатації 6000 м. Блоки зі сферопластика добре працюють в режимі циклічних занурень-спливань, мають низьке водопоглинання і тривалий термін експлуатації, однак, як теплоізолятор, сферопластик не ефективний, має достатньо високе значення коефіцієнта теплопровідності $0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$ [58–62].



Рисунок 1.9 – Елемент блока плавучості зі сферопластика «Syntactic foam» [58]

Для надання додаткової плавучості підводному засобу і теплоізоляції міцного корпусу перспективними є блоки плавучості зі СДП густиною $450\ldots 500 \text{ кг/м}^3$ з коефіцієнтом теплопровідності $0,085 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$.

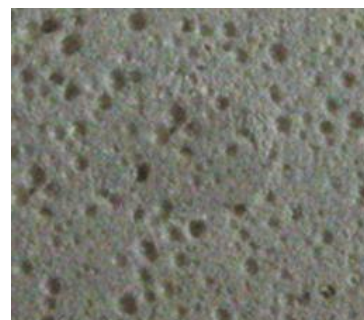
Блоки зі СДП представляють собою полімерну матрицю, що регулярно заповнена порожнистими скляними мікросферами сферичної форми діаметром від 5 до 200 мкм і повітряними порами розміром від 3...5 мм, які додатково введені в основу способом вакуумування або за рахунок перемішування у лопатевих змішувачах (рис.1.10, а). В якості матриці використовуються: фенольна, поліефірна та інші різновиди полімерних смол, але найчастіше – епоксидна смола [58, 63–65].

Наявність в матеріалі блоку плавучості повітряних пор (рис.1.10, б) знижує густину сферопластика до $450\ldots500 \text{ кг/м}^3$, що з одного боку – збільшує

плавучість підводного засобу, з іншого – обмежує глибину експлуатації до 1500...2000 м, але при цьому забезпечує високі теплоізоляційні властивості.



а)



б)

а) – елемент блока; б) – поверхня блока при збільшенні $\times 5$

Рисунок 1.10 – Елемент блока плавучості зі СДП

На сьогоднішній день виробництвом блоків плавучості зі сферопластика займаються: НУК (Україна), «Аквансинт» НТЦ ім. В.А. Телегіна (Росія), «ФГУП» «ВИАМ» (Росія), «ЗМ Со» (USA), CRP GROUP LTD (USA) [66–68].

Фізико-механічні характеристики блоків зі СДП густиною 450...500 кг/м³ виробництва Національного університету кораблебудування наведено в табл. 1.1.

Представлені характеристики міцності блоків зі СДП свідчать про широкі можливості їх застосування в якості елементів плавучості в конструкціях глибоководних апаратів, що експлуатуються під водою в умовах складного навантаження.

Питанням руйнування блоків з традиційного сферопластика 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 Є. Т., Головченко Ю. Б., Копійка С. В. та інші [58, 69–73].

Досліджуванню пошкоджуваності блоків плавучості зі сферопластика (syntactic foam) густиною 600...650 кг/м³ під дією гідростатичних навантажень присвячена велика кількість наукових робіт.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні характеристики блоків зі СДП густиною 450...500 кг/м³ [63, 64]

Характеристика	Одиниця вимірювання	Значення
Густина	кг/м ³	450 ... 500
Руйнівний гідростатичний тиск при короткочасному навантаженні	МПа	37 ... 40
Міцність при стисканні	МПа	39
Модуль пружності	МПа	1800
Коефіцієнт поперечної деформації (Пуассона)		0,3
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м·°К)	0,085

В роботах [73, 74] проведено аналіз впливу тривалого гідростатичного навантаження на фізико-механічні характеристики блоків плавучості зі сферопластика. Представлені в [58, 75] дослідження моделей блоків плавучості при довготривалій дії гідростатичного тиску дають можливість співставити результати роботи для перевірки моделі прогнозування пошкоджуваності блоку плавучості.

Експериментальне дослідження впливу експлуатаційних факторів, таких як глибина та тривалість занурення, на експлуатаційні характеристики блоків плавучості, як: гідростатична міцність, густина матеріалу, водопоглинання розглянуто в [58, 76]. В роботі [58] виявлено, що пошкоджуваність сферопластика найбільш точно апроксимується логістичною залежністю, це представляє інтерес при побудові моделі накопичення пошкоджень.

Представлені в [77–79] експериментальні дослідження експлуатаційних властивостей сферопластиків розширюють базу обґрунтування вибору рівня гідростатичного навантаження. Питання прогнозування гідростатичної міцності, водопоглинання і ресурсу роботи блоків плавучості з урахуванням геометричних та фізичних характеристик складових компонентів сферопластика (мікросфер та зв'язуючого) розглядаються в роботах [58, 80].

Дослідження механізму руйнування мікросфер сферопластика з урахуванням властивостей компонентів матеріалу блоку на мікрорівні розглянуто в [69, 81]. Аналіз руйнування сферопластика під впливом статичних та динамічних навантажень представлено в [82–84].

Теплоізоляційні властивості блоків зі сферопластика в залежності від виду мікросфер (скляні, вуглецеві, керамічні), їх розміру та кількісного вмісту у матеріалі блоку теоретично розглянуто та експериментально досліджено в роботах [85–87].

З проведеного аналізу літератури можна зробити висновок, що науково-дослідні роботи попередників були спрямовані на вивчення пошкоджуваності блоків плавучості з традиційного сферопластика (syntactic foam) в експлуатаційних умовах з метою подальшого прогнозування ефективного ресурсу роботи блоків в конструкції глибоководної техніки. Розглянуті теоретичні та експериментальні розробки представляють інтерес і є підґрунтям дисертації.

Слід зазначити, що блоки плавучості зі СДП з подвійною функцією плавучості і теплоізоляції міцного корпусу використовуються вперше, і дослідження впливу накопичених в процесі експлуатації пошкоджень на теплоізолюючі властивості блоків раніше не виконувалися.

Не розглядалися і умови експлуатації блоків плавучості при послідовній дії факторів – повторно статичного навантаження гідростатичним тиском з подальшим впливом температур нижче за 0 °С, з можливим фазовим переходом води, накопиченої у блоках при підйомі апарату на поверхню з низькими температурами повітря.

Відсутні в літературі і методи прогнозування теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП, а також методика оцінки терміну служби блоків 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.

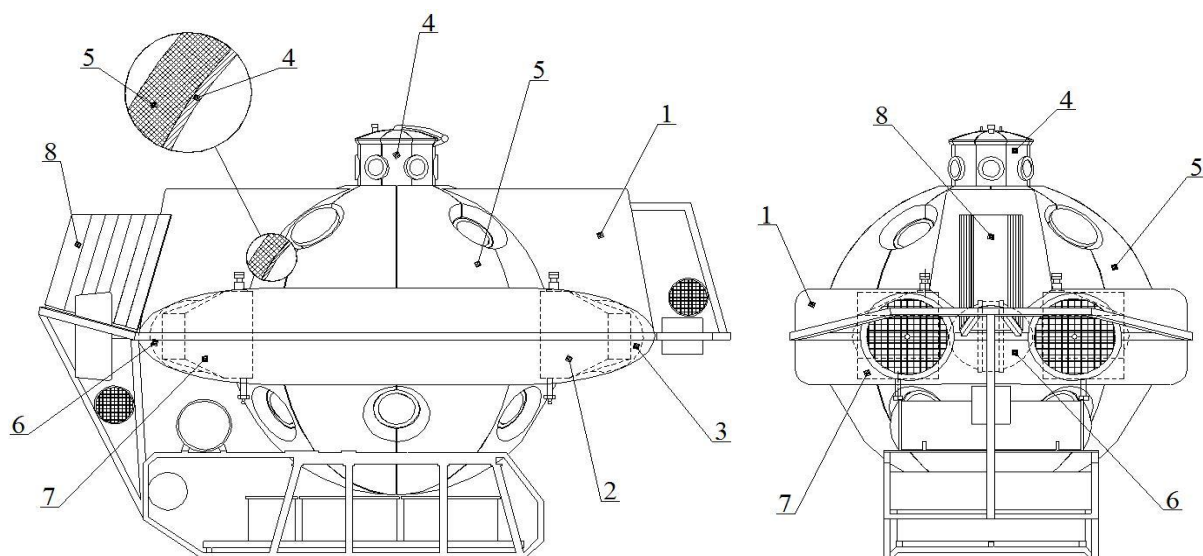
1.5 Основні технічні характеристики підводного населеного апарату

За проведеним літературним аналізом експлуатації ПНА з урахуванням вимог до умов мікроклімату всередині засобу [25, 50], запропоновано удосконалити конструкцію ПНА шляхом заміни частини основних блоків плавучості на блоки у вигляді суцільної шкарлупи зі СДП густиною $450 \dots 500 \text{ кг/м}^3$ і коефіцієнтом теплопровідності $0,085 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$, що зовні облицьовують міцний корпус. Таке конструктивне рішення забезпечуватиме подвійну експлуатаційну функцію – силу плавучості та теплоізоляцію міцному корпусу ПНА, що призведе до економії енергетичних ресурсів на опалення та підвищить рівень безпеки екіпажу в аварійних ситуаціях.

Удосконалення конструкції апарату з позиції теплозахисту розглянуто на прикладі типової конструкції ПНА зі сферичним міцним корпусом (рис.1.11) для глибин занурення $1500 \dots 2000 \text{ м}$. Технічні характеристики апарату представлено в табл. 1.2., складові компоненти для отримання блоку зі СДП наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ПНА зі сферичним міцним корпусом [88]

Технічна характеристика апарату	Одиниця вимірювання	Числове значення
Довжина	м	5
Ширина	м	3
Діаметр зовнішній	м	2,5
Маса	кг	10 000
Екіпаж	люди	3



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1) – гідродинамічний обтікач; | 2) – носова баластна цистерна; |
| 3) – носова диферентуюча цистерна; | 4) – міцний корпус; |
| 5) – теплоізолюючі блоки СДП; | 6) – кормова диферентуюча система; |
| 7) – кормова баластна цистерна; | 8) – блоки сферопластика |

Рисунок 1.11 – Типова конструкція ПНА зі сферичним міцним корпусом

Таблиця 1.3 – Компоненти СДП, що використовуються для виготовлення блоку плавучості

Складова частина	Характеристика
Мікросфери	МСО – 119 група А-2
Смола	Епоксидна ЕД – 20
Твердник	«Діамет Х»

Висновки за розділом 1

Після проведеного аналізу актуальності застосування ПНА і конструкцій плавучості для них, в дисертаційній роботі ставляться наступні завдання:

- враховуючі тенденції в розвитку підводних технічних засобів необхідно вибрати та обґрунтувати напрямки удосконалення конструкції блоків плавучості зі СДП для ПНА з метою забезпечення теплоізоляції міцного корпусу при тривалій роботі на глибинах 1500...2000 м і можливості підйому на борт судна-носія в умовах низьких температур повітря;

- для перевірки можливості використання блоків плавучості в конструкції ПНА при глибоководному режимі та при надводному режимі з низькими температурами виникає необхідність експериментально дослідити механізми руйнування і накопичення пошкоджень блоків при різних рівнях гідростатичного тиску і цикло-гідростатичних навантаженнях, виявити вплив цих пошкоджень на теплозахисні властивості блоків;

- для встановлення ефективного ресурсу роботи блоків зі СДП будь-якої форми та розміру, як теплоізолюючих та плавучих елементів в конструкції ПНА, необхідно за проведеними дослідженнями обґрунтувати фізичну і розробити математичні моделі прогнозування накопичення пошкоджуваності в блоках, зміни теплоізоляційних властивостей в умовах експлуатації;

- для отримання можливості прогнозування втрати сили плавучості ПНА і температурного режиму всередині житлового відсіку за встановленим обсягом накопичених пошкоджень в блоках зі СДП при заданих умовах експлуатації або для корегування остаточного ресурсу роботи блоків в складі апарату за фіксованою у судновому журналі передісторією навантаження, виникає необхідність удосконалити методику проектування ПНА;

- розробити стандарт підприємства на блоки плавучості підводних технічних засобів на основі СДП.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ЕМПІРИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Теплоізоляційні властивості блоків плавучості визначаються додатковою поруватістю, що введена в сферопластик на стадії виготовлення. В процесі експлуатації в складі стаціонарних глибоководних об'єктів блоки плавучості піддаються впливу тривалого гідростатичного навантаження, дія якого супроводжується накопиченням пошкоджень, поступовим руйнуванням повітряних комірок і проникненням води всередину блоку через його поверхню.

За рахунок накопичених пошкоджень зменшується початкова сила підтримання блоків, що необхідно враховувати при проектуванні баластної системи всього ПНА. В свою чергу, проникнення води в блок, з урахуванням її високої теплопровідності (приблизно в 25 разів більше ніж у повітря [89]), викликає істотне підвищення коефіцієнта теплопровідності СДП, що погіршує теплозахисні властивості блоків.

Кількісне значення пошкоджень оцінюється як відношення об'єму води, що проникла в матеріал блоку за рахунок руйнування повітряних пор і скляних мікросфер при гідростатичному стисканні, до загального об'єму повітря в СДП.

Експлуатація блоків плавучості зі СДП в складі підводних технічних засобів, що працюють в районах з температурою повітря нижче 0 °С, передбачає вплив на блок як циклічного перепаду тиску, при зануреннях-підйомах, так і циклічного температурного впливу при спливанні на поверхню. Вода, що проникла під впливом гідростатичного тиску в теплоізолюючий блок, при підйомі глибоководного засобу на поверхню при морозі, кристалізується, збільшуючись у об'ємі і переходить у лід. У стінках пор блоку виникають розтягуючі напруження, що призводять до появи тріщин, які

розповсюджуються в товщу СДП, збільшують вільну поверхню блоку доступну для подальшого водопоглинання. Наступні цикли перепаду тиску і температури сприяють збільшенню обсягів пошкоджень і, як результат, більш інтенсивному руйнуванню блоків зі СДП і зниженню їх плавучих і теплоізолюючих властивостей.

Отже, основними характеристиками, що необхідно дослідити у роботі є пошкоджуваність та пов'язана з нею зміна теплоізолюючих властивостей блоків плавучості зі СДП при експлуатаційних навантаженнях, а саме при дії тривалого гідростатичного тиску і цикло-гідростатичного впливу з урахуванням кліматичних факторів.

Досягнення поставленої мети досліджень можливе з використанням різних напрямків та методів.

2.1 Аналіз методів дослідження

Найбільшу надійність результатів дають безпосередні фізичні дослідження із застосуванням теоретичних та практичних інструментів таких, як теорія пружності, пластичності, теорія теплопровідності. Цей шлях передбачає використання ускладненого математичного апарату з громіздкими диференціальними рівняннями. Гетерогенність СДП, що обумовлена наявністю повітряних пор і скляних мікросфер, невизначеністю у формі і розмірі частинок, різноманітністю способів контактування мікросфер між собою, робить процес масотеплопереносу в твердих тілах складним, що значно ускладнює математичний опис і теоретичний аналіз [90]. Отже, застосування теорії теплопереносу для визначення коефіцієнту теплопровідності блоків зі СДП в умовах експлуатації є складною задачею.

Розроблені статистичні моделі [58, 70] накопичення пошкоджень при статичній дії гідростатичного навантаження на блоки плавучості з традиційного сферопластика (Syntactic foam) обмежуються прогнозуванням для великих глибин експлуатації (від 6000 до 12000 м), відсутністю врахування впливу

цикло-гідростатичних навантажень і фазового переходу води при замерзанні. Дані статистичні моделі ґрунтуються на припущенні про регулярну пошарову будову комірчастої структури композиту (з кубічним пакуванням) і добре описують поведінку сферопластика, що складається з сполучника і впорядковано розташованих мікросфер [58]. Однак, для теплоізоляції міцного корпусу апарата заплановано використати блоки зі СДП, що мають неупорядковану, хаотичну структуру з повітряними мікро- і макропорами розміром до 3...5 мм, що не дозволить спрогнозувати пошкоджуваність за вище вказаними моделями.

Емпіричний підхід потребує часу, матеріальних затрат та зусиль для проведення експериментів, однак цей шлях дозволяє отримувати значення досліджуваних характеристик з достатньо високою надійністю.

До можливих варіантів методів дослідження можна віднести *MQ*-плани, що дозволяють отримати найбільш точні результати для побудови математичної моделі. *MQ*-плани – інформативні, економічні, з точки зору використання матеріалів, надають статистичну інформацію у вигляді графіків. Однак, *MQ*-плани застосовуються для дослідження систем, властивості яких залежать тільки від співвідношення компонентів [91, 92], що робить їх використання неможливим для досягнення поставленої мети.

З позиції планування та обробки результатів дослідів перспективним є методи на базі Латинського квадрату. Перевагами цих методів є: можливість дослідження якісних факторів впливу, відсутність необхідності паралельних (повторних) дослідів, зменшення кількості експериментальних позицій. Результати, що отримані за Латинськими квадратами – насичені, дають можливість отримати велику кількість оцінок, яка більша ніж кількість експериментальних точок у досліді. Не зважаючи на переваги, Латинські квадрати мають низьку надійність прогнозування, через це є нерентабельними.

Реалізація повно факторного експерименту (ПФЕ), який застосовується до експериментів з кількісним характером факторів, що описують технологічні параметри об'єкту чи параметри складу речовини, також, в даному випадку

неможливо. Крім того ПФЕ, порівняно з іншими методами, потребує більшої кількості експериментів для досягнення поставленої мети [92, 93].

В дисертаційній роботі досліджуються моделі блоку плавучості зі СДП густиною $450 \dots 500 \text{ кг/м}^3$, що виготовлені в Національному університеті кораблебудування ім.Макарова. З урахуванням обмеженості у варіюванні складовими компонентами блоку та їх співвідношенням, а також технологічними параметрами виготовлення блоку, планування експерименту і вибір методів дослідження потребує особливого підходу.

2.2. Планування експерименту

2.2.1 Планування експерименту з тривалими навантаженнями

Для стаціонарного режиму роботи ПНА при зануреннях на глибину основним фактором впливу на блоки зі СДП є рівень гідростатичного тиску та тривалість його впливу.

Отже, планування експерименту передбачає варіювання рівнем гідростатичного тиску і вибір їх допустимих значень. При цьому необхідно також враховувати тривалість експерименту. Дослідження в [73] показали, що перші години навантаження тиском супроводжуються різким зростанням водопоглинання, яке з часом стабілізується. Тому час експерименту не повинен бути обмеженим, і, в той же час, недовгим (не більше місяця). В [73] показано, що при навантаженні блоку гідростатичним тиском на базі 400 годин накопичується достатній обсяг пошкоджень для розробки моделей пошкоджуваності у часі. Відповідно до [94], процес накопичення обсягів пошкоджень йде по експоненціальному закону, тому для рівномірного розташування експериментальних точок, шкалу часу експлуатаційного навантаження необхідно обрати у логарифмічних координатах.

Проведені в [73, 77] дослідження показали, що при рівнях тиску $0,5 \dots 0,6$ від границі міцності матеріалу блоку при гідростатичному стисканні ($\sigma_{\text{пр}}$)

накопичення пошкоджень досить мале, вода поглинається полімерною матрицею за рахунок набухання. З урахуванням цього, рівень гідростатичного тиску необхідно брати у діапазоні $(0,5 \dots 0,9)\sigma_{\text{пр}}$ для отримання достатнього статистичного матеріалу для побудови математичних моделей накопичення пошкоджуваності.

2.2.2 Планування експерименту з кліматичним впливом

Кліматичні випробування притаманні для циклічного занурення апарату та спливання на поверхню в умовах температур повітря нижче за 0°C . Отже, організація експериментальних робіт для випробування моделей теплоізолюючих блоків зі СДП передбачає вибір, окрім рівня гідростатичного тиску та тривалості його дії, значення температури і часу заморожування на повітрі та відтаювання води, що проникла до блоку зі СДП.

Вибір рівня навантаження обумовлений тим, що гідростатичний тиск за один цикл не повинен зруйнувати структуру зразка теплоізолюючого блоку, створити в ньому достатній обсяг пошкоджень, і, в той же час, повинен відповідати рівню навантаження СДП в умовах його експлуатації. Проведені дослідження [75] показують, що при циклічні гідростатичні навантаження сферопластика в умовах нормальних температур на базі $3 \cdot 10^4$ циклів (норма для підводних човнів) практично не викликають помітних пошкоджень (водопоглинання) від впливу циклічності навантажень, що пояснюється ефектом Кайзера та відсутністю ефекту втомлюваності на цій малій базі [58]. Отже, вплив гідростатичного тиску при циклічних навантаженнях не є вагомим фактором, в порівнянні з температурним. З роботи [68] відомо, що накопичення пошкоджень відбувається в початковий момент впливу тиску, тому тривалість навантаження не повина бути довгою.

Згідно з [95, 96] матеріали, що добре чинять опір послідовному заморожуванню і відтаванню, повинні витримувати не менше 100 циклів такого впливу при збереженні своїх експлуатаційних властивостей на необхідному

рівні. Руйнування СДП при кліматичних випробуваннях очікується більш інтенсивним, ніж при тривалих навантаженнях. Тому, при кліматичних випробуваннях рівень гідростатичного тиску вибирається у діапазоні $(0,5 \dots 0,7)\sigma_{\text{пр}}$, а кількість циклів навантаження зменшується до 60.

Температура і тривалість відтаювання води повинні обиратися виходячі з умови повного відтаювання води.

Відповідно до висунутих вимог, розроблено програми методики проведення експериментальних досліджень з визначення пошкоджуваності блоків зі СДП при тривалому навантаженні гідростатичним тиском (Додаток А) і при циклічній дії гідростатичного тиску води та її переході в кристалічний стан при замерзанні. Вказані дослідження в подальшому названо «кліматичні» випробування (Додаток Б).

2.3 Статистичний і кореляційний аналіз результатів

Статистичними методами обробки результатів експериментів встановлюється достовірність отриманих результатів досліджень.

Серед статистичних оцінок використовуються: математичне очікування та дисперсія, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації.

Наявність грубих помилок у результатах проведених експериментів, перевіряється за критерієм Груббса. Грубі помилки вилучаються, дослід повторюється [92, 97, 98].

Встановлення залежності між випадковими величинами пошкоджуваності і зміною теплоізоляційних властивостей блоку зі СДП при експлуатаційних навантаженнях здійснюється з використанням методів кореляційного аналізу [97, 99]. Обчислюється лінійний коефіцієнт кореляції (коефіцієнт Пірсона) за формулою:

$$K = \frac{\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (2.1)$$

де $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X$ – середнє значення виборки першого масиву;

$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y$ – середнє значення виборки другого масиву.

2.4 Теоретичні залежності для побудови математичної і фізичної моделі

Використання механіки суцільного твердого середовища при побудові математичної моделі накопичення пошкоджень в блоках зі СДП ускладнено у зв'язку з гетерогенною структурою матеріалу і потребує розглядання механізмів руйнування композитних матеріалів із застосуванням теорії в'язкопружності. Серед моделей, що більш точно описують деформацію і руйнування полімерів (до яких відноситься сполучник СДП – епоксидна смола) є пружне середовище Юнга, текуче середовище Ньютона, твердо-в'язке середовище Кельвіна та пружньо-в'язке середовище Максвелу. Всі ці моделі, кожне в своєму випадку, об'єднує узагальнене лінійне середовище, що містить елементи усіх вищезгаданих середовищ деформування і його постулати використовуються для побудови математичної моделі накопичення пошкоджень [100].

В процесі навантаження блоку плавучості гідростатичним тиском, вода проникає до блоку через поверхню внаслідок руйнування, в першу чергу, повітряних пор, а потім скляних мікросфер. Процес водопоглинання можна розглядати як процес заміщення в окремих порах молекул повітря молекулами води. При цьому, між водопоглинанням і дифузією атомів і молекул в матеріалах простежується ряд аналогій [101], що можуть стати передумовою для побудови фізичної моделі пошкоджуваності (водопоглинання) СДП.

2.5 Перевірка адекватності розроблених моделей

Оцінка відповідності отриманих значень пошкоджуваності за розробленою математичною моделлю накопичення пошкоджуваності в блоках зі СДП нормальному закону розподілу виконується за критерієм χ^2 , згідно з

методикою викладеною в [98, 102]. Даний метод оцінки статистичних характеристик за всією сукупністю експериментальних точок дозволяє звужити довірчий інтервал і отримати більш точні імовірнісні оцінки досліджуваної величини.

Адекватність математичної моделі за дисперсією перевіряється за критерієм Фішера:

$$F_{\text{спос}} = \frac{S^2(\theta)}{S^2(\theta_{\text{ек}})}, \quad (2.2)$$

де $S^2(\theta) = \frac{1}{z-l} \sum_{i,j,k} \theta_{i,j,k}^2$ – дисперсія моделі;

$S^2(\theta_{\text{ек}}) = \frac{1}{z-m} \sum_{i,j,k} \left(\frac{\Pi_{i,j,k} - \bar{\Pi}_{i,j}}{\bar{\Pi}_{i,j}} \right)^2$ – дисперсія досліду;

l – кількість параметрів у моделі;

z – кількість дослідних значень;

$m = i \times j$ (i – кількість рівнів гідростатичного тиску, j – кількість точок

тривалості дії навантаження).

Структурнологічна схема дисертаційної роботи щодо удосконалення конструкції ПНА теплоізуючими блоками плавучості зі СДП з урахуванням наведених вище положень, представлена на рис. 2.1.

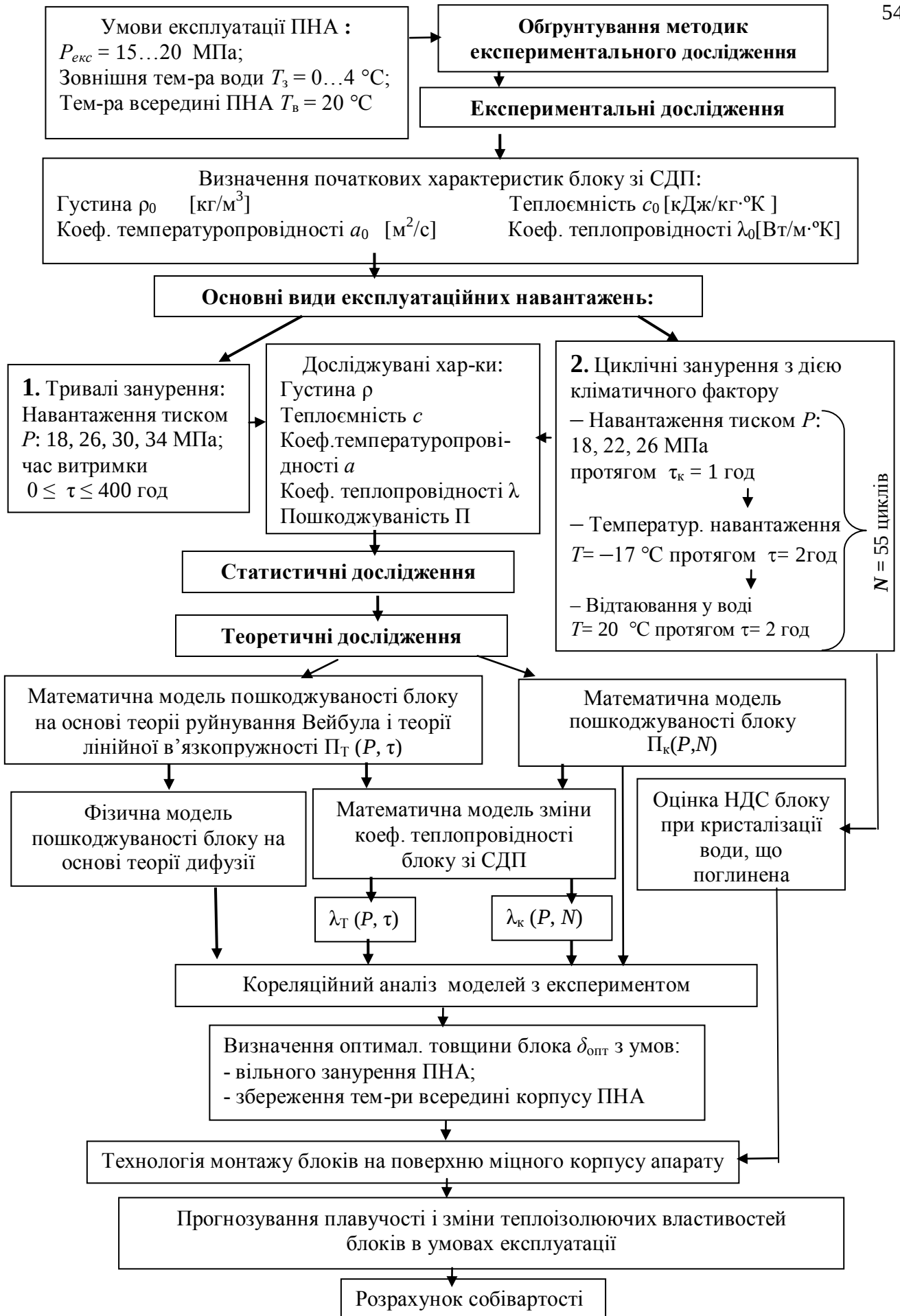


Рисунок 2.1 – Структурнологічна схема дисертаційної роботи

Висновки за розділом 2

1. Вирішення завдань дисертаційної роботи потребує раціонального підходу при плануванні факторного експерименту для дослідження процесів накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнту теплопровідності в блоках плавучості зі СДП в експлуатаційних умовах з урахуванням обмеженості у варіюванні складовими компонентами, їх кількісного співвідношення, технологічними параметрами виготовлення блоку.

2. Достовірність отриманих результатів досліджень перевіряється методами статистичної обробки результатів.

3. Визначення зв'язку між пошкоджуваністю і зміною теплоізоляційних властивостей блоку зі СДП здійснюється з використанням кореляційного аналізу.

3. Розроблення математичної моделі накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП потребує враховування механізмів і моделей руйнування композитних матеріалів із застосування теорії лінійної в'язкопружності.

4. Розроблено структурологічну схему дисертаційної роботи для чіткого висвітлення необхідності проведення експериментальних і теоретичних досліджень.

Основні наукові результати розділу опубліковано у [64, 103, 104].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTІ І ЗМІНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЛОКІВ ПЛАВУЧOSTІ ПРИ ЕКСПЛУАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

3.1. Виготовлення експериментальних моделей блоків плавучості

Експериментальні дослідження проводилися на моделях блоку плавучості на основі СДП. Блок плавучості виготовлений методом спінування в вакуумі спеціально підготовленої композиції зі скляних мікросфер і епоксидного сполучника. Дані компоненти бралися в певній пропорції для отримання необхідної густини блоку (табл. 3.1.), поміщалися в лопатевий змішувач. Шляхом варіювання швидкості обертання лопатей і тривалості перемішування забезпечувалася однорідність композиції, необхідна кількість повітряних включень, їх розміри.

Підготовлена суміш заливалася у форму розміром $200 \times 200 \times 400$ мм, яка встановлювалася у вакуумну камеру, де при температурі $T_{\text{отв}} = 60 \dots 65$ °C відбувалося отвердіння. При дії вакууму повітряні включення в композиції збільшувалися в розмірах, композиція спінувалася, що забезпечувало зниження густини. Форма витримувалася в камері до повної полімеризації сполучника.

Блок виймався з форми, піддавався механічній обробці, розрізався на шари товщиною 25 мм за висотою блоку. У кожному шарі зрізався пристінний матеріал з метою отримання заготовки з однорідними властивостями за густиною і поруватістю.

В подальшому, за допомогою токарної обробки виточувалися моделі-зразки циліндричної форми з радіусом $R = 10$ мм і довжиною $L = 100$ мм. Форма експериментальної моделі обрана у вигляді довгого циліндра, так як проста у виготовленні, дає невелику кількість відходів при виточуванні зразків,

і, з урахуванням підібраних розмірів ($\frac{L}{R} \geq 10$), може розглядатися як необмежений довгий циліндр за [89].

Таблиця 3.1 – Склад теплоізолюючого блоку зі СДП

	Склад компонентів	Співвідношення компонентів за об'ємом, %
Основа СДП	Епоксидна смола ЕД-20, Твердник – «Диамет Х»	70...75
	Скляні мікросфери марки МСО – 119 група А-2	
Повітряні включення		25...30

Отримані моделі маркувалися, вимірювалися для перевірки точності геометричних розмірів. Методом гідростатичного зважування в дистильованій воді, згідно [105], визначалась густина моделей блоку. Метод ґрунтується на визначенні густини вираженої через відношення маси моделі у сухому стані до загального об'єму, включаючи об'єм пор та інших несучільностей, які створюються на поверхні зразка при виготовленні. Моделі блоків, виготовлені за даною технологією, мали густину $480 \pm 10 \text{ кг/м}^3$. Результати розрахунків густини представлено в Додатку Г.

3.2 Визначення початкових характеристик моделей блоків плавучості

На першому етапі проведення експериментальних досліджень встановлено початкові теплофізичні властивості моделей блоку зі СДП в умовах ідентичних до умов експлуатації, тобто у водному середовищі.

Визначення коефіцієнта температуропровідності СДП здійснювалося методом регулярного режиму за розробленою методикою, яку представлено в Додатку В.

Метод регулярного режиму вирізняється простотою вимірювального обладнання для проведення досліду і дозволяє за відносно невеликий проміжок часу встановити вимірювану величину – темп нагрівання [106, 107].

Згідно з методикою, для закладення термопари вздовж осі циліндричних зразків висвердлювався центральний отвір діаметром $0,1 \cdot 2R$ для забезпечення похибки вимірювань не більше 1 % за рекомендацією [108]. Всередині отвору за всією довжиною зразка укладалася хромель-копелева термопара з довжиною вивідних кінців $l \approx 200 \dots 250$ мм. Отвір герметизувався заливочним компаундом – рідким сферопластиком, що за складом і властивостями ідентичний до скаладу експериментальних моделей. Партія моделей теплоізолюючого блоку зі СДП представлена на рис.3.1., вигляд перерізу експериментального зразка з встановленою всередині хромель-копелевою термопарою зображено на рис.3.2.

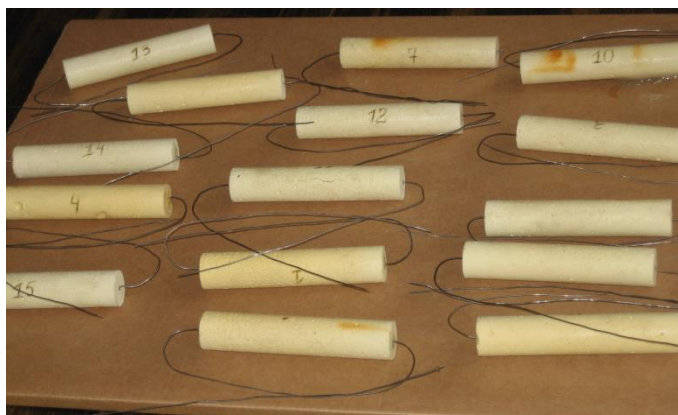
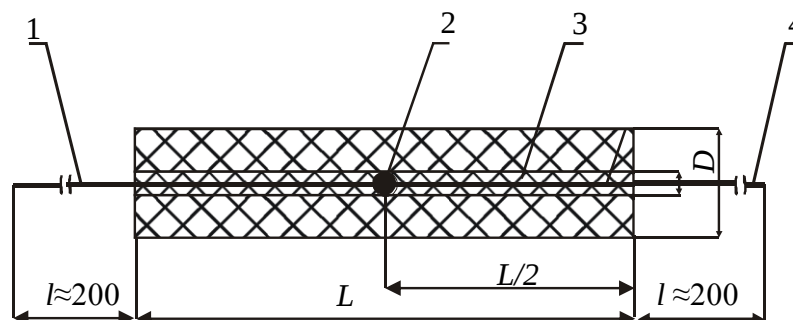


Рисунок 3.1 – Партія експериментальних моделей теплоізолюючого блоку зі СДП

Відповідно до програми-методики з визначення коефіцієнта температуропровідності проводилися наступні операції:

- фіксувалася початкова температура зразка за показаннями потенціометру;
- зразок занурювався в термостат з дистильованою водою з температурою $T_{\text{ж}} = 80 \pm 0,5$ °C. В термостаті підтримувався стабільний температурний режим;
- вмикався секундомір відліку часу τ_a ;

– фіксувався час τ_{ai} , за який температура зразка T_i збільшувалася на $2,5^\circ\text{C}$ за шкалою потенціометра;



- 1) – вивідний кінець термопар (хромель);
- 2) – спай термопар;
- 3) – компаунд (рідкий сферопластик);
- 4) – вивідний кінець термопар (копель)

Рисунок 3.2 – Переріз експериментального зразка моделі теплоізолюючого блоку зі СДП

– випробування проводилися до прогріву центральної зони зразка до температури 75°C ;

– за результатами зміни температури всередині зразка від температури навколишнього середовища $T_{\text{ж}}$ в зафіксований час τ_{ai} , будувався графік залежності в напівлогарифмічних координатах: $\ln V_i - f(\tau_{ai})$, де $\ln V_i = \ln |T_{\text{ж}} - T_i|$. Схематично вигляд графіку представлено на рис.3.3.

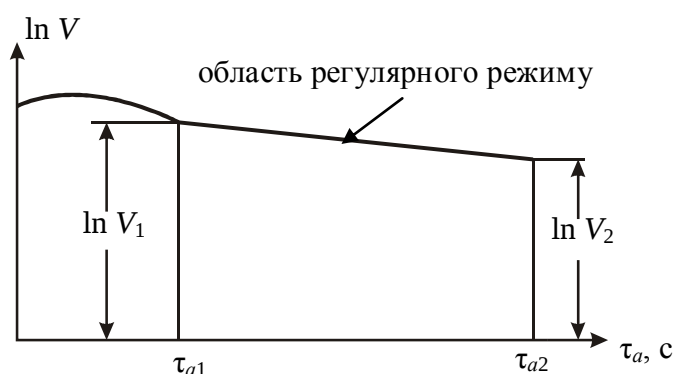


Рисунок 3.3 – Залежність зміни температури всередині моделі блоку від часу

– візуально визначалась прямолінійна ділянка, кутовий коефіцієнт якої, визначає темп нагрівання m , що розраховувався за формулою:

$$m_{\infty} = \frac{\ln V_1 - \ln V_2}{\tau_{a2} - \tau_{a1}}. \quad (3.1)$$

Коефіцієнт температуропровідності знаходиться з рівняння [89]:

$$a = k \cdot m_{\infty}, \quad (3.2)$$

де k – коефіцієнт форми, м^2 .

Коефіцієнт форми для необмеженого (довгого) циліндра обчислюється за виразом [89]:

$$k = \left[\left(\frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (3.3)$$

де R, L – відповідно радіус і довжина циліндричної моделі блоку, м.

Коефіцієнт форми для експериментальних моделей блоку зі СДП в середньому становить $k = 1,70 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Для перевірки значення коефіцієнта температуропровідності моделей блоку зі СДП, що отримано експериментальним шляхом, виконано оціночний розрахунок ефективного коефіцієнта температуропровідності за кількістю складових компонентів сферопластика (табл.3.1) та їх характеристиками згідно [109–111].

Розрахунок показав, що діапазон експериментальних значень співпадає з границями теоретичних оцінок. Верхня границя значення становить $a = 2,22 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а нижня – $a = 1,24 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, що свідчить про достовірність отриманих експериментальних результатів.

Питома теплоємність моделей блоку зі СДП визначається розрахунковим шляхом виходячи з адитивності за формулою [109, 110]:

$$c = \sum_{i=1}^n c_i \cdot m_i / \sum_{i=1}^n m_i, \quad (3.4)$$

де c_i – питома теплоємність компонентів, що входять до складу блоку зі СДП (скляні мікросфери, сполучник, повітря), $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{К})$;

m_i – маса складових компонентів, відповідно кг;

n – кількість компонентів.

Теплофізичні властивості компонентів, що використовуються для виготовлення теплоізоляційного блоку зі СДП, представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Теплофізичні властивості компонентів теплоізолюючого блоку зі СДП [112, 113]

Властивості	Мікросфері скляні марки МСО–119 група А–2	Епоксидний сполучник ЕД – 20
Густина ρ , кг/м ³	285	1150
Теплоємність c , кДж/(кг·°К)	0,67	1,5

Слід зазначити, що маса повітряних включень дуже мала в порівнянні з масою інших компонентів, тому на результат обчислень не впливала, і при розрахунках не враховувалася.

Значення коефіцієнта теплопровідності моделей блоку зі СДП знаходилась за формулою [114]:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho. \quad (3.5)$$

Початкові теплофізичні характеристики моделей теплоізолюючого блоку зі СДП у воді представлено в Додатку Г. Отримані результати оброблено за допомогою методів математичної статистики [97, 98] і осереднені результати початкових теплофізичних характеристик партії моделей блоку представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Середні значення початкових теплофізичних характеристик моделей блоку зі СДП у воді до тривалих гідростатичних навантажень

Характеристики	Одиниця вимірювання	Значення
Уявна густина, ρ_0	кг/м ³	480
Коефіцієнт температуропровідності, $a_0 \cdot 10^7$	м ² /с	1,40
Теплоємність, c_0	кДж/(кг·°К)	1,28
Коефіцієнт теплопровідності, λ_0	Вт/(м·°К)	0,085

3.3 Тривалі гідростатичні випробування

Експериментальні дослідження накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП при тривалих гідростатичних навантаженнях проводились за розробленою програмою-методикою (Додаток А).

Відповідно до розробленої методики, вибрано 4 рівня тиску, що становлять 0,5; 0,7; 0,8; 0,9 від умовної границі міцності матеріалу блоку зі СДП при гідростатичному стисканні – $\sigma_{пр}$.

З метою визначення умовної границі міцності $\sigma_{пр}$ блоків зі СДП, проведено попередній експеримент. У гідростатичній камері зразки циліндричної форми діаметром $d = 20$ мм і довжиною $l = 20$ мм поступово навантажувалися гідростатичним тиском з кроком 2 МПа і швидкістю зростання тиску не більше 0,1 МПа/с.

На кожній ступені навантаження зразок зважувався, визначалась кількість води, що проникла до матеріалу. Тиск, при якому приріст водопоглинання мав максимальне значення, становив $\sigma_{пр} = 37$ МПа, і був прийнятий за умовну границю гідростатичної міцності СДП. Відповідно, рівні гідростатичного навантаження склали: $P = 18, 26, 30$ і 34 МПа. Згідно з методикою, для кожного рівня навантаження використовувалось 5 моделей блоку.

Час витримки зразків під тиском обрано у логарифмічних координатах $\tau_i = e^i$ ($i=0,5; 1, 2 \dots n$) чи $e^{0,5}=1,64$; $e^1=2,72$; $e^2=7,4$; $e^3=20,1$; $e^4=54,6$; $e^5=148,25$; $e^6=403,4$ години для кожного рівня навантаження P .

Згідно з методикою, для кожного рівня навантаження тиском використовувалось 5 зразків блоку. Зразки занурювалися в гідростатичну камеру, наповнену дистильованою водою з температурою $20 \pm 2^\circ\text{C}$, і витримувалися при заданому рівні тиску P протягом зазначеного часу τ . Тиск в камері підтримувався автоматично з точністю ± 1 МПа.

В кожній експериментальній точці за шкалою часу витримки τ_i проводилися наступні операції:

– зразки виймалися з камери і зважувалися на лабораторних вагах у дистильованій воді (зважування здійснювалося на аналітичних вагах з точністю 0,01 г);

– розраховувалася кількість води, що проникла у зразок за формулою:

$$\Delta m_i = m_z - m_{zp}, \quad (3.6)$$

де m_z – маса зразка з вантажем у воді до навантаження тиском, кг;

m_{zp} – маса зразка з вантажем у воді після дії тиску, кг.

– визначався коефіцієнт температуропровідності a_i пошкодженого зразка, згідно програми-методики (Додаток В);

– розраховувалася густина ρ_i пошкодженого зразка за формулою:

$$\rho = \frac{m_0 + \Delta m_i}{V_0} = \frac{m_0}{V_0} + \frac{\Delta m_i}{V_0} = \rho_0 + \frac{\Delta m_i}{V_0}, \quad (3.7)$$

де $V_0 = \frac{m_0 - (m_z - m_{zp})}{\rho_0}$ – гідростатичний об'єм зразка, м^3 ;

m_0 – маса зразка на повітрі до пошкодження, г;

m_{zp} – маса вантажу у воді, г;

$\rho_0=1000$ кг/м^3 – густина дистильованої води [105].

– теплоємність пошкодженого зразка c_i знаходилась за формулою сумішей [109, 111]:

$$c_i = \frac{c_{\text{СТ}} \cdot m_{\text{СТ}} + c_{\text{СВ}} \cdot m_{\text{СВ}} + c_{\text{В}} \cdot \Delta m_i}{m_{\text{СТ}} + m_{\text{СВ}} + \Delta m_i}, \quad (3.8)$$

де $c_{\text{СТ}}$, $c_{\text{СВ}}$, $c_{\text{В}}$ – теплоємність скляних мікросфер, сполучника і води, що проникла до зразка блоку, відповідно, Дж/(кг·°K);

$m_{\text{СТ}}$, $m_{\text{СВ}}$, Δm_i – маса скляних мікросфер, сполучника і води, що проникла до зразка блоку, відповідно, кг;

– коефіцієнт теплопровідності λ_i визначався зі співвідношення:

$$\lambda_i = a_i \cdot c_i \cdot \rho_i. \quad (3.9)$$

– пошкоджуваність зразка блоку Π_i розраховувалась за формулою:

$$\Pi_i = \frac{\Delta m_i}{\rho_{\text{В}} \cdot V_{\Pi}} \cdot 100\%, \quad (3.10)$$

де V_{Π} – загальний обсяг повітряних включень, що міститься у зразку блоку зі СДП, м³.

При визначенні обсягу повітряних включень, що міститься у зразку блоку зі СДП, враховується обсяг закритих повітряних пор (додаткова поруватість) – $V_{\text{ДП}}$ і обсяг закритої поруватості, що міститься всередині мікросфер – $V_{\text{ВМС}}$.

Отже, обсяг повітряних включень зразка становить:

$$V_{\Pi} = V_{\text{ДП}} + V_{\text{ВМС}}. \quad (3.11)$$

Обсяг закритої поруватості, що міститься всередині мікросфер визначається як:

$$V_{\text{ВМС}} = (1 - v) \cdot V_0 \cdot \chi - \frac{m_{\text{СТ}}}{\rho_{\text{СТ}}}, \quad (3.12)$$

де $v = 0,3$ – коефіцієнт поруватості, що характеризує відносний обсяг пор, який вводиться в основу СДП при виготовленні;

$\chi = 0,603$ – коефіцієнт заповнення СДП мікросферами [63];

$m_{\text{ст}}$ – маса скла, кг;

$\rho_{\text{ст}}$ – густина скла, з якого виготовлені мікросфери, кг/м^3 .

Маса скла розраховується за формулою:

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{МК}} \cdot (1 - \nu) \cdot V_0 \cdot \chi, \quad (3.13)$$

де $\rho_{\text{МК}}$ – густина мікросфер, кг/м^3 .

Густина мікросфер визначалася згідно способу викладеному в [58].

Обсяг, що займають додаткові включення визначається як:

$$V_{\text{ДП}} = V_0 \cdot \nu. \quad (3.14)$$

Питома частка повітряних пор в моделі блоку зі СДП з урахуванням (3.12) і (3.14) становить:

$$\eta = \frac{V_{\text{П}}}{V_0} = 0,67. \quad (3.15)$$

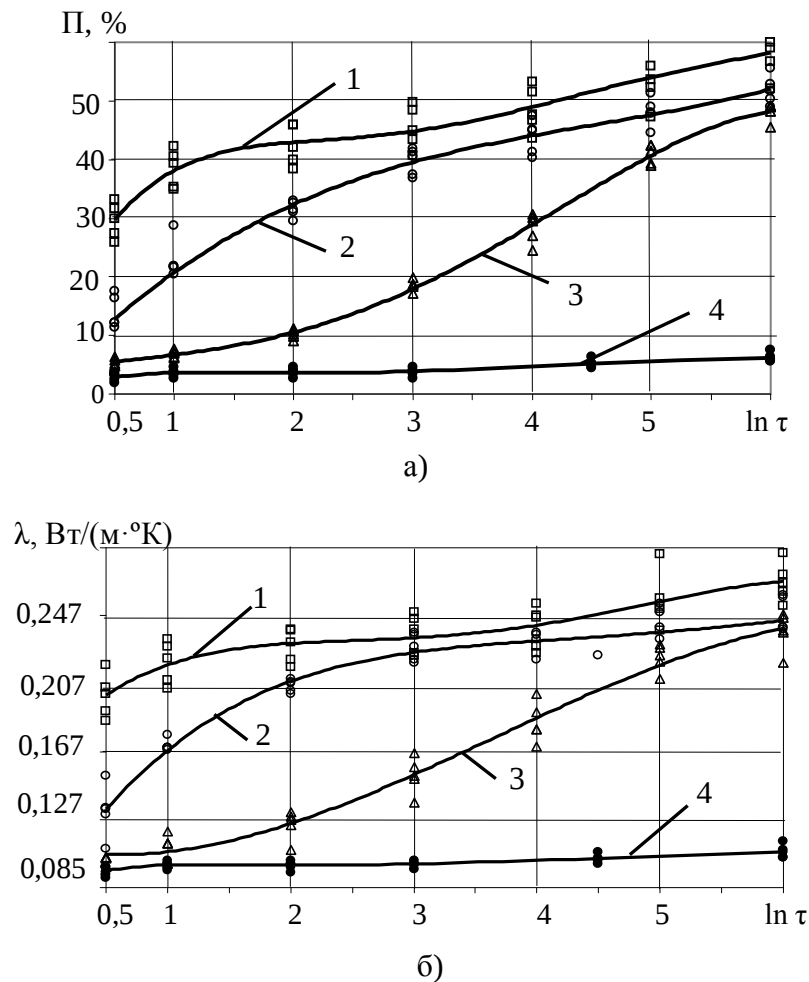
Підстановка (3.14) і (3.12) в (3.10) дає формулу для знаходження пошкоджуваності блоків зі СДП:

$$\Pi_i = \frac{\Delta m_i}{\rho_{\text{с}} \cdot \left[(1 - \nu) \cdot V_0 \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{МК}}}{\rho_{\text{ст}}} \right) + V_0 \cdot \nu \right]}. \quad (3.16)$$

Результати дослідів з навантаження партії зразків тиском $P = 18, 26, 30$ і 34 МПа в кожній експериментальній точці за шкалою часу витримки τ_i представлено в Додатку Д. Результати оброблено за допомогою методів математичної статистики, вилучено грубі помилки за допомогою критерію Груббса з рівнем значущості 0,05 за [92, 97, 98], і осереднені значення густини, коефіцієнту температуропровідності, теплоємності, коефіцієнту теплопровідності і пошкоджуваності для кожного рівня гідростатичного тиску P представлені у Додатку Д.

3.3.1 Аналіз результатів

Аналіз результатів дослідження накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнту теплопровідності в блоках зі СДП представлено на рис.3.4 у вигляді сімейства кривих за середніми значеннями $\Pi(\ln\tau)$ і $\lambda(\ln\tau)$ в напівлогарифмічних координатах для різних рівнів тиску.



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

Рисунок 3.4 – Накопичення пошкоджень (а) і зміна коефіцієнту теплопровідності (б) в моделях блоку зі СДП від тривалості навантаження τ гідростатичним тиском P

Отримані дані пошкоджуваності підтверджують [115], що при високих рівнях тиску 30 МПа і 34 МПа ($0,8\sigma_{\text{пр}}$ і $0,9\sigma_{\text{пр}}$), перші часи навантаження $0 < \tau \leq e^2 \approx 7$ годин супроводжуються інтенсивним руйнуванням повітряних порожнин мікроструктури моделей блоку в поверхневому шарі. Обсяг пошкоджень

наближається до 30...40 % відповідно, що викликає значне зростання коефіцієнту теплопровідності з 0,085 до 0,21...0,23 Вт/(м·°K) (рис.3.4, б).

На базі випробувань $e^4 < \tau \leq e^6 \approx 400$ годин інтенсивність накопичення пошкоджень знижується, при цьому руйнуються практично всі повітряні включення всередині матеріалу, і пошкоджуваність досягає 60 %, коефіцієнт теплопровідності зростає до 0,27 Вт/(м·°K).

Під впливом нижчого рівня тиску 26 МПа ($0,7\sigma_{\text{пр}}$) інтенсивність процесу накопичення пошкоджень практично постійна за відносно довгий проміжок часу $0 < \tau \leq e^4 \approx 55$ годин. Теплопровідність на даній ділянці зростає поступово до 0,180 Вт/(м·°K). Збільшення часу витримки під тиском обумовлює розвиток процесу руйнування елементів мікроструктури з зовнішньої поверхні вглиб матеріалу блоку, що призводить до 50 % пошкоджуваності і збільшення теплопровідності до 0,23 Вт/(м·°K).

Накопичення пошкоджень при невеликому рівні тиску 18 МПа ($0,5\sigma_{\text{пр}}$) незначне і за весь час випробувань становить близько 6 % при значенні коефіцієнту теплопровідності 0,108 Вт/(м·°K).

В результаті експериментів встановлено, що при $\Pi=30\%$ відбувається значне збільшення густини (з 450 до 650...700 кг/м³), тобто руйнується весь об'єм додаткової поруватості, що ведено в блоки зі СДП при виготовленні. При даному рівні пошкоджень блоки зі СДП створюють силу підтримання аналогічну до сили, що створюють блоки зі звичайного синтактика. Крім того, втрачаються теплоізолюючі властивості СДП (коефіцієнт теплопровідності збільшується від $\lambda=0,085$ до $\lambda=0,2$ Вт/(м·°K). Отже, рівень пошкоджуваності $\Pi_{\text{кр}}=30\%$ для блоків зі СДП прийнято за критичний.

3.3.2 Кореляційний аналіз зв'язку між досліджуваними характеристиками

Аналіз отриманих кривих накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнта теплопровідності (рис.3.4) показав, що графіки візуально подібні, тому, представляє інтерес встановити взаємозв'язок між ними і визначити параметри, що безпосередньо впливають на зміну теплозахисних властивостей блоку зі СДП.

Враховуючи, що густина експериментального зразка після кожного часу навантаження тиском розраховувалася за формулою (3.6), а теплоємність за формулою (3.7), вираз для знаходження коефіцієнта теплопровідності (3.8) набуде вигляду:

$$\lambda_i = a_i \cdot \frac{c_{ст} \cdot m_{ст} + c_{св} \cdot m_{св} + c_{\epsilon} \cdot \Delta m_i}{V_0}. \quad (3.17)$$

Маса скла розраховується за (3.13), маса сполучника – за формулою:

$$m_{св} = \rho_{св}(1 - v) V_0 (1 - \chi). \quad (3.18)$$

Масу води Δm_i , що проникла у зразок через пошкоджуваність можна представити, з урахуванням (3.16), формулою:

$$\Delta m_i = \Pi_i \cdot \rho_{\epsilon} \cdot V_0 \left[(1 - v) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{МК}}{\rho_{ст}} \right) + v \right]. \quad (3.19)$$

В результаті підстановки (3.18) і (3.19) в (3.17) отримуємо вираз, що зв'язує теплопровідність із пошкоджуваністю:

$$\begin{aligned} \lambda_i = a_i & \left(c_{ст} \cdot \rho_{МК} (1 - v) \chi + c_{св} \cdot \rho_{св} \cdot v (1 - \chi) + \right. \\ & \left. + c_{\epsilon} \cdot \Pi_i \cdot \rho_{\epsilon} \left[(1 - v) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{МК}}{\rho_{ст}} \right) + v \right] \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Застосувавши позначення:

$$A_{ТВ} = c_{ст} \rho_{МК} (1 - v) \chi + c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot v (1 - \chi),$$

$$B_v = c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \left((1-v) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{MK}}{\rho_{CT}} \right) + v \right), \quad (3.21)$$

отримуємо:

$$\lambda_i = a_i (A_{TB} + B_v \Pi_i) \quad (3.22)$$

Встановлена, згідно [98], функціональна залежність між експериментальними значеннями λ і Π та Π і a показала, що найбільш тісний зв'язок простежується між теплопровідністю і пошкоджуваністю. Отримане значення коефіцієнта Пірсона склало $K=0,984$, тобто теплопровідність в більшій мірі залежить від обсягу накопичених пошкоджень у матеріалі блоку.

Отже, встановлення математична закономірність накопичення обсягів пошкоджень в залежності від глибини і часу занурення блоків дозволить оцінити зміну їх теплоізоляційних характеристик.

3.4 Кліматичні випробування

Факторами впливу при кліматичних випробуваннях є: рівень гідростатичного тиску P , температура заморожування T , кількість повторно кліматичних навантажень N . Функція відгуку – пошкоджуваність і коефіцієнт теплопровідності.

Відомо з [95, 96], що матеріали, які добре працюють в режимі заморожування–відтаювання повинні витримувати не менше 100 циклів такого впливу при збереженні своїх експлуатаційних властивостей. Експериментальні дослідження тривалих навантажень моделей блоку зі СДП показали, що критичний рівень пошкоджуваності $\Pi_{KP}=30\%$ досягається за 100 годин навантаження тиском порядку 24...26 МПа. У той же час, при рівні тиску 18 МПа пошкоджуваність за 100 годин склала близько 5 %. Передбачається, що руйнування СДП при кліматичних випробуваннях буде більш інтенсивним ніж при тривалих гідростатичних навантаженнях, отже верхню границю рівня тиску

слід зменшити, нижню залишити на тому ж рівні, а кількість циклів навантаження знизити до 60 циклів.

Виходячи з цього, за розробленою програмою методикою (Додаток Б), вибрано 3 рівні гідростатичного тиску $P = 18, 22, \text{ і } 26 \text{ МПа}$, які складають $0,5; 0,6; 0,7$ від $\sigma_{\text{пр}}$. Ці рівні тиску дозволять накопичити достатній рівень пошкоджуваності і отримати необхідний статистичний матеріал для побудови математичних моделей накопичення обсягів пошкоджень і зміни коефіцієнту теплопровідності в блоках зі СДП.

Час навантаження гідростатичним тиском прийнято $\tau_k = 1$ год.

Температура і тривалість заморожування зразків визначалася експериментальним шляхом. У циліндричному зразку зі СДП радіусом $R = 10 \text{ мм}$ і довжиною $L = 100 \text{ мм}$ (відповідає формі експериментальної моделі блоку) до середини довжини просвердлено осьовий отвір діаметром 2 мм , який наполовину заповнювався водою. Зовні отвір теплоізолювався пінопластовим ущільнювачем. Зразок у вертикальному положенні встановлювався у морозильну камеру, де витримувався до повного замерзання води. Експеримент показав, що при температурі $T = -15 \dots -17 \text{ }^\circ\text{C}$ за час $1,5 \dots 2$ години, вода повністю кристалізується. Виходячи з цього, час перебування моделей блоку у морозильній камері при температурі $T = -17 \text{ }^\circ\text{C}$ прийнято 2 години.

Кліматичні випробування, як і тривалі гідростатичні навантаження, проводились на моделях блоку циліндричної форми довжиною $L = 100 \text{ мм}$ і радіусом $R = 10 \text{ мм}$, що виточувались з блоку зі СДП. У середині зразка встановлювалася хромель-копелева термопара. Для кожного рівня гідростатичного тиску використовувалася партія моделей блоку у кількості 5 шт.

Перед початком кліматичних випробувань визначено уявну густину моделей блоку зі СДП методом гідростатичного зважування за [105], результати представлено в Додатку Е. Встановлено початкові теплофізичні характеристики моделей блоку (згідно послідовності дій, що зазначено у п.3.2). Результати представлено у Додатку Е, осереднені значення початкових теплофізичних характеристик для усієї партії моделей блоку наведено у табл. 3.4.

За програмою методикою проведення «кліматичних» випробувань 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 .

Таблиця 3.4 – Середні значення початкових теплофізичних характеристик моделей блоку зі СДП у воді до проведення «кліматичних» випробувань

Характеристики	Одиниця вимірювання	Значення
Уявна густина, ρ_0	кг/м ³	480
Коефіцієнт температуропровідності, $a_0 \cdot 10^7$	м ² /с	1,39
Теплоємність, c_0	кДж/(кг·°K)	1,28
Коефіцієнт теплопровідності, λ_0	Вт/(м·°K)	0,085

За один цикл навантаження N з моделями блоку проводились наступні операції:

- моделі блоку поміщалися у випробувальну камеру високого тиску, наповнену дистильованою водою, і витримувалися при заданому рівні навантаження P протягом часу $\tau_k=1$ година;

- моделі виймалися з камери і встановлювалися в камеру холоду, де заморожувалися при температурі $T = -17 \pm 2^\circ\text{C}$ впродовж 2 годин;

- моделі виймалися з камери холоду і поміщалися в ємність з дистильованою водою з температурою $20 \pm 2^\circ\text{C}$, в якій відтаювали протягом 2 годин;

- моделі зважувалися, визначалася маса води, що проникла в матеріал за формулою (3.6);

- визначався коефіцієнт температуропровідності a_i пошкодженого зразка згідно програми – методики (Додаток В);

- розраховувалася густина ρ_i пошкодженого зразка за формулою (3.7);

- визначалася теплоємність c_i пошкодженого зразка за формулою (3.8);

- коефіцієнт теплопровідності λ_i знаходився зі співвідношення (3.9);
- розраховувалася пошкоджуваність зразка Π_i за формулою (3.10).

Дані операції проводилися після кожного повторного циклу кліматичного впливу для зазначених рівнів тиску $P = 18, 22$ і 26 МПа. Результати «кліматичних» випробувань представлено у Додатку Ж.

Статистична обробка експериментальних даних здійснювалася за [97] після кожного N циклу навантаження. Результати представлено у Додатку Ж.

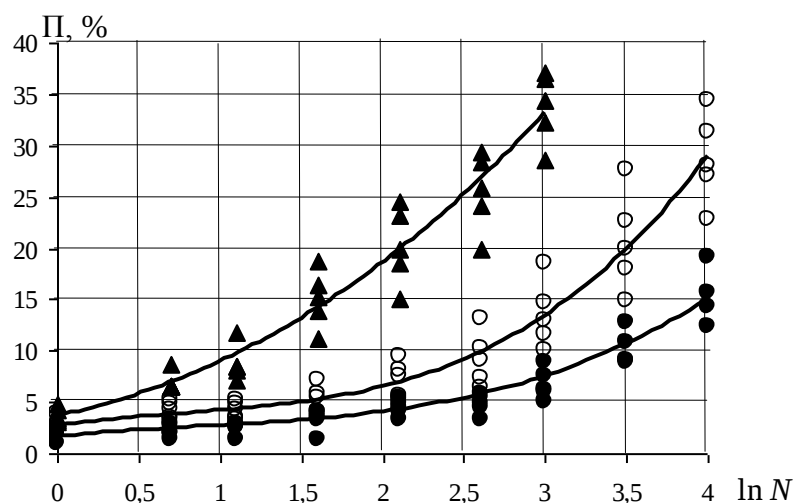
3.4.1 Аналіз результатів

За результатами експерименту побудовано графіки накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнта теплопровідності в моделях теплоізолюючого блоку зі СДП (рис. 3.5). Аналіз результатів випробувань показує, що при малих циклах кліматичного впливу $N = 2$ циклу ($\ln N = 0,5$) для всіх рівнів гідростатичного тиску процес накопичення пошкоджень в моделях відбувається аналогічно до випробувань з тривалим гідростатичним навантаженням, і значно не впливає на зміну коефіцієнта теплопровідності СДП.

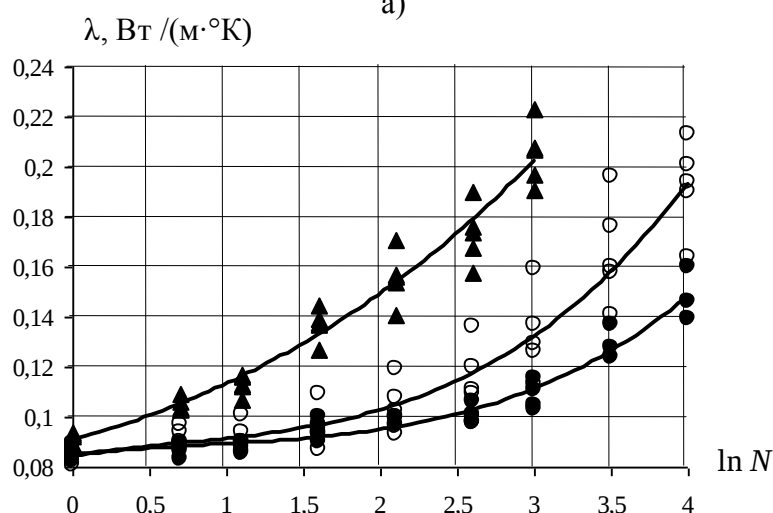
Співставлення експериментальних результатів, отриманих при тривалому навантаженні гідростатичним тиском $P = 18$ МПа і 22 МПа впродовж $\tau = 13$ годин ($\ln \tau = 2,5$) показує, що при пошкоджуваність становить 3,5 і 12 % відповідно. При складному кліматичному навантаженні для аналогічної витримки $N = 13$ циклів ($\ln N = 2,5$) і рівнів тиску, пошкоджуваність досягла 5,1 і 9,5 %, що більше приблизно в 1,3 рази. Зростання пошкоджуваності при кліматичних навантаженнях призвело до зміни коефіцієнта теплопровідності від 0,085 до 0,10 та 0,117 Вт/(м·°К) для зазначених рівнів тиску відповідно.

Зі збільшенням часу навантаження до $\tau = 55$ годин ($\ln \tau = 4$) тривалим гідростатичним тиском $P = 18$ МПа, обсяг накопичених пошкоджень склав 6 %. При складному кліматичному навантаженні при тому ж рівні тиску і $N = 55$ циклів ($\ln N = 4$) – досяг 14 %, що перевищує обсяг пошкоджень у 2,3 рази.

Різкий стрибок у пошкоджуваності СДП зумовив зростання коефіцієнта теплопровідності до $0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{К})$.



а)



б)

● – 18 МПа; ○ – 22 МПа; ▲ – 26 МПа

Рисунок 3.5 – Залежність пошкоджуваності Π (а) та зміни коефіцієнту теплопровідності (б) в блоці зі СДП від кількості циклів кліматичного навантаження N при рівнях тиску P

При навантаженні гідростатичним тиском $P = 26 \text{ МПа}$ впродовж $\tau = 21$ години ($\ln \tau \approx 3,1$) призводить до 18 % пошкоджуваності моделей блоку, при кліматичних випробуваннях до 33 % при аналогічному рівні тиску і часі впливу $N = 21$ цикл ($\ln N \approx 3,1$), що перевищує обсяг пошкоджень у 1,8 рази.

Кліматичні випробування при рівні тиску $P = 26 \text{ МПа}$ припинено на $N = 21$ циклі, зразками досягнуто обсяг пошкоджень 33 %, коефіцієнт

теплопровідності при цьому досяг $0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$, густина зросла до 700 кг/м^3 . Даний рівень пошкоджень $P_{\text{кр}} \approx 30 \%$ прийнято за критичний, так як відповідає обсягу додаткової поруватості веденої в основу СДП при виготовленні. Заповнення всіх повітряних пор водою, призводить до того, що блоки зі СДП набувають властивостей блоків зі звичайного синтактика і втрачають свої теплоізолюючі характеристики.

Порівняння результатів свідчить про те, що при однаковому сумарному часі витримки та тиску, рівень пошкоджуваності блоку при кліматичних випробуваннях у 2 рази вище, ніж при тривалих навантаженнях.

Між експериментальними значеннями пошкоджуваності і теплопровідністю знайдено коефіцієнт кореляції за формулою Пірсона [98], який склав $K(\lambda; \Pi) = 0,983$, що підтверджує наявність значного взаємозв'язку між даними характеристиками.

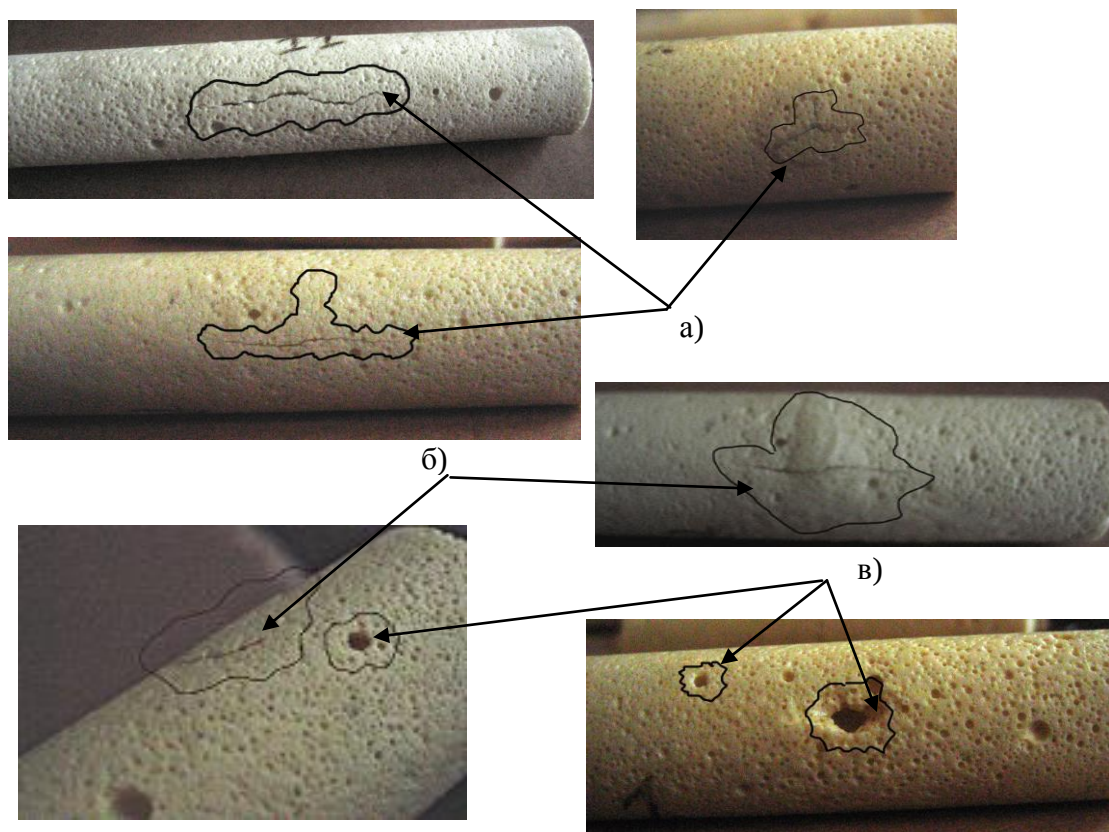
На момент завершення експерименту на поверхні моделей утворилися видимі дефекти. Заморожування води у відкритих порах, розташованих в поверхневих шарах моделей блоку, викликало розвиток тріщин (рис.3.6, а), що поширюються по всьому об'єму зразка.

Розширення води при переході в лід змусило ще некрижану воду мігрувати в напрямку від поверхні в глибину матеріалу, що підсилило напруження в стінках пор, і призвело до ефекту спучування і викришування зразків (рис. 3.6, б, г). У товщі матеріалу утворилися магістральні тріщини, які при випробуваннях з визначення температуропровідності грають роль «теплових містків».

Отже, вплив температурного фактору суттєвий, так як, незалежно від рівня тиску і часу його дії, служить причиною інтенсивного руйнування СДП і сприяє проникненню води в блок, що веде до зниження сил підтримання і теплоізолюючих властивостей.

Експериментальні випробування показали, що кліматичні навантаження збільшують пошкоджуваність блоків зі СДП в 2 рази в порівнянні з тривалим

гідростатичним впливом при однакових рівнях тиску P (глибині занурення) і часі навантаження $\tau = \tau_k \cdot N$.



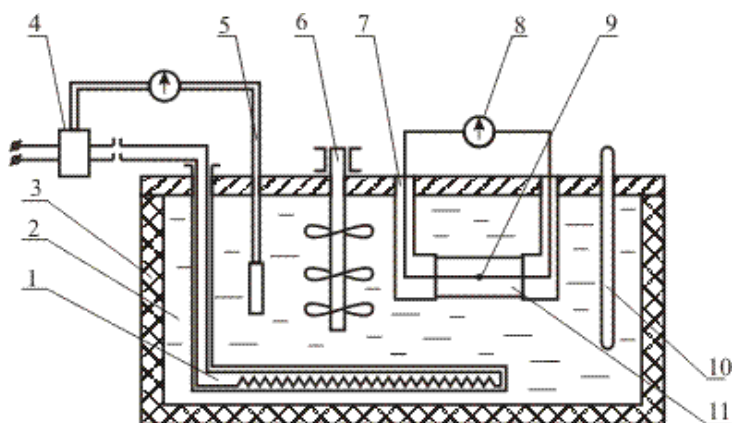
- а) – виникнення поверхневих тріщин;
 б) – спучування;
 в) – викришування матеріалу

Рисунок 3.6 – Характерні руйнування блоку зі СДП під впливом цикло-гідростатичних навантажень

3.4 Дослідницьке обладнання

Для визначення температуропровідності моделей блоку плавучості використовувалася експериментальна установка, схему якої представлено на рис. 3.7. Установка складається з термостату 3, заповненого термостатуючою рідиною 2 (дистильована вода). Нагрівання води до необхідної температури виконується плоским електронагрівачем 1, рівномірність нагрівання досягається за рахунок інтенсивного перемішування води лопатевим змішувачем 6. Температура нагрівання контролюється ртутним термометром 10.

Сталий температурний режим в термостаті підтримується за допомогою електроконтактного термометра 5 та реле терморегулятора 4, що впливають на електричну потужність нагрівача. Зразок 11, на торцях якого закріплено гідроізолюючі захвати 7, занурюється в воду, з постійною температурою.



- | | |
|---|------------------------------|
| 1) – нагрівач; | 2) – дистильована вода; |
| 3) – корпус термостата; | 4) – контакти термометру; |
| 5) – електроконтактний термометр; | 6) – лопатевий змішувач; |
| 7) – гідроізолюючі захвати; | 8) – потенціометр; |
| 9) – термопара (хромель-копель ТХК ₆₈); | 10) – контрольний термометр; |
| 11) – експериментальний зразок | |

Рисунок 3.7 – Схема експериментальної установки

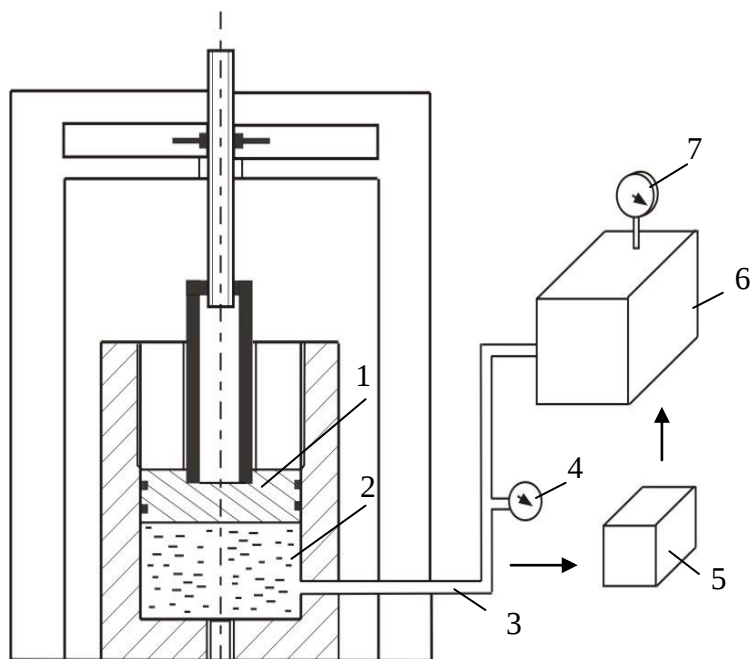
Температура центра осі зразка вимірюється хромель-копелевою термопарою 9. Вивідні кінці термопари приєднано до контактів потенціометру 8, за шкалою якого фіксується температура залежність температури в часі.

Випробування навантаженням гідростатичним тиском зразків блоку плавучості проводилися за допомогою комплексу обладнання (рис. 3.8).

Зразки занурювалися в камеру високого тиску 1 об'ємом $2,45 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, в якості робочого середовища використовувалася дистильована вода 2 ($\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) з температурою $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск в камері створювалося за допомогою насосної станції 6 зі швидкістю $0,1 \text{ МПа /с}$ до заданого рівня.

Контроль робочого тиску здійснювався електроконтактним манометром 4 з класом точності не нижче 1.5. За допомогою блока керування 5

забезпечувалося сталість навантаження в камері з точністю не менше 2,5 % від максимального робочого тиску.



- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1) – шток; | 2) – дистильована вода; |
| 3) – трубопровід; | 4) – електроконтактний манометр; |
| 5) – блок керування; | 6) – насосна станція; |
| 7) – манометр | |

Рисунок 3.8 – Комплекс обладнання для гідростатичних випробувань

Кількість води, що проникла в матеріал блоку, визначалася на лабораторних вагах марки ВЛЮ з точністю 0,01 г.

При проведенні «кліматичних» випробувань заморожування моделей блоків плавучості здійснювалося в камері холоду, в якій підтримувався стабільний температурний режим $T = -17 \pm 2$ °С. Контроль температури здійснювався ртутним термометром, розташованим всередині камери. Час витримки зразків в камері під тиском фіксувався за допомогою годинника.

Кількість води, що проникла до моделей блоку зі СДП, визначалася зважуванням після кожного циклу гідростатичного навантаження на лабораторних вагах марки ВЛЮ.

Довідка про метрологічне забезпечення експериментальних досліджень наводиться в Додатку И.

Висновки за розділом 3

1. Експериментально встановлено початкові теплофізичні властивості моделей блоку плавучості зі СДП до навантаження гідростатичним тиском в умовах ідентичних умовам експлуатації, тобто у водному середовищі.

2. Проведено експериментальні дослідження на моделях блоку зі СДП в умовах тривалих гідростатичних навантажень на базі 400 годин витримки під тиском рівня: 18, 26, 30 та 34 МПа, які дозволили вивчити механізм накопичення пошкоджень в блоках зі СДП в складі конструкції апарату при глибоководному режимі. В результаті досліджень було встановлено:

- найбільше зростання пошкоджуваності в моделях блоку зі СДП для всіх рівнів тиску спостерігається на початковому етапі навантаження. Це пояснюється руйнуванням повітряних мікропор і окремих «слабких» мікросфер, розташованих поблизу поверхні зразка блоку, і супроводжується заповненням водою створених порожнин;

- при подальшому статичному впливі гідростатичного тиску проявляються в'язко-пружні властивості полімерного сполучного СДП, відбувається його повзучість, що викликає перерозподіл внутрішніх напружень і продовжується руйнування «слабких» елементів СДП;

- рівень гідростатичного тиску $P=26$ МПа є граничним, з урахуванням наростання процесу накопичення пошкоджень в СДП, що пояснюється зміною механізму руйнування блоку.

3. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити значення критичного рівня пошкоджуваності, що становить $P_{кр} = 30 \%$ за обсягом. При даному рівні пошкоджень блоки зі СДП набувають властивостей блоків з традиційного сферопластика, плавучі і теплоізоляційні властивості характеристики погіршуються (густина СДП збільшується від 480 до 650...700 кг/м³, коефіцієнт теплопровідності від 0,085 до 0,2...0,25 Вт/(м·°К)).

4. Проведено експериментальні дослідження моделей блоку зі СДП в умовах «кліматичних» навантажень при повторних діях гідростатичного тиску

рівня 18, 22 і 26 МПа з подальшим заморожуванням в морозильній камері при температурі -17°C . Кількість циклів «кліматичного» навантаження становила 55.

Досліджено механізм накопичення пошкоджень в блоках зі СДП, в результаті чого встановлено:

- механізм руйнування моделей блоку плавучості зі СДП при кліматичних випробуваннях залишається таким, як при тривалих навантаженнях тільки на початковій стадії;

- подальший вплив від'ємних температур призводить до появи розтягуючих напружень в СДП і додаткового руйнування структури у вигляді тріщин, спрямованих від поверхні у глибину блоку. Це збільшує водопоглинання моделей блоку майже в 2 рази (в порівнянні з тривалими гідростатичними випробуваннями), що, відповідно, знижує плавучі і теплоізоляційні властивості блоків при повторній дії гідростатичного тиску.

5. Встановлено строгу кореляційну залежність між водопоглинанням (пошкоджуваністю) і коефіцієнтом теплопровідності СДП. Теплопровідність залежить, в основному, від рівня пошкоджуваності, а спосіб створення навантаження (величина тиску, тривалість витримки, кількість повторних кліматичних впливів) істотно на результат не впливає. Проникнення води, в цілому, однаково, а швидкості процесів різні.

Основні наукові результати розділу опубліковано у [64, 103, 116, 117].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНА ТА ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ І ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В БЛОКАХ ПЛАВУЧОСТІ ЗІ СФЕРОПЛАСТИКА З ДОДАТКОВОЮ ПОРУВАТИСТЮ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

4.1 Математична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості при тривалих гідростатичних навантаженнях

Одним з основних завдань дисертаційної роботи є побудова математичних моделей накопичення пошкоджень і зміни коефіцієнта теплопровідності блоків зі СДП в залежності від рівня і тривалості впливу гідростатичного тиску для оцінки ефективного ресурсу роботи блоків в конструкції ПНА.

В проведених раніше дослідженнях [70, 73, 75] не приділялося уваги вивченню впливу пошкоджуваності на зміну теплоізолюючих властивостей блоків плавучості в умовах експлуатації. Практична цінність різноманітних методів екстраполяції [118, 119], що в переважній більшості, використовуються для прогнозування тривалої міцності композитів у широкому діапазоні зміни експлуатаційних навантажень і тривалості впливу, невелика. Експериментальні дослідження властивостей блоків з традиційного сферопластика [58] розширюють базу для побудови математичної моделі накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП.

Побудова математичної моделі накопичення пошкоджень в теплоізолюючих блоках зі СДП здійснювалася з позиції того, що СДП це композит. Руйнування композитів з полімерною матрицею супроводжується реологічними ефектами, врахування яких можливе з залученням теорії лінійної в'язкопружності [100, 120, 121].

Для композитів деформативність під навантаженням добре описується експоненціальною залежністю [122]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} (1 - e^{-\alpha \cdot \tau}). \quad (4.1)$$

Передбачається, що процес накопичення пошкоджень в блоках зі СДП пов'язаний з в'язкопружною поведінкою полімерної матриці (наповнювач деформується пружно). Пошкоджуваність, що пов'язана з тривалістю дії навантаження, може бути представлена у вигляді залежності:

$$\Pi_{\tau} = 1 - e^{-\alpha \cdot f(\tau)}, \quad (4.2)$$

де α – структурний коефіцієнт;

$f(\tau)$ – монотонно зростаюча функція часу τ .

При тривалій дії ($\tau \rightarrow \infty$) навантаження P , більш точні результати отримуються при використанні формули:

$$\Pi_{\tau} = \frac{1 - \left(e^{-\alpha \cdot f(\tau)} \right)^2}{1 + e^{-\alpha \cdot f(\tau)}} \approx \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot f(\tau)}}. \quad (4.3)$$

Пошкоджуваність, що пов'язана з рівнем тиску, може бути представлена імовірнісною моделлю руйнування за законом Вейбулла [93]:

$$\Pi_P = 1 - e^{-V \cdot f_w(P)}, \quad (4.4)$$

де $f_w(P)$ – деяка функція Вейбулла;

V – ефективний об'єм, де розвиваються руйнування.

За Вейбуллом [123], ефективний об'єм V при крихкому руйнуванні визначається для імовірності $\Pi_P=0,63$. Однак, при тривалій дії тиску P , величина V не є постійною, тому що пов'язана з кількістю накопичених дефектів, обумовлених передісторією навантаження. Кількість накопичених дефектів, в свою чергу, визначається тривалістю дії навантаження P . Для моделей блоку зі СДП, що досліджувалися, втрата теплоізоляційних властивостей, як показав експеримент, відбувається при пошкоджуваності

$\Pi_{кр}=30\%$, яка приймається за критичну. Слід зазначити, що внаслідок S – образного характеру функції $P(\ln \tau)$ для всіх полімерних матеріалів [93], в тому числі і для СДП, на кривій тривалого навантаження при відповідному рівні пошкоджуваності, що приводить до руйнування, є злам, пов'язаний зі зміною механізму руйнування (див. рис.4.1). У точці зламу спрогнозувати поведінку матеріалу з достатньою точністю складно.

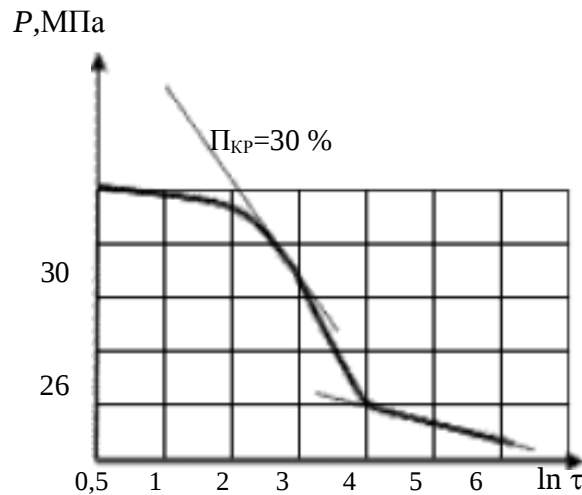


Рисунок 4.1 – Крива тривалого навантаження блоку зі СДП уздовж логарифмічної шкали часу

Використовуючи для (4.4) асимптотичне наближення за аналогію (4.3), при $P \rightarrow \infty$ отримаємо:

$$\Pi_P = 1 - e^{-V \cdot f_w(P)} \approx \frac{1}{1 + e^{-V \cdot f_w(P)}}. \quad (4.5)$$

Таким чином, комплексна математична модель накопичення пошкоджень може бути апроксимована нелінійною логістичною інтегральною функцією виду:

$$\Pi_T(\tau; P) = a_T \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{-(\ln \tau - b_T)}{c_T}}} \cdot \frac{1}{1 + e^{\frac{-(P - d_T)}{f_T}}} \right), \quad (4.6)$$

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, що отримані обробкою експериментальних даних за методом найменших квадратів.

Слід зазначити, що для реальних рівнів навантаження коефіцієнт $0 < a < 1$, для дуже високих рівнів тиску близько 250...300 МПа коефіцієнт $a = 1$, коли можливе руйнування всіх мікросфер в СДП.

Графічно вид поверхні математичної моделі накопичення пошкоджень за Вейбуллом і відповідно теорії лінійної в'язко-пружності представлено на рис. 4.2.

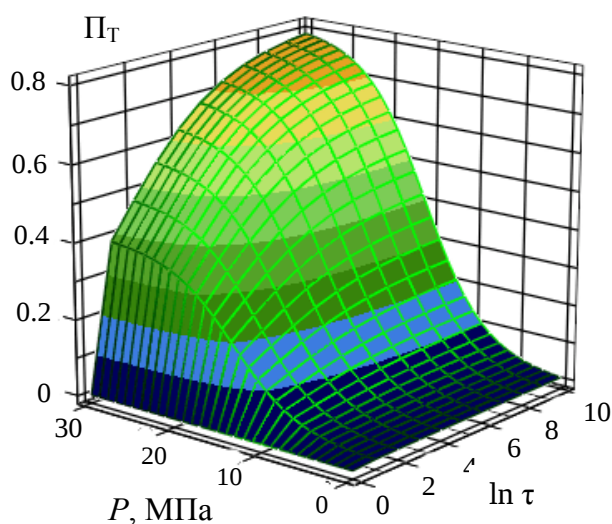


Рисунок 4.2 – Модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при тривалому гідростатичному навантаженні

4.2 Математична модель зміни коефіцієнта теплопровідності в блоках плавучості при тривалих гідростатичних навантаженнях

На підставі того, що коефіцієнт теплопровідності перебуває в функціональній залежності від пошкоджуваності теплоізолюючого блоку, (коефіцієнт кореляції $K=0,984$) математична модель, в першому наближенні, може бути прийнята у вигляді полінома:

$$\lambda_T(\tau; P) = \lambda_0 + b_{1T} \cdot \Pi_T + c_{1T} \cdot \Pi_T^2, \quad (4.7)$$

де $\lambda_0 = 0,085 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$ – початковий коефіцієнт теплопровідності блоку зі СДП до навантаження гідростатичним тиском;

$b_{1\tau} = 0,338 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$; $c_{1\tau} = -0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$ – коефіцієнти отримані в результаті апроксимації експериментальних даних за методом найменших квадратів.

При підстановці (4.6) в (4.7) отримано математичну модель зміни коефіцієнта теплопровідності в залежності від тривалості гідростатичного навантаження і рівня тиску, яку графічно представлено на рис. 4.3.

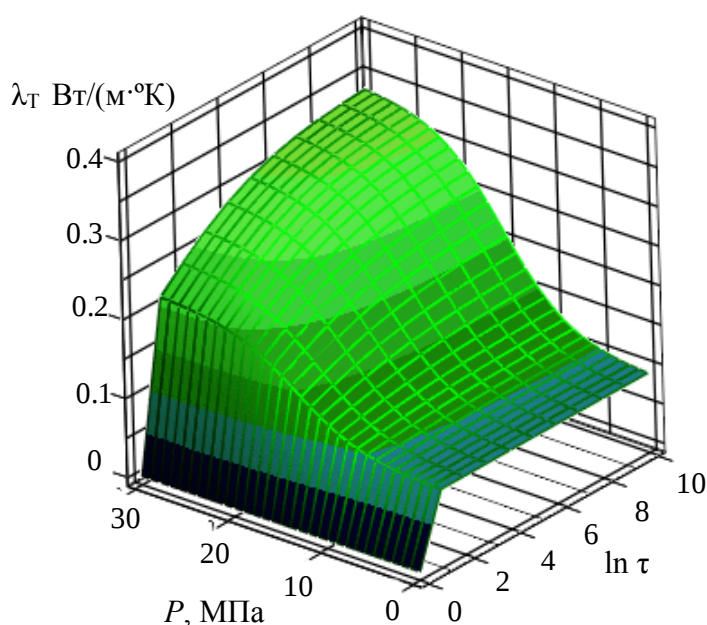
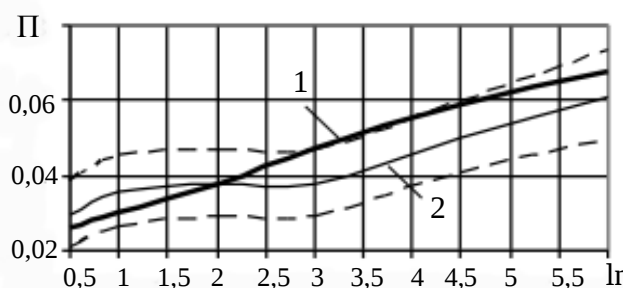


Рисунок 4.3 – Модель зміни коефіцієнту теплопровідності в блоках зі СДП при тривалому гідростатичному навантаженні

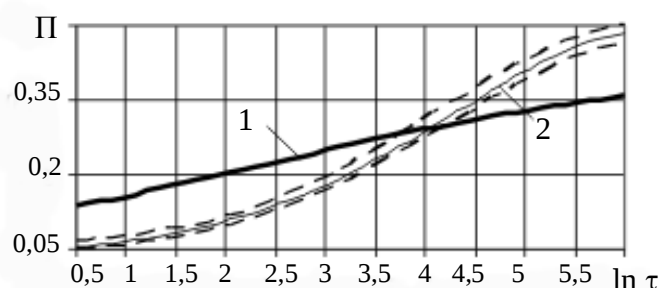
При тривалих випробуваннях ($\ln \tau > e^{10} \approx 2,203 \cdot 10^4$ год) залежність коефіцієнта теплопровідності від часу асимптотично наближається до лінійної, і для тривалого навантаження значення λ_τ може бути отримано лінійною екстраполяцією.

4.3 Аналіз результатів експериментальних і теоретичних розрахунків

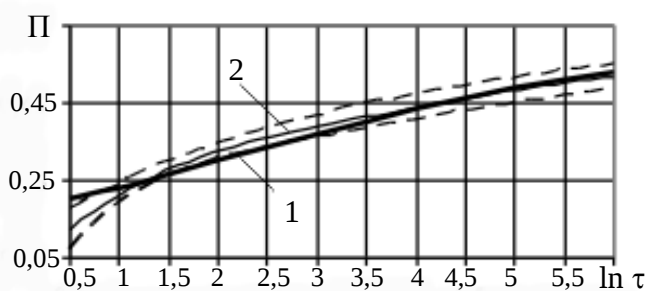
Експериментальні дані з накопичення пошкоджень в блоках зі СДП і значення, що отримані згідно з запропонованою математичною моделлю (4.6) графічно представлено на кривих (рис.4.4).



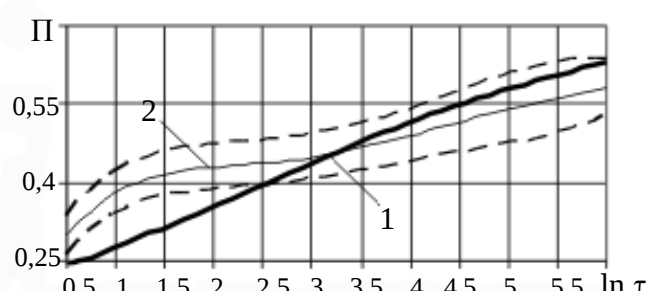
а)



б)



в)



г)

1) – теоретична крива;

2) – експериментальна крива з довірчим інтервалом (пунктирна лінія)

а) – $P = 0,5 \sigma_{\text{пр}}$, б) – $P = 0,7 \sigma_{\text{пр}}$; в) – $P = 0,8 \sigma_{\text{пр}}$, г) – $P = 0,9 \sigma_{\text{пр}}$

Рисунок 4.4 – Залежність пошкоджуваності теплоізолюючого блоку від тривалості витримки під тиском рівня P

З аналізу даних видно, що теоретична модель пошкоджуваності дає результати близькі до експерименту: для рівнів тиску 18 та 34 МПа ($0,5\sigma_{\text{пр}}$ та $0,9\sigma_{\text{пр}}$) теоретична крива потрапляє в довірчий інтервал з ймовірністю 95 % (рис. 4.4, а, г), для тиску $P=30$ МПа ($0,8\sigma_{\text{пр}}$) – сходиться з експериментальною кривою (рис. 4.4, в), для тиску $P=26$ МПа ($0,7\sigma_{\text{пр}}$) – потрапляє в довірчий інтервал з ймовірністю 50 %, це підтверджує те, що вказаний рівень

навантаження близький до «точки зламу» (див. рис. 4.1), в якій відбувається зміна механізму руйнування СДП.

Результати, що отримані за моделлю (4.7), мають непогану сходиність з експериментальними даними. Знайдений коефіцієнт кореляції між теоретичними значеннями коефіцієнта теплопровідності (4.7) і пошкоджуваністю теплоізолюючого блоку (4.6) становить $K(\Pi_T; \lambda_T) = 0,97$, що свідчить про збереження функціональної залежності між моделями.

4.4 Фізична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості на основі теорії дифузії

Одними з основних параметрів, що визначають працездатність блоків, як елементів плавучості глибоководних конструкцій та дозволяють прогнозувати зміну їх функціональних властивостей є пошкоджуваність і водопоглинання.

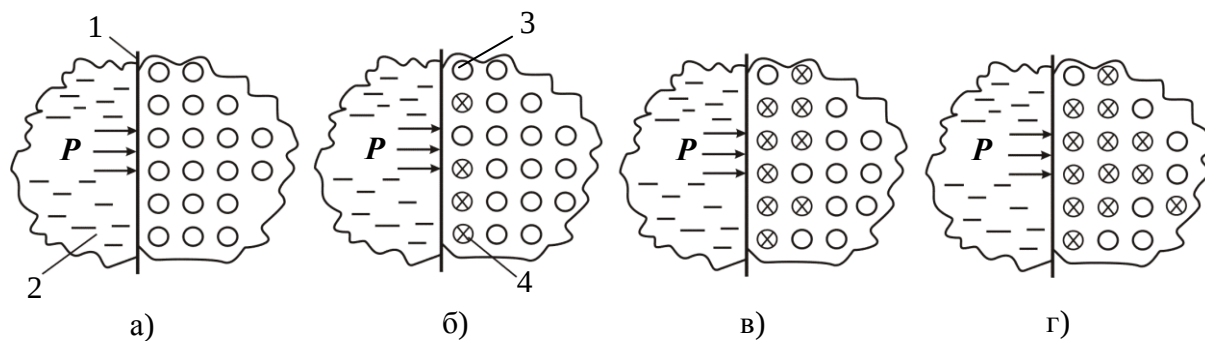
Вода проникає до блоку через поверхню внаслідок руйнування, в першу чергу, повітряних пор, а потім скляних мікросфер, і розподіляється за обсягом матеріалу. Відповідно, розрізняють поверхнєве водопоглинання, яке визначається як потік води через поверхню зразка і водопоглинання за об'ємом, як відношення кількості води, що проникла в матеріал до об'єму зразка. Результати випробувань зразків [72, 124], різних за формою і розміром, показали, що водопоглинання за об'ємом істотно залежить від масштабного фактору, що ускладнює використання даної характеристики для прогнозування пошкоджуваності. Поверхнєве водопоглинання є більш стабільною величиною, проте спостерігається розходження в оцінюванні кількості води, що проникла до зразків різних за формою, але з однаковою площею поверхні. Крім того, зазначені характеристики постійно змінюються в процесі водопоглинання, що значно ускладнює прогнозування властивостей блоків плавучості і зменшує його надійність.

У зв'язку з зазначеними вище проблемами виникає необхідність в розробці нових методів прогнозування водопоглинання, адаптованих для об'єктів будь-якої конфігурації.

Більшість досліджень, присвячених вивченню процесів руйнування блоків плавучості зі сферопластика при дії гідростатичного тиску і пов'язаного з цим водопоглинанням, ґрунтуються на аналізі напружено-деформованого стану окремих мікросфер. Так, в роботі [71] показано, що напружений стан мікросфер поблизу поверхні матеріалу є більш небезпечним в порівнянні з мікросферами, що лежать в глибинних шарах. Це зумовлює характер руйнування в напрямку від поверхні в товщу матеріалу. В роботі [125] досліджено динамічні процеси, які викликані випадковим руйнуванням окремої мікросфери і появою ударної хвилі в матеріалі, вивчено явище імплзії. Для врахування розкиду властивостей міцності мікросфер, виконано статистичні дослідження [58, 126], що дозволяють прогнозувати водопоглинання за статистичними характеристиками компонентів матеріалу плавучості. В роботі [116] запропоновано математичну модель накопичення пошкоджень на основі імовірнісної моделі руйнування Вейбулла і лінійної теорії в'язкопружності. Всі наведені вище дослідження не дозволяють оцінити імовірність руйнування окремої мікросфери, тому оцінка пошкоджуваності носить інтегральний характер, як питома частка руйнувань в структурі матеріалу. Однак, можливо виконати оцінку величини водопоглинання без урахування мікромеханіки руйнування на основі явища дифузії чи масопереносу, що дозволяє досить просто трактувати процес проникнення води в структуру СДП.

4.4.1 Механізм водопоглинання в блоках плавучості

Проникнення води в СДП може бути розглянуто як процес заміщення повітря водою в окремих порах блока (рис 4.5).



- 1) – поверхня матеріалу; 2) – рідина (вода);
 3) – повітряна пора або порожнина в мікросфері;
 4) – пора заповнена водою;
 а), б), в), г) – послідовні стадії процесу дифузії

Рисунок 4.5 – Процес проникнення води в структуру теплоізолюючого блока зі СДП під дією тиску P

При цьому спостерігаються наступні аналогії між водопоглинанням і дифузією атомів і молекул в матеріалах [101]:

- враховуючи малий розмір повітряних пор (3...5 мм) і скляних мікросфер (до 150 мкм), в порівнянні з розмірами реальних конструкцій блоків плавучості підводної техніки, їх умовно можна вважати «атомами»;
- процеси дифузії і проникнення води починають розвиватися на границі розділу середовищ і поширюються вглиб матеріалу;
- дифузія визначається міцністю міжатомних зв'язків, водопоглинання залежить від міцності стінок між повітряними порами і міцністю скляних мікросфер;
- напрямок і інтенсивність процесів дифузії і водопоглинання визначаються градієнтом концентрації речовини (води) в матеріалі;
- аналогом концентрації речовини, що дифундує, є відносна пошкоджуваність в процесі водопоглинання (Π – відносна пошкоджуваність визначається, як відношення об'єму води, що проникла до матеріалу до об'єму повітря в порах і мікросфер);
- процеси дифузії і водопоглинання розвиваються в часі за експоненціальним законом.

Отже, доцільно застосувати дифузійну аналогію до механізму водопоглинання теплоізоляційного блоку зі СДП при тривалому навантаженні

гідростатичним тиском [116]. При випробуваннях досліджувалися зразки циліндричної форми довжиною $L = 100$ мм і радіусом $R = 10$ мм. Контрольованим параметром виступала величина відносної пошкоджуваності Π матеріалу після витримки зразків при гідростатичному тиску P протягом часу τ .

Другий закон Фіка (рівняння дифузії) в циліндричних координатах має вигляд [127]:

$$\frac{\partial \Pi_d}{\partial \tau} = D \left[\frac{\partial^2 \Pi_d}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_d}{\partial r} \right], \quad (4.8)$$

де $\Pi_d = \Pi_d(r; \tau)$ – пошкоджуваність теплоізолюючого блоку при водопоглинанні;

D – коефіцієнт дифузії згідно з термінологією [89];

r – радіальна координата;

τ – час від початку процесу водопоглинання;

Рішення рівняння (4.8) може бути отримане у вигляді [89]:

$$\frac{\Pi_{\Pi} - \Pi_d(r; \tau)}{\Pi_{\Pi} - \Pi_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\beta_n J_1(\beta_n)} J_0\left(\beta_n \frac{r}{R}\right) \exp\left[-\beta_n^2 \frac{D}{R^2} \tau\right], \quad (4.9)$$

де Π_{Π} – пошкоджуваність водопоглинанням на поверхні циліндричного зразка блоку;

Π_0 – початкова пошкоджуваність в матеріалі блоку зі СДП;

J_0, J_1 – функції Бесселя нульового і першого порядку;

μ_n – корені функції Бесселя $J_0(\mu_n) = 0$.

Таким чином, водопоглинання $\Pi_d(r; \tau)$ в загальному випадку залежить від трьох параметрів Π_{Π} , Π_0 і D , які можуть бути визначені на основі експериментальних даних. Оскільки при експериментах вимірюється кількість води, яка поглинута зразком, що відповідає за визначенням середній за обсягом пошкоджуваності зразка, необхідно розрахувати середнє значення функції

$\Pi_d(\tau)$ (для довгого циліндра $\frac{L}{R} \geq 10$) заданої, згідно (4.9):

$$\bar{\Pi}_d(r; \tau) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \Pi_d(r; \tau) \cdot r dr. \quad (4.10)$$

Підстановка (4.9) в (4.10) дозволяє отримати вираз для середньої пошкоджуваності:

$$\bar{\Pi}_d(\tau) = \Pi_{\Pi} - (\Pi_{\Pi} - \Pi_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \cdot \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right]. \quad (4.11)$$

Фізичний зміст параметрів Π_{Π} і Π_0 визначає верхній і нижній рівень пошкоджуваності теплоізолюючого блоку при заданому рівні гідростатичного тиску.

Π_0 – визначає питому частку повітряних пор, які руйнуються в початковий момент дії гідростатичного навантаження, наприклад, при зануренні.

Π_{Π} – відповідає частці повітряних пор, які можуть бути зруйновані внаслідок статичної втоми матеріалу блоку. Параметри Π_{Π} і Π_0 є функціями зовнішнього гідростатичного тиску P .

В роботі [58] показано, що граничний рівень пошкоджуваності найбільш точно апроксимується логістичною залежністю від рівня гідростатичного тиску виду:

$$\Pi(P) = \frac{1}{1 + \exp[\alpha(P)]}, \quad (4.12)$$

де $\alpha(P)$ – лінійна функція від P .

За фізичним змістом величин $\Pi_0(P)$ і $\Pi_{\Pi}(P)$ неважко визначити область можливих значень даних функцій. При малих рівнях гідростатичного тиску ($P \rightarrow 0$) руйнування структури матеріалу блоку практично неможливе, тобто $\Pi_0(P) \rightarrow 0$ і $\Pi_{\Pi}(P) \rightarrow 0$. При високих рівнях тиску руйнування відбувається дуже швидко, при цьому $\Pi_0(P) \rightarrow 1$ і $\Pi_{\Pi}(P) \rightarrow 1$.

При середніх рівнях гідростатичного тиску криві $\Pi_0(P)$ і $\Pi_{\Pi}(P)$, що представлені згідно (4.12), утворюють так звану петлю гістерезису (рис. 4.6, а). Показники експонент α_{Π} і α_0 у виразі (4.12) зручно апроксимувати системою лінійних функцій, що на площині обмежуються ромбом (рис. 4.6, б).

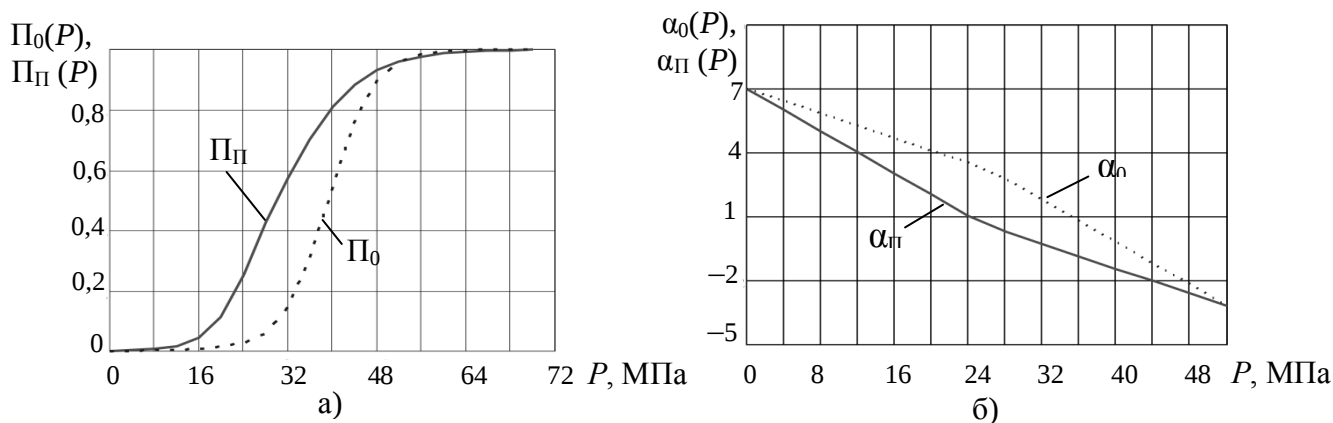


Рисунок 4.6 Залежність параметрів пошкоджуваності Π_0 і Π_{Π} (а) та граничних значень показників α_0 та α_{Π} (б) від дії тиску P

Приймаємо граничні значення:

$$\text{при } \tau = \infty \quad \Pi_{\Pi}(P) = \bar{a} + \bar{b}P + \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2}, \quad (4.13)$$

$$\text{при } \tau = 0 \quad \Pi_0(P) = \bar{c} + \bar{b}P - \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2},$$

де P – рівень гідростатичного тиску при тривалих випробуваннях, МПа;

$P_{кр}$ – рівень тиску, що відповідає максимальній ширині петлі гістерезису, МПа;

$\bar{a}$, $\bar{b}$ (1/МПа) і $\bar{c}$ – коефіцієнти, що визначаються за результатами тривалих гідростатичних випробувань.

З урахуванням (4.11) і (4.13) середнє водопоглинання може бути задане функцією:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_d(P; \tau) = & \frac{1}{1 + \exp \left[\bar{a} + \bar{b}P + \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]} - \\ & - \left[\frac{1}{1 + \exp \left[\bar{a} + \bar{b}P + \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{1 + \exp \left[\bar{c} + \bar{b}P - \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]} \right] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \exp \left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Застосування стандартної процедури апроксимації результатів експериментальних досліджень за методом найменших квадратів дозволило визначити невідомі параметри виразу (4.14): $\bar{a} = 5,68$; $\bar{b} = -0,196 \text{ 1/МПа}$; $\bar{c} = 8,36$; $P_{кр} = 26 \text{ МПа}$, $D = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Слід зазначити, що представлення коефіцієнта дифузії D , як функції від гідростатичного тиску P у вигляді $D = d \cdot P^\beta$ (де d – коефіцієнт; β – показник ступеня), показало, що $\beta \rightarrow 0$, тобто коефіцієнт дифузії D не залежить від тиску, що підтверджується в роботі [128].

4.4.2 Порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних результатів

Середні результати оцінки пошкоджуваності блоків зі СДП, отримані в ході експериментальних і теоретичних розробок (модель за розподілом Вейбулла і модель дифузійної аналогії) для відповідних рівнів тиску і часу витримки, представлені в табл.4.1.

Порівняльний аналіз оцінок накопичення обсягів пошкоджень в блоках зі СДП за розробленою фізичною моделлю на основі дифузійної аналогії (4.14) і експериментальними значеннями, показав хорошу відповідність результатів, коефіцієнт кореляції між ними склав $K(\bar{\Pi}_d; \Pi) = 0,961$.

Таблиця 4.1 – Експериментальні і теоретичні значення пошкоджуваності блоків зі СДП при тривалому гідростатичному навантаженні

Рівень тиску P , МПа	Час витримки під тиском τ , год								
	Пошкоджуваність Π , %	$e^{0,5*}$	e^1	e^2	e^3	e^4	$e^{4,5}$	e^5	e^6
18	Π	3,07	3,57	3,752	3,78	–	5,126	–	6,24
	$\overline{\Pi}_d$	2,0	2,2	2,8	3,8	–	5,9	–	7,2
	Π_T	2,6	3,0	3,8	4,7	–	5,9	–	6,8
26	Π	5,46	6,84	10,21	18,51	28,37	–	40,95	48,19
	$\overline{\Pi}_d$	8,2	9,3	12,5	17,7	24,9	–	32,7	35,8
	Π_T	13,6	15,7	20,2	24,9	29,2	–	32,9	35,8
30	Π	11,9	22,39	31,51	39,61	43,86	–	48,14	51,85
	$\overline{\Pi}_d$	15,0	16,4	20,5	26,9	36,1	–	45,9	49,8
	Π_p	20,2	23,3	30,1	37,1	43,5	–	48,9	53,5
34	Π	29,61	38,42	42,46	45,39	48,54	–	54,23	58,20
	$\overline{\Pi}_d$	27,6	29,0	33,0	40,0	49,6	–	59,8	63,9
	Π_T	23,9	27,6	35,6	43,9	51,5	–	57,9	63,0

Примітка: * $e = 2,718$ – основа натурального логарифму;

Π – значення пошкоджуваності отримане експериментальним шляхом;

$\overline{\Pi}_d$ – значення пошкоджуваності отримане за дифузійною аналогією;

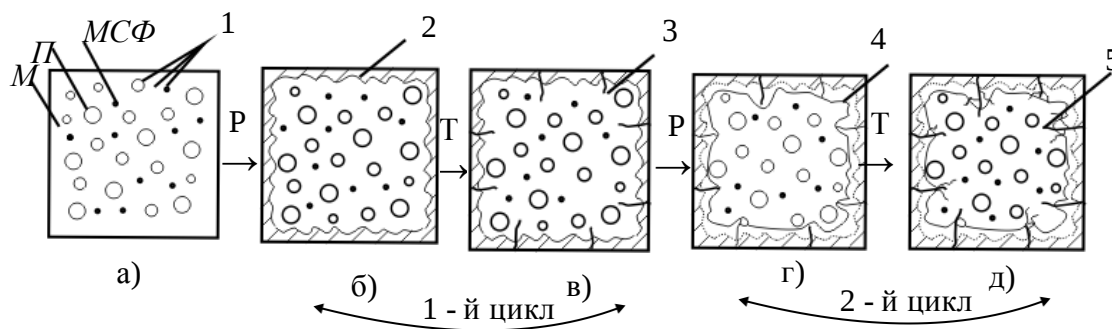
Π_T – значення пошкоджуваності отримане за моделлю Вейбулла

Слід зазначити, що математична модель пошкоджуваності (4.6), що побудована на основі механізму поступового накопичення пошкоджень за розподілом Вейбулла дає аналогічний результат $K(\Pi_T; \Pi) = 0,956$.

4.5 Математична модель накопичення пошкоджень в блоках плавучості при кліматичних навантаженнях

4.5.1 Механізм руйнування блока

На основі гіпотез, що пояснюють механізм руйнування поруватих матеріалів при заморожуванні [129–131], і за результатами проведених експериментальних досліджень, розроблено модель механізму руйнування блоку зі СДП, яку представлено на рис.4.7.



- 1) – непошкоджена структура СДП до випробувань;
- 2) – межа руйнування поверхневого шару матеріалу;
- 3) – тріщини, що поширюються вглиб матеріалу;
- 4) – межа подальшого руйнування глибинних шарів матеріалу;
- 5) – розвиток тріщин

Рисунок 4.7 – Модель механізму руйнування теплоізолюючого блоку зі СДП при циклічній дії позитивних і від'ємних температур в поєднанні з гідростатичним тиском

У початковому непошкодженному стані блок зі СДП має структуру, яка являє собою безперервну полімерну матрицю (M), що компактно заповнена скляними мікросферами ($МСФ$) і рівномірно розташованими повітряними порами ($П$) (рис.4.7, а). Дія тиску P викликає руйнування слабких елементів мікроструктури СДП, що сприяє проникненню води у поверхневі шари блоку (рис.4.7, б).

При подальшій дії від'ємних температур вода, що знаходиться в порах матеріалу, перетворюється на лід зі збільшенням в об'ємі приблизно на 9 %, в стінках пор виникають розтягуючі напруження. Як результат – утворюються магістральні тріщини, що поширюються в глибину блоку (рис.4.7, в).

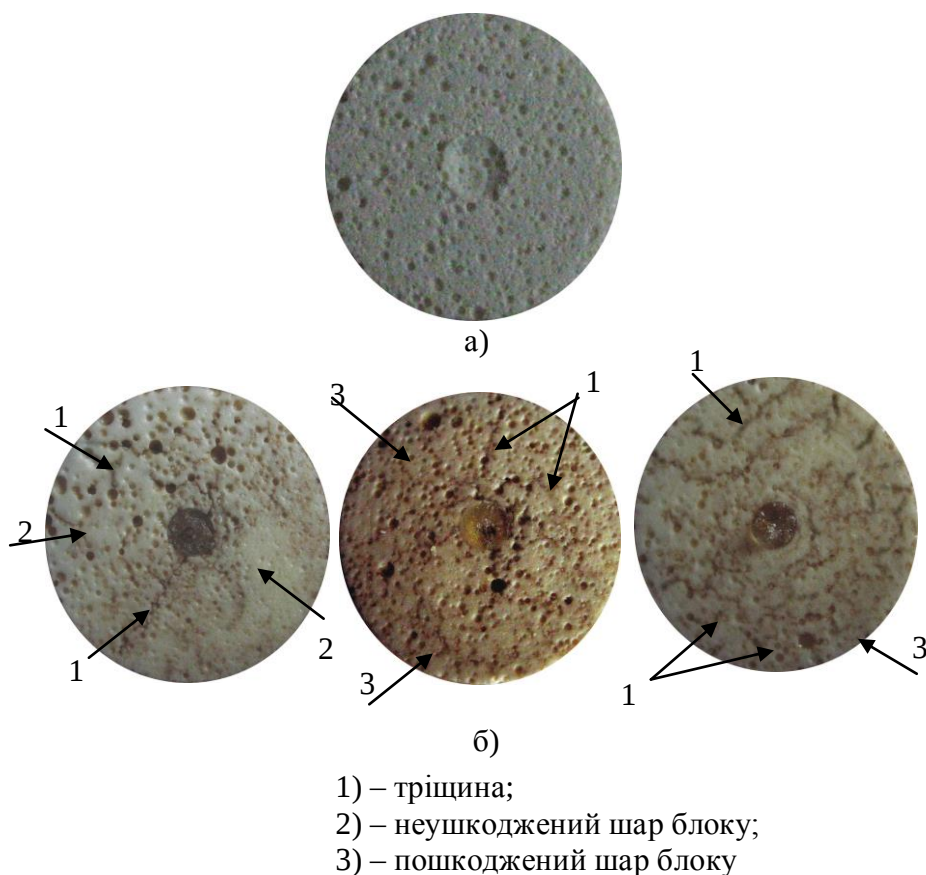
Вплив тиску P , в інтервалі між циклами заморожування і відтаювання, призводить до більш інтенсивного руйнування зразків блоку. Це обумовлено двома факторами: зростанням пошкоджуваності (збільшенням обсягу відкритої поруватості) блоку і більш щільним заповненням об'єму відкритих пор водою перед заморожуванням.

При наступних циклах навантаження тиском утворені раніше тріщини збільшують площу поверхні, що контактує з водою, це призводить до збільшення водопоглинання і пошкоджуваності структури (рис.4.7, г). При

замерзанні спостерігається подальший розвиток тріщин, їх розгалудження і проникнення в глибинні шари матеріалу (рис.4.7, д)

Для підтвердження гіпотетичної моделі механізму руйнування теплоізолюючого блоку зі СДП проведено експеримент. Досліджуваний зразок циліндричної форми встановлювався в скляній ємності, заповненій насиченим розчином перманганату калію.

Ємність герметично закривалася і зразок піддавався декільком циклам кліматичного впливу. На кожному циклі навантаження з поверхні, перпендикулярно до осі циліндричного зразка, зрізався шар матеріалу товщиною 3 мм і фотографувався. Руйнування структури і сліди проникнення води в матеріал візуально можна оцінити за розподілом темних плям на поверхні шліфів, що представлені на рис. 4.8.



а) – структура до випробувань; б) – структура після цикло-гідростатичних навантажень

Рисунок 4.8 – Шліфи зразків блоку зі СДП

4.6 Математична модель накопичення пошкоджень при кліматичних навантаженнях

При дослідженні впливу тривалого гідростатичного тиску на пошкоджуваність і зміну коефіцієнта теплопровідності блоку плавучості зі СДП запропонована математична модель накопичення пошкоджень (4.6) у вигляді логістичного закону розподілу по змінним $\ln \tau$ і P :

$$\Pi_T(\tau; P) = a_T \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{-(\ln \tau - b_T)}{c_T}}} \cdot \frac{1}{1 + e^{\frac{-(P - d_T)}{f_T}}} \right). \quad (4.15)$$

Для аналізу і співставлення результатів дослідження, обрано математичну модель пошкоджуваності при кліматичних випробуваннях виду:

$$\Pi_K(N; P) = \frac{1}{1 + e^{a - b(\ln N)^{\alpha_1}}} \cdot \frac{1}{1 + e^{c - d \cdot P}}, \quad (4.16)$$

де $a = 2,518$; $b = 0,597$; $c = 6,645$; $d = 0,277 \text{ МПа}^{-1}$; $\alpha_1 = 1,366$ – емпіричні коефіцієнти, що визначені при апроксимації результатів випробувань за методом найменших квадратів.

Модель уточнено додатковим параметром α_1 для врахування впливу фазового переходу води, накопиченої в зразках блоку при зануренні.

Графічно поверхню пошкоджуваності $\Pi_K = f(P, \ln N)$ зображено на рис. 4.9.

Перевірка адекватності запропонованої моделі накопичення пошкоджуваності в блоках зі СДП (4.16) за усією сукупністю експериментальних даних, розглянуто в [104], і проводиться для функції, яка представляє відносне відхилення від середнього експериментального:

$$\theta_{i,j,k} = \frac{\Pi_{K,i,j} - \Pi_{i,j,k}}{\overline{\Pi_{i,j}}}, \quad (4.17)$$

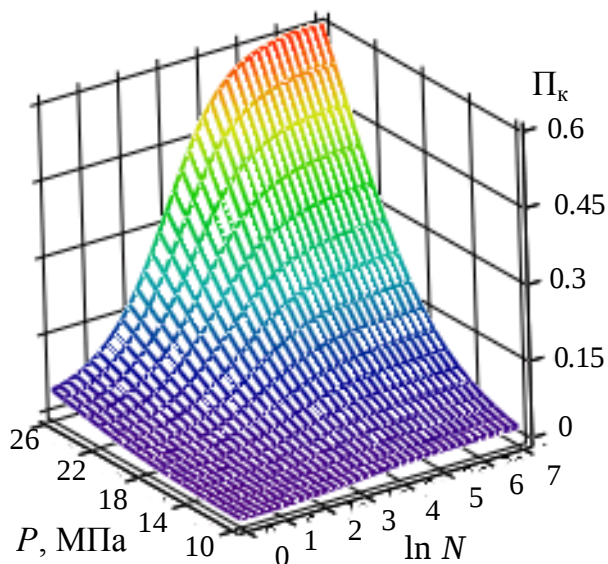


Рисунок. 4.9 – Модель накопичення пошкоджень в блоці зі СДП залежно від рівня тиску P та кількості циклів N кліматичного впливу

де $P_{k,ij}$ – значення пошкоджуваності, що розраховано за моделлю (4.16);

$P_{i,j,k}$ – значення пошкоджуваності k -го поворотного дослідів в кожній експериментальній точці дослідів;

$\bar{P}_{ij}$ – середнє значення пошкоджуваності дослідів.

Перевірку адекватності моделі (4.16) можна проводити відносно функції θ , так як вона лінійно пов'язана з експериментальною пошкоджуваністю.

Кліматичні випробування проводились при рівнях гідростатичного тиску $P_i (i = 1 \dots 3) = 18, 22, \text{ і } 26$ МПа на базі циклів заморожування–відтаювання $N_j (j = 1 \dots 9) = 1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 34; 55$. У кожній експериментальній точці проводилось по $K=5$ повторних дослідів, $k=1 \dots 5$ – номер повторного дослідів. Отже, відносне відхилення $\theta_{i,j,k}$ розраховується для експериментальних точок у кількості $m = i \times j (3 \times 9) = 27$. Проведення експерименту для $P = 26$ МПа припинено на $N = 21$ циклі (2 цикла не здійснено, так як накопичено пошкоджуваність $P_{кр} = 30 \%$), тому $m = 25$. Загальна кількість дослідних значень при кліматичних випробувань становить $z = m \times k (25 \times 5) = 125$.

Значення критерію Стюдента визначається в кожній експериментальній точці за формулою [102]:

$$T_{\text{спос}} = \frac{\bar{\theta}_{i,j,k} \sqrt{K}}{S_{M,i,j}}, \quad (4.18)$$

$$\text{де } \bar{\theta}_{i,j,k} = \frac{1}{5} \sum_k \theta_{i,j,k};$$

$$S_{M,i,j} = \sqrt{\frac{\sum_i \theta_{i,j,k}^2 - \frac{1}{K} (\sum_i \theta_{i,j,k})^2}{K-1}}.$$

Максимальне значення критерію Стюдента із всього діапазону дослідних точок склало $T_{\text{спос}} = 2,59$, а $T_{\text{кр}}(0,05; 5-1)=2,78$ за [102], тобто відносне відхилення θ незначно відрізняється від нуля.

Адекватність математичної моделі за дисперсією перевіряється за критерієм Фішера [99, 102]:

$$F_{\text{спос}} = \frac{S^2(\theta)}{S^2(\theta_{\text{ек}})}, \quad (4.19)$$

$$\text{де } S^2(\theta) = \frac{1}{z-l} \sum_{i,j,k} \theta_{i,j,k}^2 - \text{дисперсія моделі};$$

$$S^2(\theta_{\text{ек}}) = \frac{1}{z-m} \sum_{i,j,k} \left(\frac{\Pi_{i,j,k} - \bar{\Pi}_{i,j}}{\bar{\Pi}_{i,j}} \right)^2 - \text{дисперсія дослід};$$

$l = 5$ – кількість емпіричних коефіцієнтів у моделі (4.16).

$$\text{Порівняння } F_{\text{спос}} = \frac{0,09677}{0,07953} = 1,21 \leq F_{\text{кр}}, \quad F_{\text{кр}}(0,05; 120,100) = 1,28 \quad \text{за [102],}$$

підтверджує адекватність запропонованої моделі. Довірчий інтервал Δ для відносного відхилення θ , як нормально розподіленої випадкової величини з невідомою дисперсією, визначається із розподілу Стюдента [102]:

$$\Delta = t_p \frac{S(\theta)}{\sqrt{z}}, \quad (4.20)$$

де t_p – критичне значення Стюдента (p – число ступенів вільності).

При довірчій ймовірності 0,95 довірчий інтервал для моделі (4.16) складе 4,4%. Теоретичні криві пошкоджуваності для експериментальних рівнів тиску з встановленим довірчим інтервалом графічно представлено на рис.4.10.

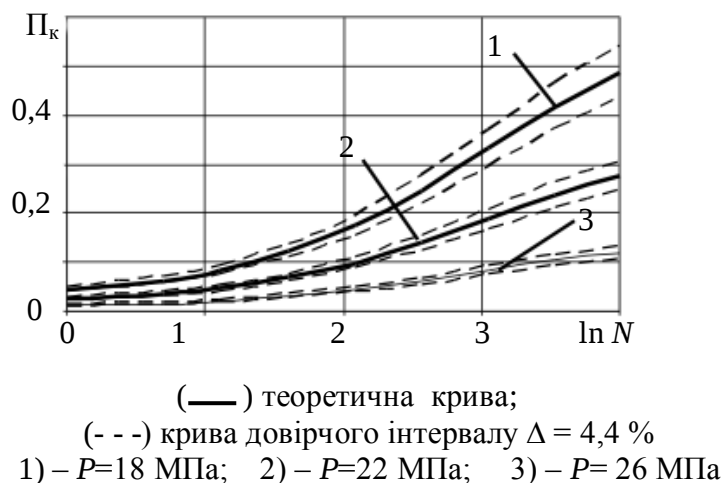


Рисунок 4.10 – Теоретична крива накопичення пошкоджень в залежності від кількості циклів заморожування-відтаювання N при дії тиску рівня P

Визначено коефіцієнт кореляції за [98] між значеннями пошкоджуваності, що отримано експериментальними шляхом і за моделлю (4.16). Коефіцієнт Пірсона склав $K(\Pi_k; \Pi) = 0,97$, що свідчить про достовірність моделі.

4.7 Математична модель зміни коефіцієнта теплопровідності в блоках плавучості при кліматичних навантаженнях

Проведено кореляційний аналіз між експериментальними значеннями накопиченої пошкоджуваності і зміною коефіцієнта теплопровідності в зразках зі СДП. Отриманий коефіцієнт склав $K_{ек}(\Pi; \lambda) = 0,983$, що свідчить про лінійну залежність між даними величинами. Отже, функція коефіцієнта теплопровідності є монотонно зростаючою в залежності від пошкоджуваності і добре апроксимується у вигляді квадратичного поліному:

$$\lambda_k = a_{1k} + b_{1k} \cdot \Pi_k + c_{1k} \cdot \Pi_k^2, \quad (4.21)$$

де $a_{1к} = 0,075 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$; $b_{1к} = 0,471 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$; $c_{1к} = -0,278 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$ – емпіричні коефіцієнти, що отримано за методом найменших квадратів.

Підстановка у формулу (4.21) теоретичного значення пошкоджуваності (4.16), утворює математичну модель, яка описує залежність коефіцієнта теплопровідності λ_k від кількості циклів N температурного впливу і величини тиску P (рис. 4.11).

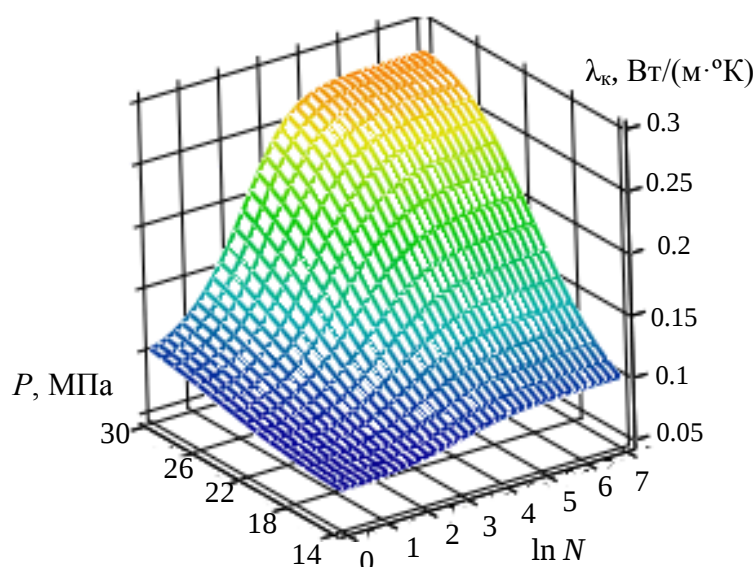


Рисунок 4.11 – Модель зміни коефіцієнту теплопровідності блоку зі СДП залежно від рівня тиску P та кількості циклів N кліматичного впливу

Розрахований коефіцієнт кореляції між значеннями отриманими за теоретичною моделлю зміни коефіцієнта теплопровідності (4.21) і експериментальними даними склав $K(\lambda_k; \lambda) = 0,96$, що свідчить про достатньо високу точність апроксимації та адекватність запропонованої моделі.

4.8 Кореляційна залежність між математичними моделями накопичення пошкоджень в умовах навантаження

Для встановлення кореляційної залежності між математичними моделями накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП в умовах тривалого гідростатичного (4.6) і кліматичного навантаженні (4.16) для однакового рівня тиску P (глибина занурення), введено характерний коефіцієнт:

$$K_{\Pi}(\tau) = \frac{\Pi_K(\tau_K \cdot N)}{\Pi_T(\tau)}, \quad (4.22)$$

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

Розраховано значення коефіцієнту K_{Π} для випадку експлуатації блоків плавучості на глибині 1500...2000 м ($P = 15...20$ МПа) на базі $\tau = 1000$ годин ($N = 1000$ циклів), результат розрахунку наведено на рис.4.12.

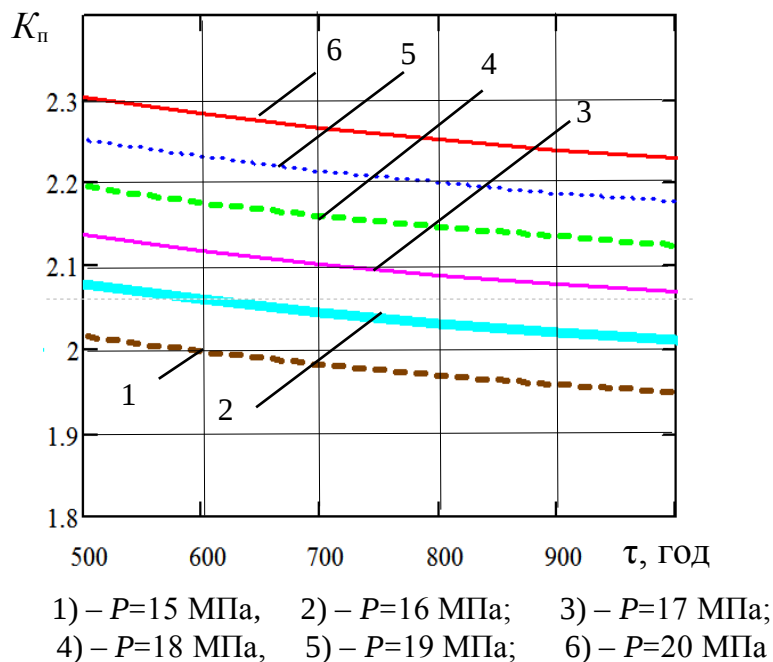


Рисунок 4.12 – Значення коефіцієнту взаємозв'язку між моделями накопичення пошкоджень при тривалих і кліматичних навантаженнях за $\tau = 1000$ годин при дії тиску P

Аналіз графіків (рис.4.12) показує, що криві мають вигляд асимптот, що свідчить про стабільність взаємозв'язку між обсягом накопичених пошкоджень при тривалих і кліматичних навантаженнях.

Кліматичні навантаження збільшують пошкоджуваність блоків зі СДП більше ніж у 2 рази в порівнянні з тривалим навантаженням при однакових рівнях тиску P (глибині занурення). Отже, значення коефіцієнту $K_{\Pi} = 2...2,3$.

4.9 Напружено-деформований стан блоку плавучості, що викликаний кристалізацією поглиненої води

В процесі експлуатації вода, що проникла в теплоізолюючий блок зі СДП (в пори і зруйновані мікросфери сферопластика), при замерзанні збільшується в об'ємі, що призводить до виникнення в матеріалі напружено-деформованого стану.

Згідно [132], в результаті кристалізації вода змінює густину з 1000 до 917 кг/м³. При цьому виконується співвідношення:

$$\rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} = \rho_{\text{л}} \cdot V_{\text{л}}, \quad (4.23)$$

де $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{л}}$ – густина води та льоду, відповідно, кг/м³;

$V_{\text{в}}$, $V_{\text{л}}$ – об'єм води та льоду, відповідно, м³.

Тоді:

$$\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{л}}} = \frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{в}}} = \frac{V_{\text{в}} (1 + \varepsilon_{\text{л}})^3}{V_{\text{в}}} = (1 + \varepsilon_{\text{л}})^3, \quad (4.24)$$

де $\varepsilon_{\text{л}}$ – відносне лінійне розширення (деформація) води при кристалізації, або

$$\varepsilon_{\text{л}} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{л}}}} - 1, \quad (4.25)$$

$$\varepsilon_{\text{л}} = \sqrt[3]{\frac{1000}{917}} - 1 = 0,0293.$$

Кристалізація води в структурі теплоізолюючого блоку зі СДП сприяє виникненню лінійних деформацій в блоці плавучості, середнє значення яких визначається виразом:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{ср}} = \varepsilon (1 - \Pi_{\text{л}} \cdot \eta) + \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}, \quad (4.26)$$

де $\varepsilon_{\text{сдп}} = 0$ – відносне лінійне розширення компонентів СДП в процесі кристалізації поглинутої води;

$\eta = 0,67$ – питома частка всіх повітряних включень в структурі блоку за (3.15);

$\Pi_{\text{л}}$ – пошкоджуваність зразка при кристалізації поглинутої води.

Таким чином:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{л}} \cdot \nu \cdot \Pi_{\text{л}}. \quad (4.27)$$

За математичною формою вираз (4.26) для середніх лінійних деформацій СДП, що викликані кристалізацією поглинутої води, аналогічний до виразу для температурних деформацій ε_T :

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T, \quad (4.28)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT – перепад між початковою $T_{\text{н}}$ і кінцевою температурою $T_{\text{к}}$, $^{\circ}\text{C}$.

При цьому, величині $\varepsilon_{\text{л}}$ відповідає α , а добутку $\nu \cdot \Pi_{\text{л}}$ – величина ΔT .

Зазначена аналогія дозволяє використовувати для розрахунку напружено-деформованого стану теплоізолюючого блоку, що виникає внаслідок кристалізації поглинутої води, рішення задачі термопружності [132].

Для зразків у вигляді довгого циліндра напружений стан відповідає плоскій деформації в площинах, що перпендикулярні до осі циліндра. В циліндричних координатах для цього випадку є три компоненти нормальних напружень (радіальне σ_r , тангенціальне σ_{θ} і осьове σ_z), а всі три деформації зсуву і дотичні напруження дорівнюють нулю в силу осьової симетрії і сталості умов в осьовому напрямку. Співвідношення між напруженнями і деформаціями, що викликані кристалізацією поглинутої води, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_{\theta} + \sigma_z)] \\ \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_{\theta})] \end{aligned} \right\}, \quad (4.29)$$

де ε_r , ε_{θ} і ε_z – деформації в радіальному, тангенціальному і осьовому напрямках;

$\mu = 0,3$ – коефіцієнт Пуассона СДП (за табл. 1.1);

E – модуль пружності СДП з урахуванням льоду у порах, МПа.

Для визначення значення модуля пружності блоку зі СДП з льодом у порах виконано оціночний розрахунок [111] за формулою :

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_{\text{СДП}}} \eta + \frac{1}{E_{\text{л}}} (1 - \eta) , \quad (4.30)$$

де $E_{\text{л}} = 1200 \dots 9000$ МПа модуль пружності льоду [128];

$E_{\text{СДП}} = 1800$ МПа модуль пружності СДП (за табл. 1.1).

Виконаний за (4.30) розрахунок показав, що $E = 1545 \dots 2446$ МПа, модуль пружності СДП потрапляє в діапазон цих значень, тому в подальших розрахунках приймається, що $E = E_{\text{СДП}} = 1800$ МПа.

При плоскої деформації $\varepsilon_z = 0$, тому:

$$\sigma_z = \mu(\sigma_\theta + \sigma_r) - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}} \cdot E . \quad (4.31)$$

З урахуванням (4.29) і (4.31) радіальне і тангенціальне напруження визначаються виразами:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-2\mu} \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_r + \frac{\mu}{1+\mu} \varepsilon_\theta - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) \right] , \quad (4.32)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-2\mu} \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_\theta + \frac{\mu}{1+\mu} \varepsilon_r - \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) \right] .$$

Деформації виражаються через переміщення за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} , \quad (4.33)$$

де $u(r)$ – радіальне переміщення.

Для осесиметричної плоскої деформації суттєвим є тільки рівняння рівноваги елементарного об'єму в радіальному напрямку:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_0}{r} = 0. \quad (4.34)$$

Підстановка (4.33) і (4.33) в (4.34) приводить рівняння до виду:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \frac{\partial \Pi_{\text{л}}(r)}{\partial r},$$

або

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (u \cdot r) \right] = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \frac{\partial \Pi_{\text{л}}(r)}{\partial r}. \quad (4.35)$$

Рішення диференційного рівняння (4.35) може бути записано у вигляді:

$$u = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{r} \int_{r_0}^r \Pi_{\text{л}}(r) \cdot r \partial r + c_1 r + \frac{c_2}{r}. \quad (4.36)$$

Підстановка (4.36) і (4.33) в (4.32) дає:

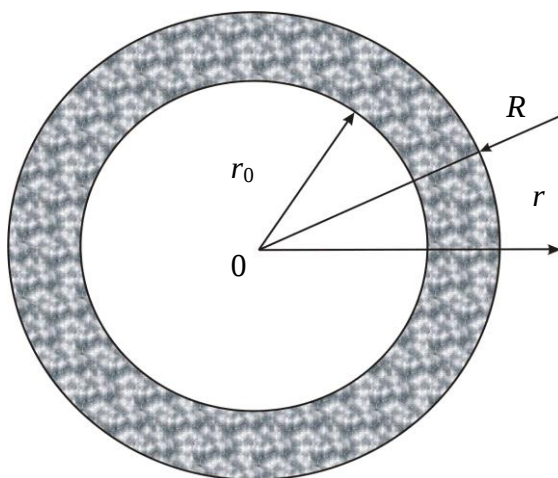
$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{E \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{1-\mu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{r_0}^r \Pi_{\text{л}}(r) \cdot r \partial r + \frac{c_1 E}{(1+\mu)(1-2\mu)} - \frac{c_2 E}{1+\mu} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_{\theta} &= \frac{E \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{1-\mu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{r_0}^r \Pi_{\text{л}}(r) \cdot r \partial r + \frac{c_1 E}{(1+\mu)(1-2\mu)} - \frac{c_2 E}{1+\mu} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{\varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \Pi_{\text{л}}(r) \cdot E}{1-\mu} \end{aligned} \right\}, \quad (4.37)$$

де c_1, c_2 – довільні постійні, які визначаються з граничних умов;

r_0 – радіус фронту «кристалізації» води.

Граничні умови формулюються наступним чином. Після впливу гідростатичного тиску P протягом часу τ розподіл пошкоджуваності $\Pi_{\text{л}}(r)$ (водопоглинання) в довгому циліндричному зразку може бути прийнято у відповідності з фізичною моделлю дифузії (4.14), тобто $\Pi_{\text{л}}(r; \tau) = \bar{\Pi}_{\text{л}}(r; \tau)$. При подальшому заморожуванні зразків (рис.4.13), кристалізація поглинутої води

починається на циліндричній поверхні і поширюється в радіальному напрямку вглиб блоку.



R – радіус циліндричного зразка;
 r_0 – радіус фронту «кристалізації» води
 Рисунок 4.13 – Поширення фронту кристалізації води,
 що поглинута зразком (поперечний переріз)

У зоні кристалізації води ($r_0 \leq r \leq R$) розподіл $\Pi_L(r; \tau)$ може бути прийнятий відповідно до фізичної моделі – рівняння дифузії (4.14), а в зоні ($0 \leq r \leq r_0$), де вода не замерзла, розподіл $\Pi_L(r; \tau) = 0$. Таким чином, граничні умови при кристалізації води в довгому циліндричному зразку з радіусом r_0 приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^H(r = R) &= 0 \\ \sigma_r^H(r = r_0) &= \sigma_r^E(r = r_0) \\ u_H(r = r_0) &= u_E(r = r_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

де σ_r^H , σ_r^E – радіальні напруження в зовнішніх і внутрішніх шарах матеріалу блоку;

u_H , u_E – радіальні переміщення в зовнішніх і внутрішніх шарах матеріалу блоку.

Записавши вирази (4.36) і (4.37) окремо для шарів з кристалізованою водою і для шарів де вода не замерзла, виконавши граничні умови (4.38), можна визначити довільні постійні c_1 , c_2 .

Кінцеві вирази для визначення напружень з урахуванням рівняння дифузії приймуть вигляд:

при $r_0 \leq r \leq R$

$$\sigma_\theta = -\frac{E \cdot \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{1-\mu} \cdot \left\{ -\frac{\Pi_{\text{П}}}{2} \left(\frac{r_0^2}{r^2} + \frac{r_0^2}{R^2} \right) + (\Pi_{\text{П}} - \Pi_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \exp(-\beta_n^2 \frac{D}{R^2} \tau)}{\beta_n^2} \right. \\ \left. \times \left[\frac{J_1(\beta_n \frac{r}{R}) \cdot \beta_n}{J_1(\beta_n)} - \frac{R}{r} \frac{J_1(\beta_n \frac{r}{R}) \cdot \beta_n}{J_1(\beta_n)} + \left(\frac{r_0}{R} + \frac{r_0 R}{r^2} \right) \cdot \frac{J_1(\beta_n \frac{r_0}{R})}{J_1(\beta_n)} - 1 \right] \right\} \\ \sigma_r = \frac{E \cdot \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{1-\mu} \cdot \left\{ \frac{\Pi_{\text{П}}}{2} \left(\frac{r_0^2}{r} - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - (\Pi_{\text{П}} - \Pi_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \exp(-\beta_n^2 \frac{D}{R^2} \tau)}{\beta_n^2} \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{R}{r} \frac{J_1(\beta_n \frac{r}{R})}{J_1(\beta_n)} - \left(\frac{r_0}{R} - \frac{r_0 R}{r^2} \right) \cdot \frac{J_1(\beta_n \frac{r_0}{R})}{J_1(\beta_n)} \right] \right\}, \quad (4.39)$$

при $0 \leq r \leq r_0$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{E \varepsilon_{\text{л}} \cdot \eta}{1-\mu} \cdot \left\{ \frac{\Pi_{\text{П}}}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - (\Pi_{\text{П}} - \Pi_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \exp(-\beta_n^2 \frac{D}{R^2} \tau)}{\beta_n^2} \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{r_0}{R} \cdot \frac{J_1(\beta_n \frac{r_0}{R})}{J_1(\beta_n)} \right] \right\}. \quad (4.40)$$

На рисунках 4.14 – 4.16 представлено епюри розподілу $\Pi(r; \tau)$ і напруження σ_r , σ_θ , які дозволяють оцінити зміну напруженого стану зразків у вигляді довгого циліндра в процесі кристалізації поглинутої води (для рівнів гідростатичного тиску $P=18, 22$ і 26 МПа і тривалості витримки під тиском τ : $e^0 = 1$ година та $e^6 = 403,4$ години).

Аналіз виразів (4.39) і (4.40), а також графіків (рис. 4.14–4.16) показує, що максимальні радіальні напруження σ_r за абсолютною величиною завжди менше тангенціальних напружень σ_θ .

Найбільші тангенціальні напруження виникають на початковому етапі замерзання води, що поглинута блоком (при $r_0 \rightarrow R$) і визначаються виразом:

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \frac{E \cdot \varepsilon_{\text{л}} \cdot P_{\text{п}} \cdot \eta}{1 - \mu}, \quad (4.41)$$

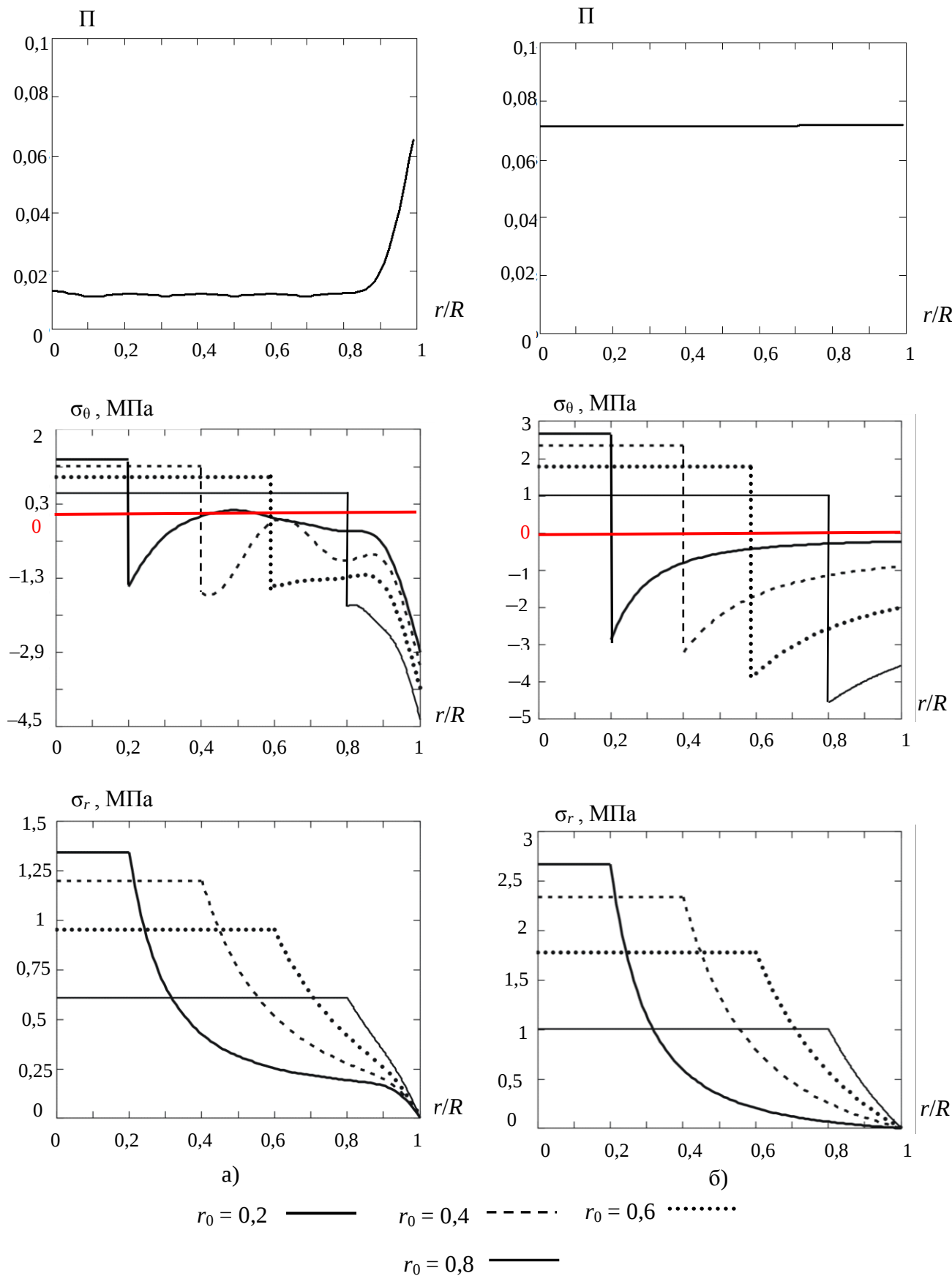
де $\varepsilon_{\text{л}} = 0,0293$ – відносне лінійне розширення (деформація) води при кристалізації;

$P_{\text{п}}$ – рівень пошкоджуваності блоку зі СДП.

Максимальні тангенціальні напруження при критичному рівні пошкоджуваності $P_{\text{кр}} = 30\%$ складають $\sigma_{\theta_{\max}} = 15,6$ МПа. Максимальні напруження, що викликані кристалізацією поглинутої води, лінійно залежать від граничної пошкоджуваності $P_{\text{п}}$, яка в свою чергу залежить від рівня гідростатичного тиску (4.13) при тривалих навантаженнях.

З урахуванням коефіцієнта концентрації напружень на сферичному включенні $K_\sigma = 2$ [69], максимальні напруження в матеріалі блоку зі СДП складуть 31,2 МПа, що знаходиться на рівні границі міцності матеріалу блоку зі СДП при стисканні 39 МПа (табл.1.1). Тобто, при критичному рівні пошкоджуваності $P_{\text{кр}} = 30\%$ можливо швидке руйнування блоку плавучості.

Проведені розрахунки за математичними моделями накопичення пошкоджень (4.6) і (4.16), показали, що при рівні пошкодження $P = 10\%$ функціональні властивості блоків зі СДП при роботі на глибинах 1800...2000 м гарантовано забезпечуються: впродовж 1,5...2 роки при тривалому гідростатичному навантаженні; при кількості циклів кліматичного впливу $N = 180...250$. При глибині експлуатації менше 1500 м строк експлуатації та кількість циклів занурень-спливань необмежені. Рекомендації щодо експлуатації блоків на цих глибинах представлено у Додатку Л.



Час навантаження τ : а) – ϵ^0 години; б) – ϵ^6 години

Рисунок 4.14 – Епюри пошкоджуваності $\Pi(r)$, радіальних σ_r і тангенціальних напружень σ_θ в циліндричному зразку в процесі кристалізації поглинутої води після дії тиску $P = 18$ МПа

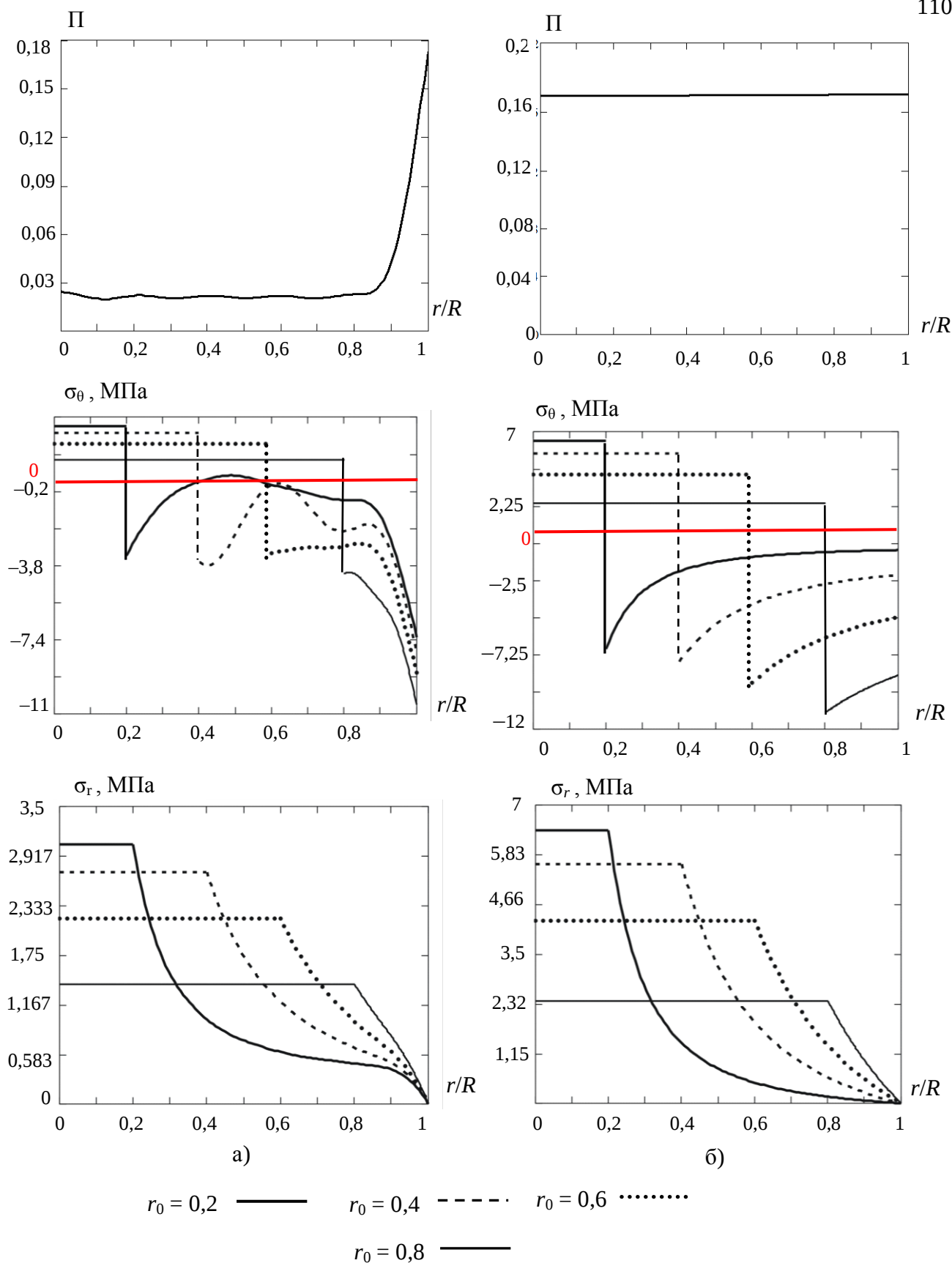
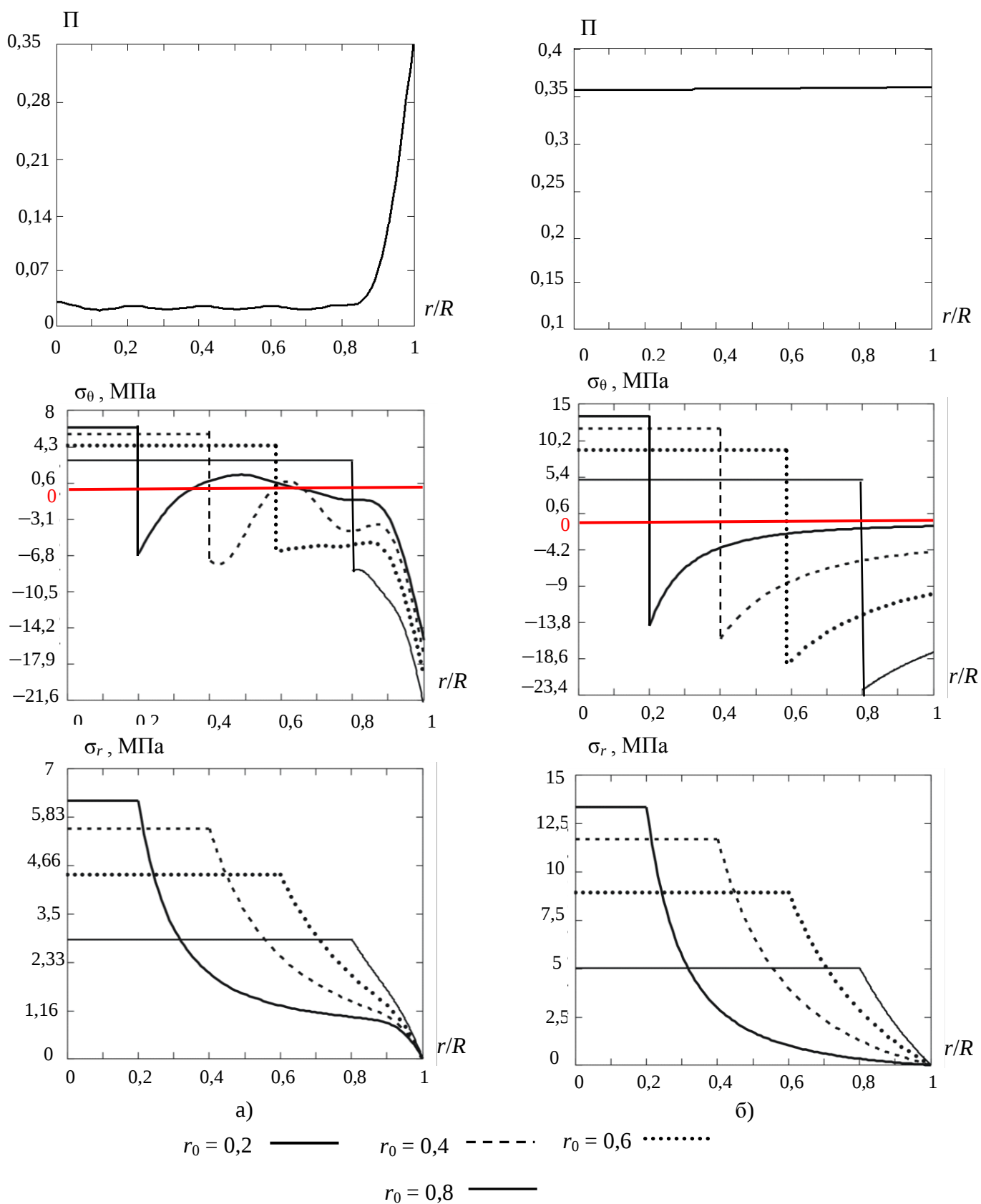


Рисунок 4.15 – Епюри пошкоджуваності $\Pi(r)$, радіальних σ_r і тангенціальних напружень σ_θ в циліндричному зразку в процесі кристалізації поглинутої води після дії тиску $P = 22$ МПа



Час навантаження τ : а) – ϵ^0 години; б) – ϵ^6 години

Рисунок 4.16 – Епюри пошкоджуваності $\Pi(r)$, радіальних σ_r і тангенціальних напружень σ_θ в циліндричному зразку в процесі кристалізації поглинутої води після дії тиску $P = 26$ МПа

Висновки за розділом 4

1. З урахуванням характеру руйнування блоків зі СДП побудовано математичну модель накопичення пошкоджень 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 під тиском. Результати розрахунку за розробленою моделлю і експериментальними даними добре співвідносяться між собою.

2. Розроблено математичну модель зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП з урахуванням накопичених пошкоджень при тривалому зануренні апарату. Перевірка результатів показала адекватність розробленої моделі.

3. Розроблено фізичну модель накопичення пошкоджень і представлено механізм проникнення води в структуру матеріалу блоку зі СДП за аналогією з явищем дифузії в поруватих середовищах. Фізична модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП показала досить добру відповідність результатів до експерименту. Коефіцієнт кореляції склав $K = 0,961$, такий же результат дає модель за Вейбуллом у вигляді логістичного закону розподілу.

4. Розроблена фізична модель за аналогією з явищем дифузії, дозволяє прогнозувати водопоглинання в блоках плавучості будь-якої конфігурації за експериментально встановленими параметрами: верхнім і нижнім рівнем пошкоджуваності P_n і P_0 , коефіцієнтом дифузії, так як фізичні константи процесу дифузії не залежить від геометрії тіла.

6. Розроблено математичну модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при циклічній дії гідростатичного тиску і кліматичного фактору, яка за аналогією з тривалим навантаженням, складена на основі логістичного розподілу, тільки в залежності від рівня гідростатичного тиску (глибина) і кількості циклів кліматичного впливу. Модель уточнено додатковим параметром для врахування впливу фазового переходу води, що накопичується в блоках при зануренні. Адекватність запропонованої моделі підтверджено за

критеріями Стюдента та Фішера (за дисперсією). Розрахований коефіцієнт кореляції $K=0,97$, що свідчить про достовірність моделі.

7. Розроблено математичну модель зміни теплоізоляційних властивостей блоків зі СДП з урахуванням накопичених пошкоджень при цикло-гідростатичних зануреннях апарату. Порівняння експериментальних і теоретичних значень пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності, підтверджує адекватність запропонованих моделей.

8. Встановлено коефіцієнт взаємозв'язку між математичними моделями накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП при тривалому і при кліматичному навантаженні, який становить $K_{\text{п}} = 2 \dots 2,3$. Отже кліматичні навантаження збільшують обсяг пошкоджень блоків зі СДП майже в 2 рази, що було підтверджено експериментально.

9. Розроблені математичні моделі накопичення пошкоджень, фізична модель накопичення пошкоджень та модель зміни коефіцієнту теплопровідності блоків плавучості зі СДП дозволяють прогнозувати ресурс роботи блоків в конструкції ПНА.

10. Отримані експериментальні результати проникнення води в зразки блоку, дозволили виконати аналіз морозостійкості СДП, який показав, що найбільші тангенціальні напруження виникають на початковому етапі замерзання води, що поглинута блоком (при $r_0 \rightarrow R$), і лінійно залежать від граничної пошкоджуваності $\Pi_{\text{п}}$, яка в свою чергу визначається рівнем гідростатичного тиску.

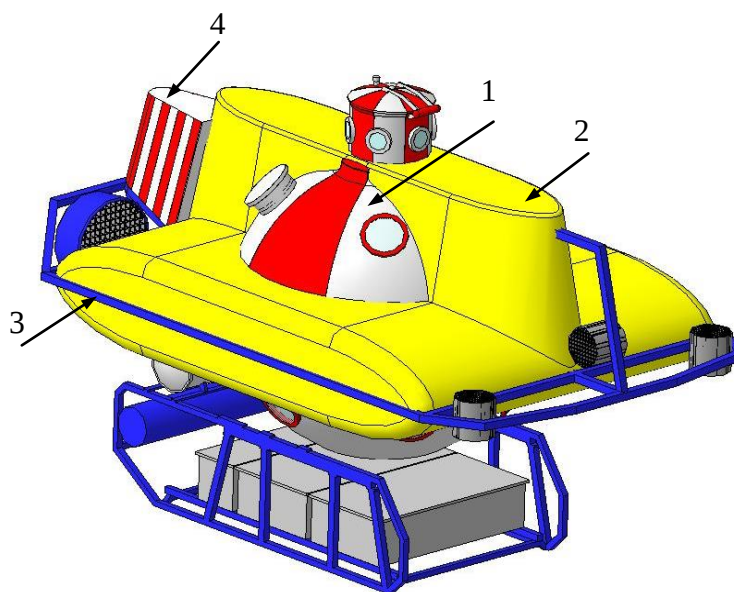
11. Максимальні тангенціальні напруження при критичному рівні пошкоджуваності ($\Pi_{\text{кр}} = 30 \%$) з урахуванням коефіцієнту концентрації напружень становлять $\sigma_{\theta \text{max}} = 31,2$ МПа, що підтверджує можливість використання теплоізолюючих блоків плавучості зі СДП в конструкціях апаратів, що працюють в «жорстких» кліматичних умовах при зануреннях на глибини 1500...2000 м континентального шельфу.

Основні наукові результати розділу опубліковано у [116, 117, 133–138].

РОЗДІЛ 5

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВОДНОГО НАСЕЛЕНОГО АПАРАТУ ТЕПЛОІЗОЛЮЮЧИМИ БЛОКАМИ ПЛАВУЧОСТІ

Згідно з основною метою дисертаційної роботи запропоновано удосконалити ПНА зі сферичним міцним корпусом, що експлуатується на глибинах 1500...2000 м, шляхом модифікації схеми розташування блоків плавучості, використовуючи блоки зі СДП у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу з метою забезпечення додаткової плавучості, збереження тепла всередині житлового відсіку ПНА при тривалих зануреннях в разі виникнення аварійних ситуацій. Удосконалення конструкції розглянуто на прикладі ПНА з розмірами сферичного міцного корпусу $R = 1,25$ м (рис.5.1).



- 1) – сферичний міцний корпус ПНА;
- 2) – легкий корпус ПНА;
- 3) – рама апарату;
- 4) – елементи плавучості, що кріпляться на раму

Рисунок 5.1 – Типова конструкція ПНА зі сферичним міцним корпусом

Вирішення поставленої задачі передбачає раціональний підхід до вибору оптимальної товщини блоків, визначення способу їх кріплення на поверхню

міцного корпусу, прогнозування втрати сил підтримання апарату і зниження температурного режиму всередині житлового відсіку за рахунок накопичених пошкоджень в блоках зі СДП при заданих експлуатаційних навантаженнях.

5.1 Визначення товщини блоків плавучості для теплоізоляції апарату

Вибір оптимальної товщини теплоізолюючих блоків зі СДП обумовлений наступними умовами:

- вільним зануренням ПНА на глибину;
- ефективним тепловим захистом населеного відсіку апарату;
- збереженням температури всередині ПНА в разі знеструмлення при аваріях.

5.1.1 Товщина блоків з умови вільного занурення апарату

Проектування баластної та крено-диферентної системи ПНА проводиться за правилами кораблебудування і відпрацьованими типовими технічними рішеннями [139].

Специфіка занурень ПНА передбачає безперешкодне спускання на глибину. Внаслідок низької густини, теплоізолюючі блоки зі СДП та основні елементи плавучості створюють апарату досить високу додаткову силу підтримання. Вільне занурення апарата здійснюється за умови:

$$F_{\text{тех. ср}} > F_{\text{в}} + F_{\text{пл}}, \quad (5.1)$$

де $F_{\text{тех. ср}}$ – сила ваги підводного апарату, Н;

$F_{\text{в}}$ – сила плавучості (підтримання) конструкції апарату, Н;

$F_{\text{пл}}$ – додаткова сила плавучості (підтримання), яку створюють теплоізолюючі блоки зі СДП та елементи плавучості, що кріпляться на раму, Н.

Сила тяжіння підводного апарату визначається за формулою:

$$F_{\text{тех. ср}} = m_{\text{тех. ср}} \cdot g, \quad (5.2)$$

де $m_{\text{тех. ср}} = 10\,000$ кг – маса ПНА з обладнанням в повітрі [88];

$g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Сила плавучості (підтримання) конструкції апарату визначається за формулою:

$$F_{\text{в}} = V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot g, \quad (5.3)$$

де $V_{\text{ап}} = 4/3 \pi R^3$ – об'єм сферичного міцного корпусу апарату, м³;

$R = 1,25$ м – зовнішній радіус міцного корпусу ПНА, що теплоізолюється блоками [88];

$\rho_{\text{в}} = 1025$ кг/м³ – густина морської води у Чорному морі [140].

Додаткова сила підтримання апарату складається із сили плавучості, що створюють блоки зі СДП товщиною δ в складі міцного корпусу апарату – $F_{\text{СДП}}$ та від дії сили основних елементів плавучості, що кріпляться на раму – $F_{\text{б}}$ і розраховується за формулою:

$$F_{\text{пл}} = F_{\text{СДП}} + F_{\text{б}}. \quad (5.4)$$

В ПНА в якості основних елементів плавучості використовується легкий заповнювач масою 558 кг з густиною $\rho_{\text{б}} = 500$ кг/м³ [88]. Запропоновано зменшити масу легкого заповнювача на 30 % (до $M_{\text{б}} = 400$ кг) за рахунок використання додаткових теплоізолюючих блоків зі СДП. Отже, сила плавучості, що створює легкий заповнювач, визначається з виразу:

$$F_{\text{б}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}) \cdot g \cdot V_{\text{б}}, \quad (5.5)$$

де $\rho_{\text{б}} = 500$ кг/м³ – густина легкого заповнювача [88];

$V_{\text{б}}$ – об'єм, що займає легкий заповнювач в конструкції ПНА.

Об'єм, що займає легкий заповнювач розраховується за формулою:

$$V_{\text{б}} = \frac{M_{\text{б}}}{\rho_{\text{б}}}. \quad (5.6)$$

Теплоізолюючі блоки зі СДП товщиною δ створюють силу плавучості, що визначається за формулою:

$$F_{\text{СДП}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_0) \cdot S_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot g, \quad (5.7)$$

де $\rho_0 = 480 \text{ кг/м}^3$ – початкова густина теплоізолюючого блоку зі СДП;

$S_{\text{пов}} = 4\pi R^2$ – площа поверхні міцного корпусу апарата, м^2 ;

δ – товщина блоку зі СДП, м;

Використовуючи вирази (5.1) – (5.7), товщина блоку становитиме:

$$\delta < \frac{m_{\text{тех.сп}} - V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} - (\rho_{\text{в}} - \rho_0) \frac{M_0}{\rho_0}}{(\rho_{\text{в}} - \rho_0) \cdot S_{\text{пов}}}. \quad (5.8)$$

Розрахунки за (5.8) показали, що товщина теплоізолюючого блоку зі СДП для ПНА повинна бути $\delta < 0,20 \text{ м}$.

5.1.2 Товщина блоків з умови критичного діаметру ізоляції

При проектуванні теплоізоляційного комплексу для сферичної поверхні міцного корпусу апарата необхідно враховувати значення критичного діаметру ізоляції. При якому загальний термічний опір стінки збільшується, що призводить до зменшення теплового потоку, тобто теплові витрати в навколишнє середовище знижуються. Для ефективної роботи теплоізоляційного комплексу необхідно, щоб критичний діаметр ізоляції був менше зовнішнього діаметру поверхні, що ізолюється.

Критичний діаметр для сферичної поверхні міцного корпусу розраховується за формулою [141]:

$$d_{\text{кр}} = \frac{4 \cdot \lambda_0}{\alpha_3}, \quad (5.9)$$

де $\lambda_0 = 0,085 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{К)}$ – коефіцієнт теплопровідності блоків зі СДП;

α_3 – коефіцієнт тепловіддачі між зовнішньою поверхнею міцного корпусу апарата і оточуючим середовищем, Вт/(м²·°K).

Визначення коефіцієнту тепловіддачі α_3 між зовнішньою поверхнею міцного корпусу апарата і оточуючим середовищем здійснюється використанням рішення задачі конвективного теплообміну.

При зануреннях ПНА на глибини корпус апарату омивається підводними течіями. Максимальна швидкість підводних течій Чорного моря на глибинах 1500–2000 м в середньому досягає $\omega = 3$ м/с. Температура морської води на цих глибинах коливається від 0 до +6 °C [142, 143], з урахуванням найгірших умов, температура води за бортом приймається $T_3=0$ °C.

Режим обтікання поверхні апарату розраховується за числом Рейнольдса [140, 141]:

$$Re = \frac{\omega \cdot D_n}{\nu}, \quad (5.10)$$

де $D_n = 2R = 2,5$ м – зовнішній діаметр корпусу ПНА [88];

$\nu = 1,789 \cdot 10^{-6}$ м²/с – кінематична в'язкість морської води при $T_3=0$ °C [140].

Отримане число Рейнольдса склало $Re=4,2 \cdot 10^6$, отже, режим течії вздовж поверхні апарату турбулентний.

Сферична поверхня апарата приймається у вигляді одиночної труби з вимушеним поперечним обтіканням потоками води. Значення коефіцієнта тепловіддачі для якої, з урахуванням числа Рейнольдса, визначається за критеріальним рівнянням Нуссельта [141]:

$$Nu_{жкл} = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}, \quad (5.11)$$

де $Pr = 13,67$ – число Прандтля для води при температурі $T_3=0$ °C [141].

Передбачається, що температура стінки корпусу апарату, яка омивається морською водою відповідає температурі води, тобто $Pr_{ж}=Pr_{ст}$, тоді критеріальне рівняння Нуссельта має вигляд:

$$Nu_{жсl} = 0,25 \cdot (4,2 \cdot 10^6)^{0,6} \cdot 13,67^{0,38} \cdot 1^{0,25}$$

$$Nu_{жсl} = 6,356 \cdot 10^3.$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі поблизу зовнішньої поверхні корпусу апарату розраховується за формулою [141]:

$$\alpha_3 = \frac{Nu \cdot \lambda_H}{D_H}, \quad (5.12)$$

де $\lambda_H = 0,551$ Вт/(м·°К) коефіцієнт теплопровідності морської води при температурі $T_3 = 0$ °С [141].

$$\alpha_3 = \frac{6,356 \cdot 10^3 \cdot 0,551}{2,5},$$

$$\alpha_3 = 1400 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°К)}.$$

Отже, критичний діаметр ізоляції становить:

$$d_{кр} = \frac{4 \cdot 0,085}{5 \cdot 10^3},$$

$$d_{кр} = 24,28 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}.$$

Значення критичного діаметру ізоляції $d_{кр}$ менше зовнішнього діаметру поверхні міцного корпусу D_H , що ізолюється ($24,28 \cdot 10^{-5} \text{ м} < 2,5 \text{ м}$). Отже, теплові втрати в навколишнє середовище при застосуванні теплоізолюючих блоків зі СДП з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_0 = 0,085$ Вт/(м·°К) застосовувати доцільно.

5.1.3 Товщина блоків з умови збереження температури всередині апарату при аваріях

Однією з проблем, що виникає в непередбачених аварійних ситуаціях на борту ПНА, є порушення електропостачання. Припинення електрообігріву ПНА на довгий час, веде до поступового охолодження внутрішнього простору.

Тривале перебування екіпажу при температурі нижче $T_{кр} = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ небезпечно для людини (становить загрозу переохолодження організму [25, 52]), тому дана температура прийнята за критичну.

При розв'язанні температурної задачі з охолодження внутрішнього простору ПНА враховувалося, що коефіцієнт теплопровідності міцного корпусу апарату ($\lambda_{ме} \approx 35\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{К)}$) [140]) набагато перевищує теплопровідність блоків зі СДП ($\lambda_0 = 0,085\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{К)}$), тобто металевий корпус є провідником і на процес теплозахисту істотно не впливає. Тому, приймається, що охолодження відбувається шляхом теплопередачі між внутрішнім простором апарату і теплоізолюючою стінкою блоку, які знаходяться в тепловому контакті між собою.

З огляду на те, що температура зовнішньої поверхні теплоізолюючих блоків відповідає температурі води, що омиває апарат і протягом усього процесу охолодження залишається постійною, рішення теплової задачі для сферичної форми корпусу (рис.5.2), може бути зведено до граничних умов четвертого роду для сфери, що поміщена в рідке середовище [145].

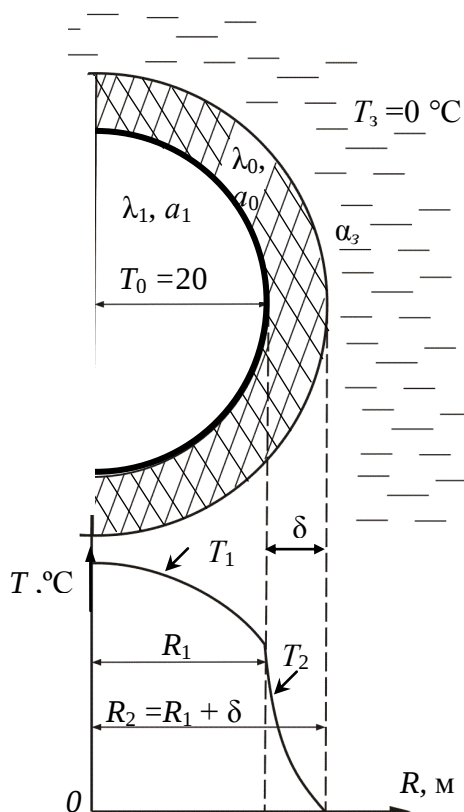


Рисунок 5.2 – Температурне поле системи двох тіл

Розподіл температур в будь-який момент часу в такій системі зводиться до граничних умов [144]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial[rT_1(r; \tau)]}{\partial \tau} &= a_1 \frac{\partial^2[rT_1(r; \tau)]}{\partial r^2} & (\tau > 0; \quad 0 < r < R_1), \\
 \frac{\partial[rT_2(r; \tau)]}{\partial \tau} &= a_2 \frac{\partial^2[rT_2(r; \tau)]}{\partial r^2} & (\tau > 0; \quad R_1 < r < R_2), \\
 T_1(r; 0) &= T_0, \quad T_2(r; 0) = 0, \\
 T_1(R_1; \tau) &= T_2(R_1; \tau), \quad K_\lambda \frac{\partial T_1(R_1; \tau)}{\partial r} = \frac{\partial T_2(R_1; \tau)}{\partial r}, \\
 T_2(R_2; \tau) &= 0, \quad T_1(0; \tau) \neq \infty.
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Результатом розв'язання рівняння (5.13) операційним методом буде незліченна безліч коренів, що визначаються з характеристичного рівняння:

$$\left[K_a^{1/2} \mu \cdot \operatorname{ctg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu + 1 \right] + K_\lambda (\mu \cdot \operatorname{ctg} \mu - 1) = 0, \tag{5.14}$$

$$\text{де } K_a = \frac{a_1}{a_2}, \quad K_R = \frac{R_2}{R_1}.$$

Дане рівняння розбивається на два:

$$\sin \mu = 0, \quad \sin \sqrt{K_a (K_R - 1)} \mu = 0 \tag{5.15}$$

З урахуванням того, що вираз $\sin \sqrt{K_a (K_R - 1)} \mu = 0$ не дорівнює відношенню цілих чисел, то рішення для визначення безрозмірної температури всередині апарату згідно [144] набуде вигляду:

$$\theta = \frac{T_1(x; \tau)}{T_0} = \frac{2R_2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\varphi(\mu_n)} \sin \mu_n \frac{r}{R_1} \sin \mu_n \sin \mu_n \sqrt{K_a} (K_R - 1) \exp(-\mu_n^2 F_0), \tag{5.16}$$

де

$$\varphi(\mu_n) = K_\varepsilon \cdot \sin^2 \sqrt{K_a} \mu_n (K_R - 1) + \sqrt{K_a} \cdot (K_R - 1) \cdot \mu_n \sin^2 \mu_n + \frac{1 - \sqrt{K_a} \cdot K_\varepsilon}{\sqrt{K_a} \cdot \mu_n} \cdot \sin^2 \mu_n \times \\ \times \sin^2 \sqrt{K_a} \cdot (K_R - 1) \cdot \mu_n$$

$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_0 \sqrt{K_a}} - \text{критерій, що характеризує теплову активність внутрішнього}$$

простору апарату по відношенню до зовнішньої теплоізоляції;

$$K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - \text{критерій, що характеризує відносну теплопровідність системи}$$

(куля в кулі);

n – кількість коренів членів ряду;

$$F_0 = \frac{a_1 \cdot \tau_{ox}}{R_1^2} - \text{критерій Фур'є};$$

τ_{ox} – час зниження температури всередині апарату, с;

$\lambda_1 = 0,0259 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря при початковій температурі всередині апарату $T_0 = 20^\circ\text{C}$ [140];

$\lambda_0 = 0,085 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$ – початковий коефіцієнт теплопровідності блоків зі СДП;

$a_1 = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт температуропровідності повітря при початковій температурі всередині апарату $T_0 = 20^\circ\text{C}$ [141];

$a_0 = 1,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ – початковий коефіцієнт температуропровідності блоків зі СДП;

$R_1 = 1 \text{ м}$ – внутрішній радіус міцного корпусу апарату [88];

$R_2 = 1,25 + \delta$ – зовнішній радіус міцного корпусу апарату з урахуванням товщини теплоізолюючого блоку.

Таким чином, рішення (5.16) може бути застосоване для визначення часу охолодження τ_{ox} внутрішнього простору підводного засобу [145, 146], що не обігрівається, з початкової температури $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до критичної $T_{кр} = 10^\circ\text{C}$ при теплоізоляції міцного корпусу блоками плавучості зі СДП товщиною δ .

Характеристичне рівняння (5.16) для відносної температури суттєво залежить від часу охолодження τ_{ox} і визначається за критерієм Фур'є [89]. Розраховане значення критерію Фур'є стає малою величиною через час $\tau_{ox} > 4$ годин. Отже, на початкових стадіях процесу теплообміну, при вирішенні

рівняння (5.16) не можна обмежитися одним членом ряду. При виконанні розрахунків встановлено, що при $n=12$ членах ряду рішення (5.16) дає стабільний результат і забезпечує необхідну точність.

Розраховано час охолодження внутрішнього простору ПНА від початкової температури $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T_{\text{кр}}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, при зануренні у воду з температурою $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунки виконувались за (5.16) при товщині теплоізолюючих блоків δ : 0,1; 0,12; 0,15; 0,18; 0,2 м. Результати розрахунків представлено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Час досягнення критичної температури $T_{\text{кр}}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ всередині апарату при різних товщинах теплоізолюючих блоків зі СДП

Товщина блоку зі СДП δ , м	0,1	0,12	0,15	0,18	0,2
Час охолодження $\tau_{\text{ох}}$, год	8	13	15	17	18

Оптимальна товщина δ теплоізолюючого блоку зі СДП повинна вибиратися з умови зниження температури всередині апарату при аварії до $T_{\text{кр}}=+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (безпечної для людини) не менше ніж через 10–15 годин.

Дотримуючись умови вільного занурення апарату і збереження температури всередині корпусу не менше ніж 15 годин для ліквідації аварії, товщину теплоізолюючого блоку зі СДП для ПНА прийнято $\delta=0,15$ м.

Для оцінки ефективності використання додаткових блоків плавучості зі СДП в конструкції апарату у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу, виконано розрахунок теплового потоку через сферичну поверхню за формулою [141]:

$$Q = \frac{(T_0 - T_3) \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_s \cdot d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) + \frac{1}{2\lambda_0} \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_3 \cdot d_3^2}}, \quad (5.17)$$

де $\alpha_s=7\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{K})$ коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою стінкою корпусу апарату і навколишнім середовищем (для замкнених приміщень за [147, 148]);

$\lambda=35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$ коефіцієнт теплопровідності міцного корпусу ПНА [141].

$\lambda_0=0,085 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$ коефіцієнт теплопровідності теплоізолюючої обшивки міцного корпусу (блоки зі СДП).

$d_1 = 2 R_1 = 2 \text{ м}$ – внутрішній діаметр міцного корпусу апарату;

$d_2 = 2 R_2 = 2,5 \text{ м}$ – зовнішній діаметр міцного корпусу апарату;

$d_3 = d_2 + 2\delta = 2,8 \text{ м}$ – зовнішній діаметр міцного корпусу апарату з

урахування товщини теплоізолюючих блоків;

Виконаний розрахунок показав, що теплові витрати в навколишнє середовище в початковий момент становлять 0,26 кВт.

Тепловий потік через неізольовану поверхню міцного корпусу ПНА визначаються за формулою [141]:

$$Q = \frac{(T_0 - T_3) \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_B \cdot d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) + \frac{1}{\alpha_3 \cdot d_2^2}}. \quad (5.18)$$

Розрахунок за (5.17) показав, що $Q=1,7 \text{ кВт}$. Отже, використання теплоізолюючих блоків зі СДП зменшує тепловий потік майже на 75 % і доцільність їх використання очевидна.

Розрахована за (5.6) сила плавучості, що створюють блоки зі СДП густиною $450 \dots 500 \text{ кг/м}^3$ з товщиною $\delta=0,15 \text{ м}$ в складі міцного корпусу апарату, на 25...30 % більша за силу плавучості, що створюють блоки зі звичайного сферопластика густиною $600 \dots 650 \text{ кг/м}^3$ при тій же товщині.

5.2 Кріплення блоків плавучості на поверхню апарату

Виготовлення блоків плавучості зі СДП для теплоізоляції міцного сферичного корпусу ПНА вимагає раціонального підходу до їх формування і подальшого кріплення.

Принципова технологія виробництва блоків полягає в заливанні у прес форму спеціально підготовленої композиції з мікросфер марки МСО–119 і епоксидного сполучника (див. табл 1.3) з подальшим спінюванням у вакуумі.

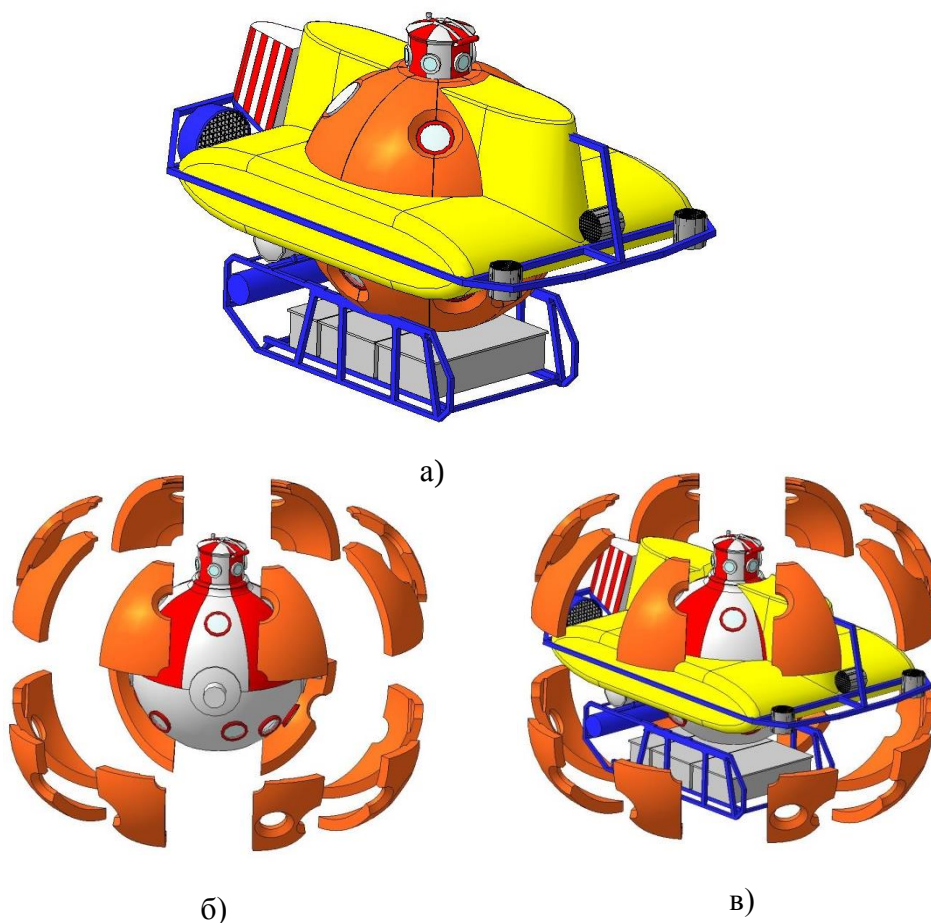
З урахуванням габаритних розмірів вакуумної камери і раціонального підходу до технологічного процесу виготовлення блоків, пропонується розбити всю поверхню обшивки корпусу апарату за висотою на 8 рівних секцій. У свою чергу, кожна секція розбивається на 2 частини. Таким чином, вся теплоізолююча поверхня апарату складається з 16 блоків однакового типорозміру (рис.5.3).

Кріплення теплоізолюючих блоків на поверхню міцного корпусу апарату виконується шляхом приклеювання за допомогою з'єднувального компаунду. Компаунд є перехідною зоною між металевим корпусом та теплоізолюючими блоками зі СДП, тому не повинен викликати концентрацію напружень між ними.

Використання епоксидних смол гарячого отвердіння в якості з'єднувального компаунду не бажано, так як отримане в результаті склеювання з'єднання матиме малу піддатливість, що може привести до розтріскування стиків та відшарування блоків від корпусу.

Відповідно, основними вимогами до компаунду є: достатня адгезія до поверхонь, що з'єднуються, висока когезійна міцність при достатній піддатливості, технологічність та легкість нанесення товстим шаром 1,5–3 мм.

Виходячи з цього, рекомендовано застосування епоксидного компаунду марки УП 5–234 холодного твердіння, який відповідає вище згаданим вимогам [149, 150]. Крім того, даний компаунд добре працює у водному середовищі під тиском, є стійким до циклічних, статичних та ударних навантажень, а отримане при склеюванні з'єднання має високу міцність в поєднанні з еластичністю. Характеристики компаунду УП 5–234 наведено в табл. 5.2.



- а) – апарат з теплоізолюючими блоками плавучості;
 б) – положення блоків плавучості відносно міцного корпусу;
 в) – положення блоків плавучості відносно несучої конструкції апарату

Рисунок 5.3 – ПНА з теплоізолюючими блоками зі СДП

Таблиця 5.2 – Характеристики епоксидного компаунду марки УП 5–234 [149]

Характеристики	Одиниця вимірювання	Значення
Час желетинізації	год/°С	4/20
Час отвердіння	год/°С	7/20
Руйнуюче напруження при розтягуванні	МПа	21
Відносне подовження при розриві	%	60
Водопоглинання	%	0,5
Границя міцності клейового з'єднання – при зсуві	МПа	17

5.3 Прогнозування характеристик блоків плавучості в умовах експлуатації

Шляхом аналізу проведених досліджень та розрахунків можна зробити висновок, що блоки плавучості зі СДП перспективні в якості теплоізоляції міцного корпусу ПНА, що тривало працюватиме на глибинах 1500–2000 м в умовах низьких температур 0...4 °С та при циклічно-гідростатичному навантаженні, в режимах занурення-всплиття апарату на поверхню при температурах повітря нижче ніж 0 °С.

Проведені дослідження [116, 117] показали, що обсяг накопичених пошкоджень в блоках зі СДП при кліматичному впливі більше у 2 рази в порівнянні з тривалим гідростатичним навантаженням при постійному рівні тиску P (глибина занурення) та тривалості навантаження $\tau = \tau_k \cdot N$ (N – кількість циклів кліматичного впливу).

Теплопровідність блоків залежить, в основному, від рівня накопичених пошкоджень, а умови їх утворення (глибина та тривалість занурення, цикли занурення-сплиття) суттєво не впливають, визначаючи тільки інтенсивність процесу.

Відповідно, при прогнозуванні терміну експлуатації блоків зі СДП в конструкції ПНА при надводному режимі з низькими температурами достатньо встановити рівень пошкоджень, що накопичено за час тривалих навантажень та виконати перерахунок для цикло-кліматичного впливу.

Умови експлуатації апарату визначаються проектними даними, тому обсяг накопичення пошкоджень в блоках плавучості зі СДП може бути спрогнозований на етапі проектування конструкції.

Блоки плавучості зі СДП у вигляді суцільної шкарлупи розташовуються симетрично відносно міцного корпусу апарату і при накопиченні в процесі експлуатації пошкоджень зберігають свої початкові розміри та конфігурацію. Це забезпечує остійність апарату при частковому накопиченні пошкоджень в блоках плавучості.

Отже, при проектуванні необхідно враховувати зміну лише диференту та втрату плавучості апарату, а також зміну температурного режиму всередині міцного корпусу. Також, при розміщенні закладних елементів плавучості, необхідно врахувати зміну сили підтримання, що створюють додаткові блоки зі СДП у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу апарата.

Проведені дослідження та отримані математичні моделі [116, 117, 135] дозволяють на стадії проектуванні ПНА розрахувати середній обсяг накопичених пошкоджень в блоках плавучості зі СДП у відповідності до заданих технічних вимог.

Встановлення обсягу накопичених пошкоджень дозволить визначити зміну густини і коефіцієнта теплопровідності блоків зі СДП, розрахувати зменшення сили підтримання та встановити температурний режим всередині міцного корпусу апарату.

Розроблений метод проектування, по-перше, не вимагає великої кількості довготривалих експериментальних досліджень. По друге, може використовуватися, як на початкових стадіях проектування теплоізоляційної обшивки підводних об'єктів, так і для оцінювання ресурсу роботи блоків, якщо відома історія занурень апарату (за судновим журналом). Початкові дані встановлюються у відповідності до технічних вимог при проектуванні ПНА:

- робочий тиск при глибині занурення апарату P , МПа;
- тривалість знаходження апарату на глибині τ , год;
- кількість циклів N занурень-підйомів апарату на поверхню в умовах температур повітря нижче за $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Математична модель накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при тривалих гідростатичних навантаженнях, що представлена в [116] і фізична модель пошкоджуваності блоків, що враховує масштабний фактор [135], дозволяють розрахувати середню пошкоджуваність блоків зі СДП товщиною $\delta=0,15\text{ м}$ в складі конструкції ПНА за формулою:

$$\bar{\Pi}_D(\tau; P) = \Pi_{\Pi} - (\Pi_{\Pi} - \Pi_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \cdot \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right], \quad (5.19)$$

де Π_{Π} , Π_0 – верхній та нижній рівень пошкоджуваності блоків, що розраховуються за формулами:

$$\Pi_{\Pi}(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[\bar{a} + \bar{b}P + \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{(P - P_{\text{кр}})^2} \right]} ,$$

$$\Pi_0(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[\bar{c} + \bar{b}P_{\text{кр}} - \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2P_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{(P - P_{\text{кр}})^2} \right]} ,$$

$\bar{a} = 5,68$; $\bar{b} = -0,196 \text{ МПа}^{-1}$; $\bar{c} = 8,36$ – емпіричні коефіцієнти;

$P_{\text{кр}} = 26 \text{ МПа}$ рівень критичного тиску для блоків зі СДП;

μ_n – корені функції Бесселя;

n – кількість коренів членів ряду;

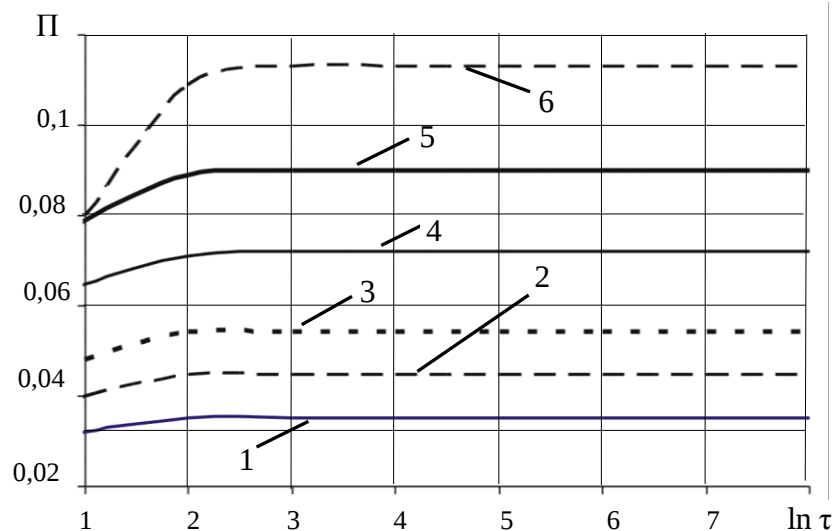
$D = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт дифузії для блоків зі СДП [135];

$R = \delta = 0,15 \text{ м}$ товщина блока зі СДП для теплоізоляції міцного корпусу ПНА.

Криві накопичення пошкоджень в блоках зі СДП при тривалих зануреннях апарату $\tau = 1000$ годин на глибини 1500...2000 м ($P = 15...20 \text{ МПа}$) представлені на рис.5.4.

В умовах кліматичних навантажень для аналогічних глибин і кількості циклів $N = 1000$ ($\tau_k = 1000 \text{ год}$), згідно зі встановленим коефіцієнтом взаємного зв'язку $K_{\Pi} = 2...2,3$ та за результатами досліджень [117], пошкоджуваність в блоках зі СДП збільшиться вдвічі у порівнянні з тривалими зануреннями.

Аналіз процесу накопичення пошкоджень показує, що руйнування блоків СДП практично припиняється після 12 годин. Результати розрахунків накопичення пошкоджень при тривалих і кліматичних навантаженнях представлено в табл. 5.3.



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 5.4 – Пошкоджуваність в блоках плавучості зі СДП при тривалому зануренні апарату $\tau = 1\text{--}1000$ год на різні глибини

Таблиця 5.3 – Прогнозування зміни плавучих і теплоізоляційних властивостей комплекта блоків зі СДП товщиною $\delta = 0,15$ м

Робочий тиск P , МПа	Пошкоджуваність, Π^*	Густина теплоізоляційних блоків* ρ , кг/м ³	Втрата сили плавучості теплоізоляційних блоків, ΔF , кН	Коеф. теплопровідності*, λ , Вт/(м·°К)
15	0,035 / 0,07	0,50 / 0,52	1,4 / 1,7	0,1 / 0,112
16	0,045 / 0,09	0,51 / 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	0,55 / 0,62	2,7 / 4,6	0,132 / 0,15

Примітка: * довготривалі навантаження / кліматичні навантаження

Аналіз процесу накопичення пошкоджень показує, що руйнування блоків СДП практично припиняється після 12 годин. Результати розрахунків накопичення пошкоджень при тривалих і кліматичних навантаженнях представлено в табл. 5.3.

Густина блоків зі СДП з урахуванням накопиченої пошкоджуваності $\bar{\Pi}_d$ при тривалих гідростатичних навантаженнях розраховується за формулою:

$$\bar{\rho}(\tau; P) = \rho_0 + \bar{\Pi}_d \cdot \rho_{\epsilon} \cdot K_{cmp}, \quad (5.20)$$

де $\rho_{\epsilon} = 1025 \text{ кг/м}^3$ – густина води у Чорному морі [140];

K_{cmp} – коефіцієнт структури СДП.

Коефіцієнт структури СДП залежить від поруватості, щільності заповнення та властивостей мікросфер і розраховується за формулою:

$$K_{cmp} = \left[(1 - \nu) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{mk}}{\rho_{st}} \right) + \nu \right], \quad (5.21)$$

де $\nu = 0,3$ – коефіцієнт поруватості, характеризує відносний обсяг пор, що вводиться в основу СДП при виготовленні;

$\chi = 0,603$ – коефіцієнт заповнення СДП мікросферами;

$\rho_{st} = 2500 \text{ кг/м}^3$ густина скла, з якого виготовлені мікросфери [113].

$\rho_{mk} = 284 \text{ кг/м}^3$ густина мікросфер марки МСО–119 [58].

В результаті розрахунків встановлено, що $K_{cmp} = 0,65$. Зміну густини блоків зі СДП представлено в табл.5.3.

Густина блоків зі СДП з урахуванням накопиченої пошкоджуваності при кліматичних навантаженнях визначається за формулою:

$$\bar{\rho}(\tau; N) = \rho_0 + 2 \cdot \bar{\Pi}_d \cdot \rho_{\epsilon} \cdot K_{cmp}. \quad (5.22)$$

Коефіцієнт теплопровідності блоків зі СДП з урахуванням накопиченої пошкоджуваності $\bar{\Pi}_d$ при тривалих занурення апарату визначається за формулою [116]:

$$\lambda_T(\tau; P) = \lambda_0 + b_{1T} \cdot \bar{\Pi}_d + c_{1T} \cdot \bar{\Pi}_d^2, \quad (5.23)$$

де $b_{1T} = 0,338 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$; $c_{1T} = -0,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$.

При кліматичному навантаженні блоків зміна коефіцієнта теплопровідності розраховується за [117]:

$$\lambda_k(N; P) = a_{1k} + 2b_{1k} \cdot \bar{P}_d + c_{1k} \cdot (2\bar{P}_d)^2, \quad (5.24)$$

де $a_{1k} = 0,075 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$; $b_{1k} = 0,471 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$; $c_{1k} = -0,278 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$.

Зміна густини блоків, що облицьовують міцний корпус, приведе до зміни сили плавучості, що визначається за виразом:

$$\bar{F}_{\text{СДП}} = (\rho_v - \bar{\rho}) \cdot S_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot g, \quad (5.25)$$

де $\bar{\rho}$ – густина блоків зі СДП, що накопичили пошкодження, кг/м^3 .

Тоді, втрата сили плавучості блоків розраховується за формулою:

$$\Delta F = F_{\text{СДП}} - \bar{F}_{\text{СДП}}. \quad (5.26)$$

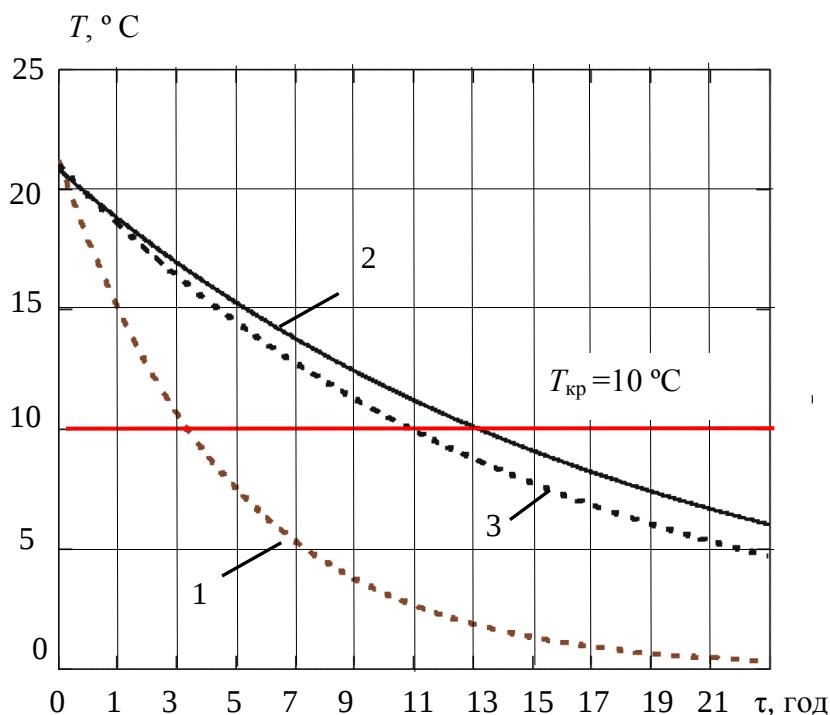
Розрахунок обсягу накопичених пошкоджень і зміни сили плавучості теплоізолюючих блоків зі СДП в складі конструкції ПНА в експлуатаційних умовах проводився без урахування впливу бічних поверхонь блоків, що з'єднані між собою епоксидним компаундом. Ці поверхні вважаються вільними, отже – помилку зроблено в безпечну сторону. Результат прогнозування втрати сили плавучості блоків зі СДП в умовах тривалих і цикло-гідростатичних навантажень на глибинах 1500...2000 м представлено в табл.5.3.

Втрати сили плавучості теплоізолюючих блоків зі СДП, в наслідок накопиченої пошкоджуваності, повинні коригуватися за допомогою баластної та крено-диферентної системи ПНА.

З урахуванням (5.16) спрогнозовано зміну температури всередині ПНА без теплоізолюючих блоків, результат представлено у вигляді кривої 1 (рис.5.4).

При використанні блоків СДП у вигляді суцільної шкарлупи, що накопичили пошкодження під час тривалих занурень апарату, процес охолодження описується кривою 2. Максимальний рівень пошкоджень при

кліматичному навантаженні блоків досяг $\Pi=0,23$ (для $P=20$ МПа), зниження температури показано кривою 3 (рис.5.4).



- 1) – без теплоізолюючих блоків;
 2) – з блоками, що накопили пошкодження при тривалих зануреннях;
 3) – з блоками, що накопили пошкодження при кліматичних навантаженнях

Рисунок 5.4 – Зміна температури всередині апарату від часу

Аналіз рис.5.4 показує, що температура в житловому відсіку апарату без облицювання блоками зі СДП знижується до критичної $T_{кр}=10^{\circ}\text{C}$ за 3 години, а при використанні блоків зі СДП – за 11...15 годин при накопичених експлуатаційних пошкодженнях. Отже, у першому наближенні можна оцінити, що автономність роботи ПНА підвищується у 3 рази.

Таким чином, процес пошкодження блоків зі СДП при експлуатації на глибинах 1500...2000 м має місце та впливає на теплозахисні властивості. Однак, в порівнянні з не облицьованим міцним корпусом, використання блоків зі СДП у вигляді суцільної шкарлупи забезпечує тепловий захист житлового відсіку ПНА, що доводить доцільність їх використання.

Методику проектування підводного апарату з врахуванням зменшення сили плавучості блоків зі СДП у результаті накопичених експлуатаційних пошкоджень представлено у додатку К, а її блок схему на рис.5.5.

5.4 Економічний розрахунок собівартості блоків плавучості

Ефективність використання теплоізолюючих блоків плавучості зі СДП в складі конструкції ПНА також оцінюється їх собівартістю [151].

Розрахунок даного показника необхідний для визначення рентабельності блоків зі СДП, їх оптової вартості в порівнянні з ціною на блоки плавучості зі сферопластика.

Розрізняють планову і фактичну собівартість. Планова собівартість продукції включає в себе тільки ті витрати, які при даному рівні техніки та організації виробництва є для підприємства необхідними. Фактична собівартість продукції – це сума витрат, здійснених конкретною господарчою організацією в ході виготовлення продукції за умов, що склалися на виробництві.

За послідовністю формування розрізняють собівартість технологічну (операційну), цехову, виробничу і повну. Технологічна собівартість використовується для економічного порівняння варіантів нової техніки і вибору найбільш ефективного. Вона включає витрати, які мають безпосереднє відношення до виконання операцій над певним виробом. Цехова собівартість має більш широкий спектр витрат, крім технологічної собівартості, включає витрати пов'язані з організацією роботи цеху та його управлінням. Виробнича собівартість включає виробничі витрати всіх цехів, зайнятих виготовленням продукції і витрати з загального управління підприємством.

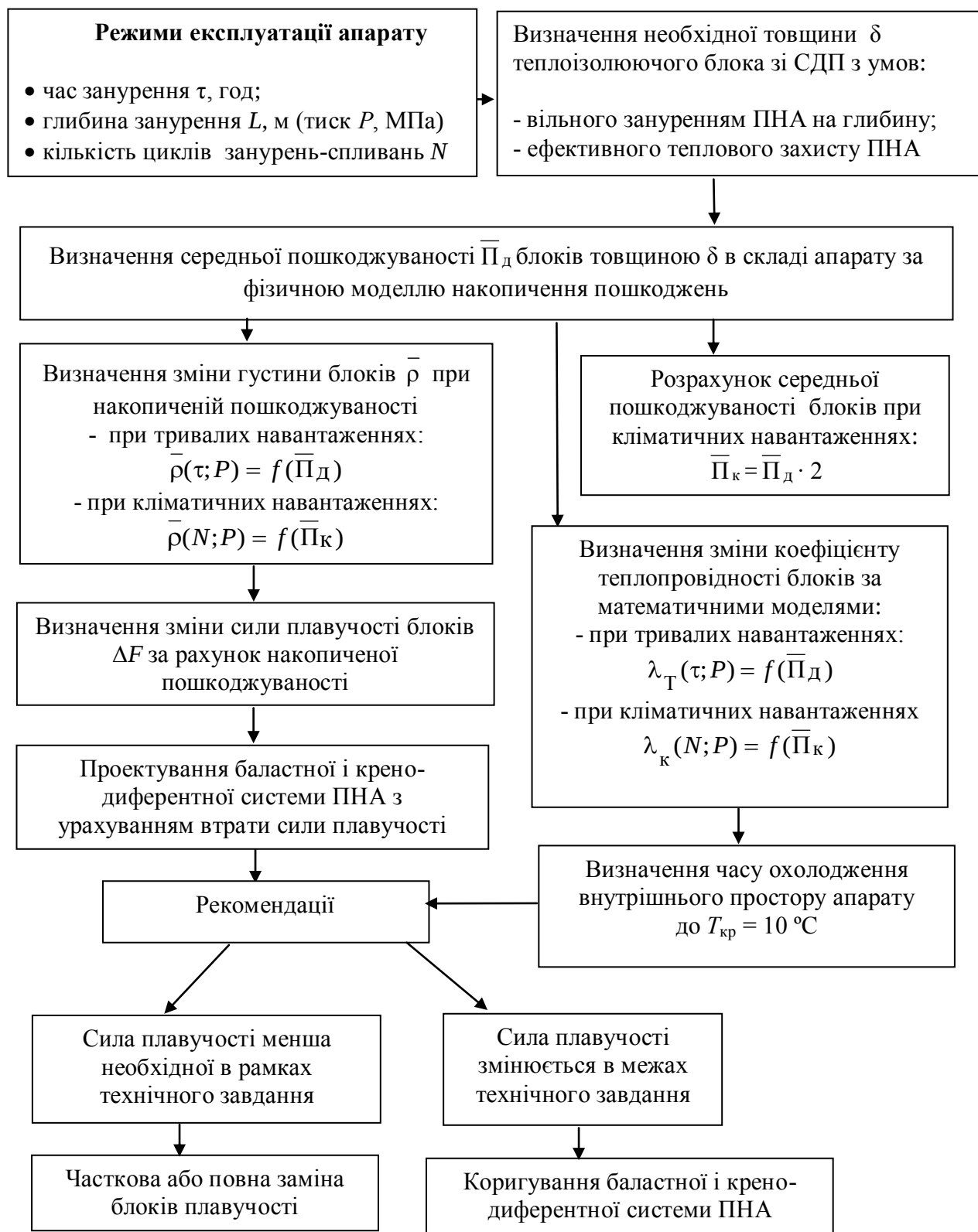


Рисунок 5.5 – Схема методики проектування ПНА з урахуванням втрати сили підтримання і теплоізолюючих властивостей блоків плавучості зі СДП за рахунок накопичення експлуатаційних пошкоджень

У технологічну собівартість входять витрати на:

- сировину, матеріали, паливо, енергію;
- технологічні потреби;
- заробітну плату виробничих робітників з нарахуваннями;
- технологічне обслуговування, ремонт і амортизацію обладнання, придбання інструментів та інше [151].

У технологічну собівартість входять витрати на:

- сировину, матеріали, паливо, енергію;
- технологічні потреби;
- заробітну плату виробничих робітників з нарахуваннями;
- технологічне обслуговування, ремонт і амортизацію обладнання, придбання інструментів та інше [151].

Проведено розрахунок технологічної собівартості процесу виготовлення 500 блоків з розміром $700 \times 600 \times 200$ мм за рік (20160 кг СДП густиною 480 кг/м^3 за рік). Час проведення кожної технологічної операції з виготовлення блоків і кількість робочої сили, необхідної для її виконання, представлено в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Основні операції з виготовлення однієї партії теплоізолюючих блоків плавучості зі СДП [152]

№ з/п	Найменування операції ТП	Обладнання		Матеріали			Кількість робочих	Операційний час
		Вид	Кількість	Вид	Одиниця виміру	Кількість		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Зважування мікросфер	ваги	1	порошок	кг	1	1	20 хв
2	Зважування смоли	ваги	1	рідина	кг	1	1	20 хв
3	Перемішування компонентів	лопатевий змішувач	1	–	–	–	1	30 хв
4	Заповнення форми	форма	1	–	–	–	1	30 хв
5	Витримка у вакуумній камері	вакуумна камера	1	–	–	–	–	60 хв
6	Вилучення форми з вакуумної камери	–	–	–	–	–	2	10 хв
7	Вилучення блоку з форми	–	–	–	–	–	2	10 хв
8	Механічна обробка блоку	ріжучий інструмент	2	–	–	–	2	1 год
		шліфувальний папір	5					

Основні матеріали, що використовуються при виробництві блоків: мікросфери, епоксидний сполучник, отверджувач. Всі матеріальні витрати на них зазначені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Матеріальні витрати

Матеріали	Одиниця виміру.	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Основні матеріали				
Епоксидна смола ЕД-20	кг	7460	175,0	1305500,00
Твердник – «Диамет Х»	кг	2460	150,0	369000,00
Мікросфери марки МСО – 119 група А-2	кг	12700	300,0	3810000,00
Допоміжні матеріали				
Антиадгезив КЛТ-30	кг	3000	250,0	750000,00
Розчинник 646	л	30	60,0	1800,00
Засоби індивідуального захисту	шт	50	5,0	250,00
Гумові рукавички	шт	2	200,0	400,00
Халати робочі	шт	15	250, 0	3750,00
Ветош з тканини	кг	30	30,0	900,00
Загальні матеріальні витрати, грн.				6 244 600,00

Для виготовлення блоків плавучості використовується наймана праця. Для працівників, зайнятих на роботах з шкідливими умовами, тривалість робочого часу становить не більше 36 годин на тиждень. Кількісний склад і фонд заробітної плати працівників, зайнятих у виготовленні блоку плавучості, а також відповідні відрахування єдиного соціального внеску до ПФУ згідно з поточними нормам законодавства [153], наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Витрати на оплату праці

Посада, кількість працівників	Відпрацьовано, люд.-год. (за 1 рік)	Вартість 1 люд.-год.	Витрати на оплату праці, грн.	Внески в ПФУ (22%), грн.
Майстер – 1 чол.	1728,0	55,00	95040,00	20908,8
Робітник – 2 чол.	1728, 0	45,00	77760,00	17107,2
Контролер ВТК – 1 чол.	1000,00	30,00	30000,00	6600,00
Загальні витрати на оплату праці, грн			202 800,00	44 616,00
Загальна сума, грн			247 416,0	

Перелік обладнання, що використовується при виробництві блоків плавучості та нарахована амортизація представлені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Нарахована амортизація

№ з/п	Об'єкт	Група Основних фондів	Максимальний строк корисного використання, років,	Річна норма амортизації (прямолінійний метод), %	Первісна вартість, грн.	Нарахована амортизація, грн.
1	Технологічне оснащення	4	5	20	150 000,0	30 000,0
2	Ваги	4	2	50	800,00	400,00
3	Лопатевий змішувач	4	5	20	15 000,00	3000,00
4	Вакуумна камера	4	5	20	15 000,00	3000,00
Всього						36400,00

Крім того, до технологічної собівартості блоків плавучості слід врахувати додаткові операційні витрати, представлені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Додаткові операційні виплати

Вид операції	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Витрати енергії	кВт·год	9600	1,56	14976,00
Витрати води	куб	100	13,404	1340,4
Загальна сума, грн	16 316,40			

Калькуляція виготовлення 500 блоків за рік (20 160 кг) представлена у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Калькуляція виготовлення блоків плавучості зі СДП

Найменуваннями витрат	Сума, грн.
Основні матеріали	6 244 600,00
Нарахована амортизація	36 400,00
Витрати на оплату праці	202800,00
Внески на соціальні заходи	44 616,00
Додаткові операційні виплати	16 316,40
Разом, грн	6 544 732,20

Вартість становить 6 544 732,20 грн, отже вартість 1 кг СДП складає 325,0 грн. З урахуванням того, що ціна 1 кг блоку плавучості зі сферопластика на сьогоднішній день складає 560 грн., використання СДП економічно вигідно.

Шляхом аналізу проведених досліджень та розрахунків, можна зробити висновок, що теплоізолюючі блоки плавучості зі СДП є перспективними в конструкціях підводних населених засобів в якості елементів плавучості та теплоізолятора міцного корпусу при тривалій експлуатації на глибинах 1500...2000 м та в «жорстких» кліматичних умовах при зануреннях на глибинах континентального шельфу. Розроблено стандарт підприємства на теплоізоляційний матеріал підводних технічних засобів на основі сферопластика з додатковою поруватістю (Додаток Л). Акти впровадження результатів дисертаційної роботи представлено в Додатку М.

5.5 Перспективи подальших досліджень

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 (Гренландське море з максимальною глибиною занурення 5500 м); в Атлантичному океані в зонах гідротермальних джерел з температурою води +400 °С.

Висновки за розділом 5

Удосконалення конструкції ПНА зі сферичним міцним корпусом здійснено шляхом заміни частини закладних елементів плавучості на блоки зі СДП густиною $450...500 \text{ кг/м}^3$ з коефіцієнтом теплопровідності $0,085 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$ у вигляді суцільної шкарлупи товщиною $\delta=0,15 \text{ м}$. Значення товщини встановлено з умов: вільного занурення апарату при заданому режимі; зниження температури до критичного рівня $T_{\text{кр}} = +10 \text{ °С}$ не менш ніж за 15 годин для ліквідації аварії.

2. Виконані розрахунки показали, що застосування в конструкції ПНА теплоізолюючих блоків зі СДП товщиною $0,15 \text{ м}$ у вигляді суцільного облицювання міцного корпусу знижують тепловтрати в оточуюче середовище на 75% в порівнянні з неізольованим корпусом.

3. Монтаж додаткових блоків плавучості зі СДП у вигляді суцільного облицювання до зовнішньої поверхні міцного корпусу здійснюється шляхом кріплення 16 блоків однакового типорозміру за допомогою епоксидного компаунду УП 5-234.

4. Виконано прогнозування втрати сили плавучості та зміни теплоізолюючих властивостей блоків зі СДП товщиною $0,15 \text{ м}$ в складі конструкції ПНА з глибиною експлуатації $1500...2000 \text{ м}$ при тривалих зануреннях та в режимі циклічних занурень спливань на поверхню в умовах температур нижче за 0 °С . В результаті прогнозування встановлено:

- при тривалих зануреннях апарату на базі 1000 год для глибин $1500...1800 \text{ м}$ втрати плавучості складають 10% , теплоізоляційні властивості зберігаються;

- при збільшенні глибини тривалих занурень до 2000 м пошкодження блоків не перевищує критичного рівня ($P_{\text{кр}}=30\%$), втрати плавучості складають 15% , теплоізоляційні властивості змінюються не значно;

– при 1000 циклах занурень-спливань на глибину 2000 м пошкоджуваність досягає 8...26 %, втрати сили плавучості складають 30%, коефіцієнт теплопровідності збільшується від 0,085 до 0,15 Вт/(м·°K).

Отже, процес накопичення пошкоджень в блоках зі СДП на глибинах 1500...2000 м присутній та впливає на теплозахисні властивості. Однак, в порівнянні з не облицьованим міцним корпусом блоки зі СДП забезпечують тепловий захист житлового відсіку ПНА.

5. В результаті проведених досліджень розроблено стандарт підприємства на теплоізолюючі блоки плавучості зі СДП для глибоководних технічних засобів.

6. Виконано розрахунок собівартості технологічного процесу виготовлення блоків плавучості зі СДП, за яким ціна за 1 кг блоку на сьогоднішній день складає 325 грн, що на 15...20 % дешевше за традиційні елементи плавучості зі сферопластику.

Основні наукові результати розділу опубліковано у [145, 146, 154–158].

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шанихин Е. Н. Глубоководные аппараты. Вехи глубоководной тематики. М. : Техника-молодежи, 2003. № 2. 124 с.
2. Боровиков П. А., Самарский В. Н. Подводная техника морских нефтепромыслов. Л. : Судостроение, 1980. 176 с.
3. Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Портной А. С. Океанотехника и морские операции на шельфе: учебник для вузов. СПб : Моринтех, 2008. 516 с.
4. Воробйов Ю. Л., Баскаков С. М. Техніка освоєння континентального шельфу. Одеса : ОНМА, 2003. 107 с.
5. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М. : Оружие и технологии, 2011. 780 с.
6. Robison, Bruce H. The Coevolution of Undersea Vehicles and Deep-Sea Research. *Marine Technology Society Journal*. 1999–2000. Vol.33. No 4. P. 65–73(9).
7. Окроков, А. Затонувшие корабли. Затопленные города. М. : Евразия, 1996. 120 с.
8. Black Sea Bibliography 1974 – 1994: Monographic / V. O. Mamayev, D. G. Aubrey, V. N. Ereemeev. NY. : UN Publ., 1995. 364 p.
9. Ленский В. Ф., Каплин И. В. Анализ потенциальных аварийных ситуаций для морских операций при строительстве морских нефтегазодобывающих платформ. *Судостроение*. 2010. № 5. С. 18–22.
10. Блинцов В. С., Магула В. Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. К. : Наукова думка, 1997. 140 с.
11. Васильев В. Ю., Крутиков А. А. Двухзвенные необитаемые подводные аппараты. *Судостроение за рубежом*. 1989. № 4. С. 5–15.
12. Хмельнов И. Н., Турмов Г. П., Илларионов Г. Ю. Необитаемые подводные аппараты. Владивосток : ДВГТУ, 1996. 130 с.
13. Блинцов В. С., Красних О. В. Сучасні завдання створення підводних апаратів роботів для пошукових та спеціальних операцій. *Підводна техніка і*

технологія (ПТТ-2011): всеукраїнська наук.-техн. конф. з міжнародною участю. Миколаїв : НУК, 2011. С. 155–158.

14. Проектування пристроїв і систем підводних апаратів: У 5 ч. / Казарєзов А. Я. та ін. Миколаїв : НУК, 2009. Ч. I. 128 с.

15. Разработка и испытание адаптивного подводного робота / Ястребов В. С и др. *Сборник научных трудов Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР*. 1990. С. 98–112.

16. Агаев М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М. : Наука, 2005. 398 с.

17. McFarland D., Gilhespy I., Honary E. Divebot: A Diving Robot with a Whale-like Buoyancy Mechanism. *Robotica*. 2003. Vol. 21. P. 385–398.

18. Крутиков А. А., Васильев В. Ю. Необитаемые подводные аппараты для инспекции и очистки морских буровых платформ. *Судостроение за рубежом*. 1991. №4. С. 22–46.

19. Поньрко, С. А., Попов О. С., Ястребов В. С. Адаптивные системы для исследования океана. Санкт–Петербург: Судостроение, 1993. 223 с.

20. Taylor Liz., Lawson T. An Innovative Solution for Accessing the Oceans. *Marine Technology Society Journal*. Washington. 2009. Vol.43. No.5. P. 169–177.

21. Moorhouse Paul. A Modern History of the Manned Submersible. *Marine Technology Society Journal*. Washington. Vol. 49. No 6. 2015. P. 65–78(14).

22. Сагалеви́ч А. М. Глубина. М. : Научный мир, 2002. 320 с.

23. Сагалеви́ч А. М. Подводные обитаемые аппараты ИО РАН: история океанографии. Калининград. 2004. Ч.1. С. 262–270.

24. Караваев Р. Н. Подводно-технические работы на Каспийском шельфе. *Морские интеллектуальные технологии*. 2010. № 2. С. 45–54.

25. Войтов Д. В. Подводные обитаемые аппараты. М. : АСТ Астрель, 2002. 189 с.

26. Лубянов А. Н. Прорыв в глубину. Подводные аппараты ВМФ. История создания и применения. Севастополь : КИЦ Севастополь, 2003. 279 с.

27. Королев А. Б. Штурм гидрокосмоса. От снаряда «ЭПРОН» до «Руси». М. : Лето Индастриз, 2011. 192 с.
28. Monastersky Richard. Deep-sea research: Dive master. *NATURE*. Vol. 489. Issue 7415. P. 194–196.
29. Kohnen, William. Human Exploration of the Deep Seas: Fifty Years and the Inspiration Continues. *Marine Technology Society Journal*. Washington. 2009 Vol. 43. No.5. P. 42–62(21).
30. Богданов Ю. А., Сагалевиц А. М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». М. : Научный мир, 2002. 301с.
31. Сагалевиц А. М., Галкин С. В. Гидротермальные экосистемы Мирового океана. Исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». М. : ГЕОС, 2012. 144 с.
32. Rigaud V. Innovation and Operation with robotized systems. *SWIMMER, French group developing production umbilical AUV*. Offshore Magazine. P.66-67.
33. Молотов С. В., Дикарев Н. Ф. Создание первых подводных аппаратов для спасения экипажей аварийных подводных лодок. *Тайфун: военно-технический альманах*. Санкт–Петербург : Тайфун, 1999. № 3. С. 34–36.
34. Голдовский Б. И. Современное состояние и прогноз развития спасательных глубоководных аппаратов. *Морские интеллектуальные технологии*. 2011. № 4. С. 3–6.
35. Толл Д. Подводные лодки и глубоководные аппараты: пер. с англ. М. Новыш, ред. А. Степашкин, О. Степашкина. М. : ЭКСМО, 2004. 255 с.
36. Данмор С. Погибшие подлодки: величайшие катастрофы – от «Ханли» до «Курска»: пер. Ю. О. Соколов. М. : Мир книги, 2005. 175 с.
37. Демчишин М. Д. Конструктивные особенности водолазного колокола и технология его использования в целях обеспечения безопасности спусков водолазов-глубоководников : дис. ... канд. тех. наук.: 05.11.14 : защищена 13.10.2008 : затв. 28.04.2009 / Демчишин, Михаил Денисович ;– Москва, 2003, – 208 с. – Библиогр. с. 223–232.

38. Баранов И. Л. О подъеме атомной подводной лодки «Курск» *Судостроение*. 2002. № 2. С. 59–66.
39. Никифоров М. Батискаф на вахте. *Электронный журнал «Наука и жизнь»*. URL: <http://www.nkj.ru/news/17657/> (дата звернения: 11.03.2017).
40. Океанологические исследования и подводно-технические работы на месте гибели атомной подводной лодки «Комсомолец» под ред.: М. Е. Виноградова, А. М. Сагалевича, С. В. Хетагурова. М. : Наука, 1996. 362 с.
41. Филиппенко А. В. Новые технологии спасения подводников. *Подводные технологии и мир океана: научно-технический журнал*. М. : ФГУП МКБ «Электрон», 2005. № 2. С. 93–97.
42. Черкашин С. В. Глубоководные водолазные спуски методом кратковременных погружений. // Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. URL: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/32-33/36.pdf> (дата звернения: 11.12.2016).
43. Ильин Н. А. Водолазные комплексы для выполнения работ на глубинах более 300 м. *Судостроение*. 2006. № 2. С. 44–48.
44. Семко В. В., Ласточкин Г. И., Ремизов В. И. Разработка технологии погружения водолазов на глубины до 500 метров методов длительного пребывания. *Информ. Сб. Поисково-спасательной службы ВМФ*. 1991. Вып. 3(39). С.154–159.
45. Средства транспортировки водолаза. *Подводная техника нефтепромыслов*. URL: <http://ilovediving.ru/articles/sredstva-transportirovki-vodolaza> (дата звернения: 12.21.2016).
46. Водолазное дело / Илюхин Н. А. и др.; С.-Петербург. : КультИнформ Пресс, 1998. 39 с.
47. Вишняков В. А., Меренов И. В. Глубоководная водолазная техника. Санкт–Петербург : Судостроение. 1982. 240 с.
48. Боровиков П. А. Водолазное дело России. М. : Мысль, 2005. 240 с.
49. Глубоководные водолазные комплексы. *Оборудование для глубоководной техники и барокамер*. URL: <http://www.smp->

ltd.co.uk/product/productid/307/productname/Draegar-2-Man-Saturation-Diving-Bell/ (дата звернення: 25.01.2017).

50. Marine technology news. MTR100: Caley Ocean Systems Ltd. URL: <http://marinetechnologynews.com/news/mtr100-caley-ocean-systems-521320> (дата звернення: 25.01.2017).

51. Правила классификации и постройки обитаемых подводных аппаратов и глубоководных водолазных комплексов / Российский Морской Регистр Судоходства. СПб. : [s. n.], 2003. 204 с.

52. Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ. Часть II. Медицинское обеспечение водолазов / Нессирио Б. А. и др.; Санкт–Петербург. 2001. 202 с.

53. Нарусбаев А. А. Катастрофы в морских глубинах. Л. : Судостроение, 1989. С. 67.

54. Чапмен Р. Морские катастрофы. Когда время против нас. М. : Мысль, 1983. 51 с.

55. Соломонюк Н. С. Удосконалення конструкції підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості : дис. ... канд. тех. наук : 05.08.03 : захищена 13.10.2008: затв. 28.04.2009 / Соломонюк Наталія Сергіївна ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 2012, –232 с. – Библиогр.: с. 223–232. – ДК № 052013.

56. Грушман Р. П. Справочник судового изолировщика. Л. : Судостроение, 1984. 224 с.

57. Казимиренко Ю. А. Перспективы применения в судостроении композиционного материала многоотраслевого назначения – синтактического пеностекла. *Збірник наукових праць УДМТУ*. Миколаїв: УДМТУ, 2001. № 2 (374). С. 132–139.

58. 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 / Копійка Сергій Васильович; – М-во освіти і науки

України, Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 2008. – 232 с. – Библиогр.: с. 223–232. – ДК № 052013.

59. Pausch Steffen, Detlef B. Under High Pressure: Spherical Glass Flotation and Instrument Housings in Deep Ocean Research. *Marine Technology Society Journal*. Washington. 2009. Vol.43. No.5. P. 105–109.

60. Конструкционные материалы для глубоководных аппаратов / С. С. Ушков и др.; *Судостроение*. 2004. №5. С. 111–114.

61. Meteer C. L., Philipps T. E. Syntactic foam core material for composite structures. U.S. Patent 5888642, USA (1999).

62. Kim H. S. Method for forming syntactic foams. U.S. Patent 2008/0233384 A1, USA (2008).

63. Бурдун Е. Т., Радомысльский М. И. Пути совершенствования сферопластиков. *Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред*: материалы межвузовской науч.-техн. конф.. Николаев : НКИ, 1989. С. 8–10.

64. 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.

65. Соколов И. И., Долматовский М. Г., Деев И. С., Стеценко В. Я. Влияние физико-механических характеристик полых стеклянных микросфер на свойства сферопластиков. *Пластические массы: научно-технический журнал*. 2005. № 7. С. 16–18.

66. Сферические наполнители и композиционные материалы на их основе. *ЗАО Аквасинт имени академика В. А. Телегина*. URL: <http://aquasint.ru/spherop.html> (дата звернення: 05.12.2016).

67. CRP. Subsea Buoyancy Products. *Електронний інформаційний бюлетень*. URL: www.crpgroup.com. (дата звернення: 05.01.2017).

68. Сферопластики «ФГУП» «ВИАМ». *Електронний інформаційний бюлетень*. URL: <http://viam.ru/spheroplastic> (дата звернення: 05.01.2017).

69. Кржечковский П. Г. Микромеханика разрушения сферопластиков при всестороннем сжатии с учетом граничного эффекта. *Строительная механика корабля: сборник научных трудов НКИ*. Николаев. 1990. С. 91–98.

70. Бурдун Е. Т., Головченко Ю. Б., Копийка С. В. Статистическая модель разрушения сферопластика под действием гидростатического давления. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК. 2007. № 5 (416). С. 71–77.

71. Головченко Ю. Б. Концентрация напряжений в неоднородных средах со сферическими включениями : дис. ... канд. физ.-мат. наук. : 01.02.04 : защищена 1984 : затв. ППП НАН Украины / Головченко Юрий Борисович. – Киев, 1984. – 197 с. РГБ ОД 61:85-5/4646.

72. Обрезков В. И., Федонюк Н. Н. Влияние масштабного фактора на гидростатическую прочность блоков плавучести из сферопластика. *Прочность, надежность и ресурс корпусов судов и морских сооружений: материалы международной конференции по судостроению* (Санкт-Петербург 24–26 ноября 1998 г.). Санкт-Петербург, 1998. С. 94–100.

73. Никитин В. А., Сазонов И. А., Субботин В. Ю., Федонюк Н. Н. Влияние длительного гидростатического давления на физико-механические характеристики сферопластиков. *Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: материалы Всесоюзной научно-технической конференции*. Николаев : НКИ, 1991. С.111–112.

74. Adrien J., Maire E., Gimenez N., Sauvante-Moynot V. Experimental study of the compression behaviour of syntactic foams by in situ X-ray tomography. *Acta Materialia*. 2007. Vol.55. No.5. P. 1667–1679.

75. Титов Г. В., Бурдун Е. Т. Экспериментальное определение ресурса сферопластика ЭДС-7А. *Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: материалы Всесоюзной научно-технической конференции*. Николаев : НКИ, 1991. С.142–143.

76. Grosjean F., Bouchonneau N., Choqueuse D., Sauvante-Moynot V. Comprehensive analyses of syntactic foam behaviour in deep water environment. *Journal of Materials Science*. 2009. Vol. 44. No.6. P. 1462–1468.

77. Бурдун Е. Т., Титов Г. В., Влияние эксплуатационных факторов на свойства сферопластиков. *Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред*: материалы межвузовской научно-технической конференции. Николаев : НКИ, 1989. С.44–46.

78. Копийка С. В., Жижко А. В. Экспериментальное исследование повреждаемости сферопластиков. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК. 2006. № 3 (408). С. 48–56.

79. Kim H. S., Plubrai P. Manufacturing and failure mechanisms of syntactic foam under compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004. No.35. P. 1009–1015.

80. Gupta N., Kishore, Woldeesenbet E., Sankaran S. Studies on compressive failure features in syntactic foam material. *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. P. 4485–4491.

81. Samsudin S. S., Ariff Z. M., Zakaria Z., Bakar A. A. Development and characterization of epoxy syntactic foam filled with epoxy hollow spheres. *Express Polymer Letters*. 2011. Vol.5. No.7. P. 653–660.

82. Li P., Petrinic N., Siviour C. R., Froud R., Reed J. M. Strain rate dependent compressive properties of glass microballoon epoxy syntactic foams. *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 515. No. 1–2. P. 19–25.

83. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках / Атрощенко С. А. и др. *Журнал технической физики*. 2002. Т.72. Вып. 12. С. 54–58.

84. Rizzi E., Papa E., Corigliano A. Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling. *International Journal of Solids and Structures*. 2000. Vol. 37. P. 5773–5794.

85. Shabde V. S., Hoo K. A., Gladysz G. M. Experimental determination of the thermal conductivity of three-phase syntactic foams. *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. No. 13. P. 4061–4073.

86. Gupta N., Pinisetty D. A Review of Thermal Conductivity of Polymer Matrix Syntactic Foams – Effect of Hollow Particle Wall Thickness and Volume

Fraction. *JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 2013. Vol. 65. No. 2. P. 234–245.

87. Weston Steve., Olsson M., Ray M., John S. Flotation in ocean trenches using hollow ceramic spheres. *Marine Technology Society Journal*. Washington. 2009. Vol.43. No.5. P. 110–114.

88. Аналитический обзор «Состояние разработки отечественных подводных аппаратов различного назначения» Л. : НТТМ «Галас», 1989. 89 с.

89. Тепломассообмен теплотехнический эксперимент: справочник / под ред.: В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М. : Энергоиздат, 1982. 512 с.

90. Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск : Наука и техника, 1971. 264 с.

91. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента : учеб.пособие. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.

92. Копійка С. В. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисциплін «Організація експерименту», «Теорія і практика експерименту». Миколаїв : УДМТУ, 2003. 56 с.

93. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / пер. с англ. М. : Мир, 1981. 520 с.

94. Гольдман А. Я. Прогнозирование деформационно–прочностных свойств полимерных композиционных материалов. Л. : Химия, 1988. 272 с.

95. ГОСТ 10060 – 2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости . – Введ. 2014-01-01 – М. : Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, метрологии и сертификации, 2012. 19 с.

96. Лекции по строительным материалам. *Строительное материаловедение конспект лекций.* URL: http://kursoviki.spb.ru/lekcii/lekcii_strmat.php (дата звернения: 07.02.2017).

97. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М. : Машиностроение, 1985. 232 с.

98. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М. : Наука, 1968. 288 с.
99. Гурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М. : Высш. школа, 1972. 368 с.
100. Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязко-упругости. М.: Наука, 1970. 280 с.
101. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / пер. с англ. М. : Атомиздат, 1975. 472 с.
102. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1981. 720 с.
103. 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.
104. 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.
105. Методика определения кажущейся плотности. Блоки плавучести из сферопластиков. Физико-механические характеристики. УГМТУ-08-001-04 – Николаев, УГМТУ, 2003. 5 с.
106. Годовський Ю. К. Теплофизические методы исследования полимеров. М. : Химия, 1976. 216 с.
107. Пивень А. Н., Гречаная Н. А., Чернобыльский И. И. Теплофизические свойства полимерных материалов: справочник. Киев : Вища школа, 1976. 180 с.
108. Платунов Е.С., Буровой С. Е., Курепин В. В. Теплофизические измерения и приборы. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.

109. Дульнев Г. Н., Сигалов А. В. Температуропроводность неоднородных систем. Экспериментальное исследование температуропроводности. *Инженерно – физический журнал*. 1980. Т. 39. №1. С. 126–133.

110. Privalko V.P., Novikov V. V., Wiley J. The Science of Heterogeneous Polymers: Structure and Thermophysical Properties. Chister – New Your – Brisbance – Toronto – Singapore, 1995. P. 235–242.

111. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д. М. Карпиноса. К. : Наукова думка, 1985. 592 с.

112. ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. [Введ. 1985-01-01]. Изд офиц. Москва: государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1984. 20 с. (Технические условия).

113. ТУ 5951-171-05786904-2003. Микросферы стеклянные. [Введ. 17.01.2003]. Изд офиц. Москва: НПК «ТЕМП», 2003. 10 с. (Технические условия).

114. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М. : Энергия, 1979. 320 с.

115. Кржечковский П. Г. К механике разрушения сферопластиков. *Проблемы прочности*. 1982. №11. С. 110–115.

116. 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.

117. 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. С. 55–60.

118. Лендел Р. Ф., Федорс Р. Ф. Разрушение твердых полимеров / пер. с англ. М. : Химия, 1971. С. 286–385.

119. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
120. Федоровский Г. Д. Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред. *Вестник Ленинградского университета. Серия 1: Математика, механика, астрономия.* 1990. № 15. Вып. 3. С. 87–91.
121. Овчинский А.С. Процессы разрушения композиционных материалов. М. : Наука, 1988. 277 с.
122. Егер Дж. Упругость, прочность и текучесть. М. : Машингиз, 1961. 172 с.
123. Механика композитных материалов и элементов конструкций: в 3 т.: Механика материалов / А. Н. Гузь, Л. П. Хорошун, Г. А. Ванин. К. : Наук. думка, 1982. Т.1. 368 с.
124. Дьячков И. И., Сазонов И. А. Прочность крупномасштабных блоков сферопластика. *Проблемы прочности.* 1992. № 5. С. 53–55.
125. Копійка С. В. Дослідження перехідних динамічних процесів у композиційному легковагому матеріалі плавучості при випадковому руйнуванні сферичної підкріплювальної оболонки. *Збірник наукових праць НУК.* Миколаїв: НУК. 2006. № 2 (407). С. 49–59.
126. Кржечковский П. Г. Об определении упругих постоянных композитов на основе полых сферических включений. *Проблемы прочности.* 1981. № 9. С. 58–61.
127. Лыков А. В. Тепломассообмен: справочник. М. : Энергия, 1978. 480 с.
128. Физическая энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. 704 с.
129. Попов Л. Н. Строительные материалы и изделия: учебник для студентов сред. спец. М. : ГУП ЦПП, 2000. 384 с.
130. Петров В. П. Строительные материалы. Кремнистые минералы и горные породы. М.: Недра, 1992. 361 с.
131. Свойства строительных материалов. URL: <http://sv777.ru/index.php/svojstva-stroitelnyx-materialov.html> (дата звернення 11.03.2017).

132. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.

133. 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.

134. 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.

135. 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.

136. 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.

137. 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.

138. 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.

139. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1994. 324 с.

140. Краснощеков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 288 с.

141. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 469 с.

142. Истошин Ю. В. Морские течения. Владивосток.: Дальневосточное книжное издательство, 1975. 76 с.

143. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев: Наукова думка, 1992. 244 с.

144. Лыков А. Л. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 600 с.

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

146. 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.

147. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Бобров Ю. Л. и др. М.: ИНФРА-М, 2003. 268 с.

148. Руководство по теплотехническому расчету и проектированию ограждающих конструкций зданий / НИИСФ. М.: Стройиздат, 1985. 141 с.

149. Компания «Кондор» Комплексные поставки химии для промышленных предприятий. *Электронный каталог*. URL:

<http://www.компания-кондор.рф/epoksidnyj-kompaund-tablica-1/> (дата звернення 15.02.2017).

150. Айрапетян Л. Х., Заика В. Д., Мишина Л. А. Справочник по клеям. Л. : Химия, 1980. 304 с.

151. Податковий кодекс України від 02.12.2010 № 2755-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2755-17> (дата звернення 15.02.2017).

152. Головкин Г. С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов. М. : Химия, Колос, 2007. С. 260–274.

153. Проект Закону про Державний бюджет України на 2017 рік № 5000 від 15.09.2016. // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1801-19> (дата звернення 15.02.2017).

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

155. 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.

156. 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.

157. 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.

158. 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.

ДОДАТОК А

**«Программа–методика исследовательских испытаний
по определению повреждаемости блоков плавучести на основе
сферопластика с дополнительной пористостью при длительном нагружении
гидростатическим давлением»**

Министерство образования и науки Украины
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

Утверждаю
Проректор з НР
Д-р техн. наук, проф.
Блинов В.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.

Начальник НДЧ
канд. техн. наук, доцент

Наук.руководитель НИР
канд.техн.наук, проф. НУК

Начальник БС и М

Рижков С.С.

Бурдун Е.Т.

Мацкевич В.В.

1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

1.1 Объектом испытаний являются образцы блока плавучести из сферопластика с дополнительной пористостью (СДП). СДП представляет собой композит на основе эпоксидной смолы наполненной стеклянными микросферами Ø 5-200 мкм. С целью снижения плотности в материал введены равномерно распределенные по всему объему газовые включения – поры, что создают в СДП закрытопористую структуру и обеспечивают материалу низкую теплопроводность.

1.2 Предлагаемая методика может применяться для определения повреждаемости и коэффициента температуропроводности материала блоков плавучести, которые по условиям эксплуатации подвергается длительному нагружению гидростатическим давлением.

2 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводятся с целью определения объема поглощенной воды открытыми порами материала, возникающими в результате длительного воздействия гидростатического давления. При испытаниях также определяется коэффициент температуропроводности СДП в зависимости от его водопоглощения (повреждаемости).

3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящая методика предполагает воздействие на образцы материала СДП длительного гидростатического давления. Процесс накопления повреждений в результате такого нагружения сопровождается постепенным разрушением воздушных полостей, макро- и микропор материала в первую очередь, при больших уровнях давления, и микросфер. Одним из способов количественного определения объема накопленных повреждений, является отношение объема воды, проникшего в образец материала к общему объему воздуха в структуре СДП.

При выборе уровней давлений нагружения, необходимо учитывать, что продолжительность эксперимента, должна быть незначительной (не более месяца) и за это время необходимо накопить максимальный объем повреждений в СДП.

4 ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

4.1 Образцы для испытаний изготавливают методами механической обработки по технологической карте раскроя, в которой предусмотрено вырезание заготовок из 3-х и более различных мест одного блока СДП.

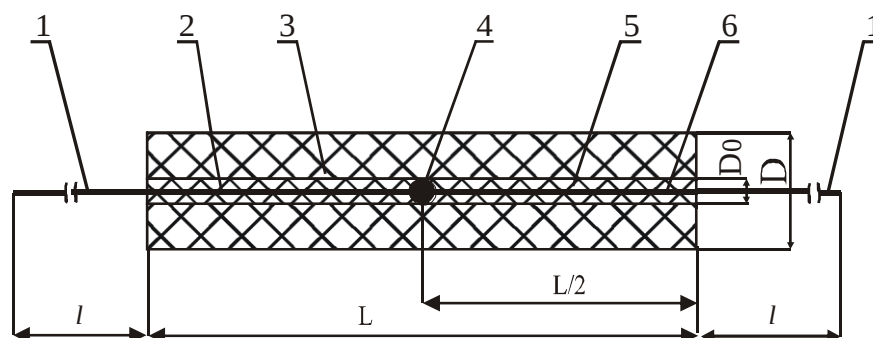
4.2 Образцы изготавливают в виде цилиндра с диаметром $D=20\pm0,5$ мм и длиной $L=100\pm0,5$ мм. Размер образцов подобран из условия неограниченного цилиндра: $\frac{L}{D} \geq 5$.

4.3 Образцы должны иметь ровную поверхность без сколов, трещин, раковин и заметных следов механической обработки.

4.4 Для заделки термопар внутри образца, вдоль оси цилиндра высверливается центральное отверстие. Диаметр центрального отверстия – D_0 , не должен превышать $0,1 \cdot D$ от диаметра образца, что обеспечит погрешность измерений не более 0,01.

4.5 Для герметизации центрального канала используется компаунд из сфероластика идентичного по составу и свойствам экспериментальным образцам (см. рис.1)

4.6 Для каждого уровня давления используется партия образцов в количестве не менее 5 шт.



1 – выводные концы; 2 – хромель; 3 – сферопластик; 4 – спай термопар;
5 – компаунд; 6 – копель

Рисунок 1 – Экспериментальный образец

5 ОБЪЕМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Для проведения испытаний назначаются уровни гидростатического давления (3 – 4 уровня) из диапазона $0.2 \dots 0.5 P_{\text{гид}}$ (уловного предела прочности материала при гидростатическом сжатии).

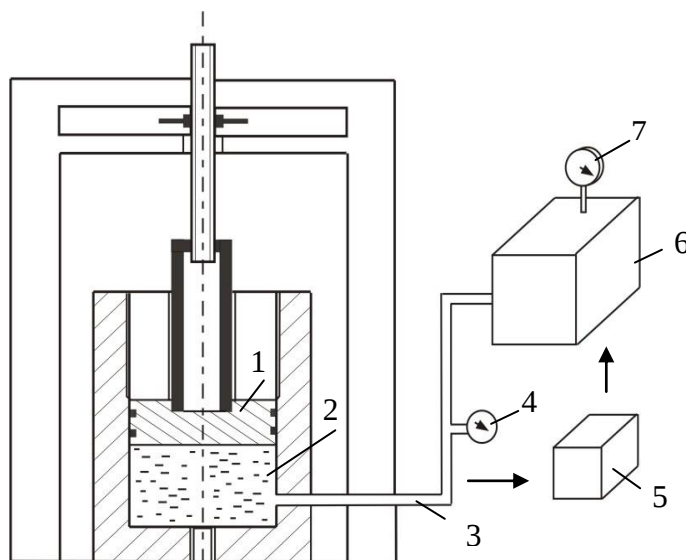
5.2 Для равномерного расположения экспериментальных точек, ступени времени выдержки образцов под давлением взяты в логарифмических координатах и составляют: $\tau_i = e^i$ ($i=0,5; 1, 2 \dots n$) $e^{0,5}=1,64$; $e^1=2,72$; $e^2=7,4$; $e^3=20,1$; $e^4=54,6$; $e^5=148,25$; $e^6=403,4$ часа для каждого уровня давления.

5.3 Для проведения испытаний используется экспериментальная установка представленная на рис.2

6 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1 Испытания проводятся в закрытом помещении при температуре воздуха 20 ± 2 С°.

6.2 В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода.



1 – шток; 2 – дистиллированная вода; 3 – трубопровод; 4 – электро контактный манометр; 5 – блок управления; 6 – насосная станция; 7 – манометр

Рисунок 2 – Комплекс оборудования для гидростатических испытаний

7 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

7.1 Проводится гидростатическое взвешивание согласно методики УКФА.730131.003 М, вычисляется масса образца на воздухе – m_0 , его начальный вес в воде – m_2 , гидростатический объем – V_0 и его начальная кажущаяся плотность – ρ_0 .

7.2 Определяется начальный коэффициент температуропроводности материала образца – a_0 согласно методики УКФА.360107.001 М.

7.3 Результаты замеров и вычислений заносятся в «таблицу исходных данных» (Табл. 1).

7.4 Образцы помещаются в камеру высокого давления (рис.2).

7.5 Камеру нагружают заданным давлением P и выдерживают установленный промежуток времени τ_i .

7.6 После нагружения гидростатическим давлением в течении времени τ_i , образцы вынимают из камеры.

7.7 Проводится гидростатическое взвешивание согласно методики УКФА.730131.003М, определяется масса образца – m_i после нагружения давлением и вычисляется масса проникшей в материал воды – Δm_i по формуле:

$$\Delta m_i = m_i - m_e. \quad (1)$$

7.8 Определяется коэффициент температуропроводности - a_i по программе-методике УКФА.360107.001 М.

7.9 Для каждого i – го времени выдержки под давлением проводятся действия в соответствии с п.7.4– 7.8.

7.10 Результаты замеров заносятся в “Результаты испытаний” (Табл. 2) и оформляются протоколом испытаний (см. Приложение).

8 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

8.1 Величину накопленных повреждений испытываемых образцов СДП после i – го времени выдержки под давлением определяют по формуле:

$$\Pi_i = \frac{\Delta m_i}{\rho_e \cdot V_{\Pi}}, \quad (2)$$

где Δm_i – масса воды проникшей в СДП, г;
 $\rho_e = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность дистиллированной воды;
 V_{Π} – объем воздушных включений см^3 .

Объем воздушных включений V_{Π} складывается из объема закрытых воздушных пор (дополнительная пористость) – $V_{\text{ДП}}$ и объема закрытой пористости, заключенной внутри микросфер – $V_{\text{ВМС}}$.

$$V_{\Pi} = V_{\text{ДП}} + V_{\text{ВМС}}. \quad (3)$$

Объем внутри микросфер определяется как:

$$V_{\text{ВМС}} = (1-\nu) \cdot V_0 \cdot \chi - \frac{m_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент пористости, характеризующий относительный объем пор, который вводится в основу СДП при его изготовлении;
 V_0 – гидростатический объем образца, см^3 ;
 χ – коэффициент заполнения объема микросферами;
 $m_{\text{ст}}$ – масса стекла, г;
 $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стекла, из которого изготовлены микросферы г/см^3 .

Масса стекла вычисляется по формуле:

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{МК}} \cdot (1-\nu) \cdot V_0 \cdot \chi, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{МК}}$ – плотность микросфер, г/см^3 .

Объем занимаемый дополнительными порами, вычисляется как:

$$V_{\text{ДП}} = V_0 \cdot v. \quad (6)$$

8.2 Плотность испытываемых образцов СДП после i – го времени выдержки под давлением определяют по формуле:

$$\rho_i = \frac{m_0 + \Delta m_i}{V_0}. \quad (7)$$

8.3 Результаты расчетов заносятся в «Результаты испытаний» (Табл. 2).

8.4 Производится статистическая обработка результатов испытаний партии образцов по ДСТУ ISO 5479:2009 результаты заносятся в табл.3–5.

9 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

9.1 К проведению испытаний допускаются лица, имеющие право работы с сосудами высокого давления. Для безопасности проведения исследований необходимо выполнять общие требования по ГОСТ 12.2.085 – 2002 «Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности».

9.2 Камера высокого давления должна быть испытана на пробное давление $P_{и} < P_{раб}$.

9.3 Камера высокого давления с измерительным манометром во время испытаний должна быть закрыта защитным кожухом, имеющим смотровое окно.

9.4 Электротехнические средства испытаний и измерений должны иметь заземление и защиту от короткого замыкания.

9.5 К проведению испытаний допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лаборатории композиционных материалов и имеющие право работать с электрическим оборудованием до 1000 В.

9.6 Потенциометр, термометр, термопары и другие измерительные приборы должны пройти поверку по ДСТУ 2708 – 2006 .

9.7 Место проведения испытаний должно обеспечиваться хорошим освещением 400 лк.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

1. Камера высокого давления ($P_{раб}=100$ МПа).
2. Насосная станция для создания давления воды УНГР – 2000.
3. Манометр ЭКМ – 2У №32191.
4. Весы ВЛЮ–1 класс точности 2.
5. Термостат жидкостный лабораторный СЖМЛ –19/2,5–И1 объемом V=19 л, точность автоматического поддержания температуры $\pm 0,5$ °С
6. Вода, дистиллированная по ГОСТ 6709-72
7. Термометр спиртовой – предел измерений 0-100 °С класс точности 2.
8. Потенциометр КСП2 – класс точности 1, по виду отсчетного устройства показывающий (или регистрирующий).
9. Термопара хромель-копель – градуировка ХК₆₈ предел измерения температур 0 – 100 °С, допускаемая погрешность $\Delta E=0,7\%$.
10. Секундомер точностью $\pm 0,05$ с
11. Электро-контактный термометр – предел измерений 0–100 °С, класс точности 2.0.
12. Штангенциркуль ШЦ–11, точность измерений 0.05 мм, ГОСТ 166–89.
13. Используемое оборудование должно пройти метрологический контроль.

ПРОТОКОЛ №

Эксперимент по определению повреждаемости и изменению
коэффициента температуропроводности образцов блока из СДП
при длительном гидростатическом нагружении

Материал

Номер партии

Уровень гидростатического давления

Количество испытываемых образцов

Дата испытаний

Таблица 1 – Исходные данные

№ образца	Линейные размеры		Масса с грузом вводе m_2 , г	Масса на воздухе m_0 , г	Объем V_0 , г/см ³	Плотность ρ_0 , г/см ³	Температуропроводность a_0 , м ² /с
	Радиус R , мм	Длина L , мм					
1							
2							
3							
4							
5							

Таблица 2 – Результаты испытаний

Время нагружения τ , час	Масса после испытаний m_{IP} , г	Масса проникшей воды Δm_i , г	Плотность ρ_i , г/см ³	Температуропроводность a_i , м ² /с	Повреждаемость Π_i , %
$e^{0.5}$					
e^1					
e^2					
.....					
e^6					

Таблица 3 – Результаты статистической обработки повреждаемости

Время нагружения τ , час	Мат. Ожидание, $M(\Pi_i)$	Дисперсия, $S^2(\Pi_i)$	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{S^2(\Pi_i)}$	Коэффициент вариации $\nu = \frac{S(\Pi_i)}{M(\Pi_i)} \cdot 100\%$
$e^{0.5}$				
e^1				
e^2				
.....				
e^6				

Таблица 4 – Результаты статистической обработки плотности

Время нагруже- ния τ , час	Мат. Ожидание, $M(\rho_i)$, г/см ³	Дисперсия, $S^2(\rho_i)$, (г/см ³) ²	Среднеквадрат ическое отклонение $\sqrt{S^2(\rho_i)}$, г/см ³	Коэффициент вариации $v = \frac{S(\rho_i)}{M(\rho_i)} \cdot 100\%$
$e^{0.5}$				
e^2				
.....				
e^6				

Таблица 5 – Результаты статистической обработки температуропроводности

Время нагруже- ния τ , час	Мат. Ожидание, $M(a_i)$, м ² /с	Дисперсия, $S^2(a_i)$, (м ² /с) ²	Среднеквадрати- ческое отклонение $\sqrt{S^2(a_i)}$, м ² /с	Коэффициент вариации $v = \frac{S(a_i)}{M(a_i)} \cdot 100\%$
$e^{0.5}$				
e^1				
.....				
e^6				

Расчетные формулы статистической обработки

Математическое ожидание:
$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j$$

Дисперсия:
$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(\bar{y} - y_j \right)^2$$

Среднеквадратическое отклонение:
$$S = \sqrt{S_y^2}$$

Коэффициент вариации:
$$v = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\%$$

где y – значение функции отклика, соответственно повреждаемости, плотности, температуропроводности.

j – порядковый номер образца;

N – количество образцов.

ДОДАТОК Б

«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»

Министерство образования и науки Украины
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

Утверждаю

Проректор з НР

Д-р техн. наук, проф.



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.

Начальник НДЧ
канд. техн. наук, доцент

Наук.руководитель НИР
канд.техн.наук, проф. НУК

Начальник БС и М

Рижков С.С.

Бурдун Е.Т.

Мацкевич В.В.

1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

1.1 Объектом испытаний являются образцы сферопластика, который представляет собой композит на основе эпоксидной смолы наполненной стеклянными микросферами Ø 5-200 мкм. С целью снижения плотности в материал могут быть введены равномерно распределенные по всему объему газовые включения – поры. При этом образуется новый материал - сферопластик с дополнительной пористостью, физико-механические свойства которого могут значительно отличаться от исходных в зависимости от относительного объема пор.

1.2 Предлагаемая методика может применяться для определения повреждаемости и коэффициента температуропроводности композиционных материалов в структуру которых входит легковесный наполнитель или дополнительные поры, который по условиям эксплуатации подвергается периодическому воздействию как положительных, так и отрицательных температур (T , °C) так и нагружению гидростатическим давлением.

2 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводятся с целью определения объема поглощенной воды открытыми порами материала, возникающими в результате циклического действия положительных и отрицательных температур в сочетании с гидростатическим давлением. При испытаниях также определяется коэффициент температуропроводности в зависимости от его водопоглощения (повреждаемости).

3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящая методика в отличие от испытаний на морозостойкость предполагает воздействие на образцы материала гидростатического давления воды в промежутках между последовательными циклами замораживания и оттаивания

Замерзание воды, заполняющей поры материала сопровождается увеличением ее объема примерно на 9%, в результате чего возникает давление на стенки пор, приводящее к разрушению материала. *При отсутствии влияния гидростатического давления во многих пористых материалах вода не может заполнить более 90% объема доступных пор*, поэтому образующиеся при замерзании лед имеет свободное пространство для расширения. Расширение материала происходит только после многократного попеременного замораживания и оттаивания. С учетом неоднородности строения материала и неравномерности распределения в нем воды удовлетворительную морозостойкость можно ожидать у материалов в которых вода заполняет не более 80% открытой пористости.

Воздействие гидростатического давления воды в промежутке между циклами замораживания и оттаивания приводит к значительно более интенсивному разрушению материала. Это обусловлено двумя факторами: увеличением повреждаемости (количества открытой пористости) материала и более плотным заполнением объема в открытых пор перед замораживанием.

Замораживание воды в открытых порах, расположенных в поверхностных слоях материала вызывает развитие трещин распространяющихся по всему объему образца. В поверхностных слоях наблюдается выкрашивание материала, т.е. уменьшается масса образца, а в толще материала развиваются магистральные трещины, которые при испытаниях по определению температуропроводности играют роль «тепловых мостиков». Вследствие этого теплофизические характеристики образцов при *одинаковом водопоглощении могут отличаться от характеристик образцов подвергнутых воздействию только гидростатического давления.*

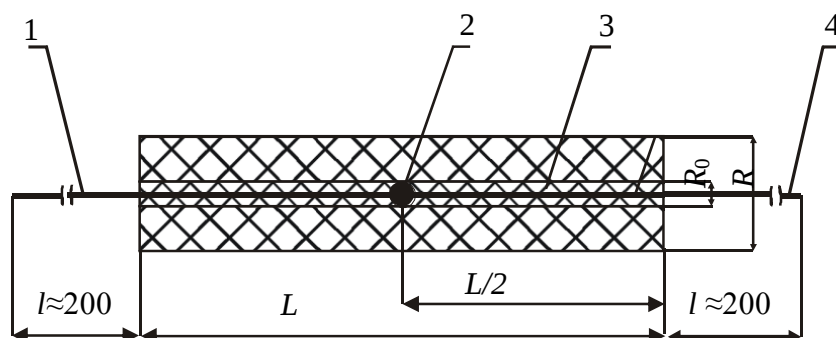
Таким образом, испытания образцов в соответствии с настоящей методикой могут более полно характеризовать тепло-физические свойства сферопластика в реальных условиях эксплуатации.

3 ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Образцы для испытаний изготавливают методами механической обработки по технологической карте раскроя, в которой предусмотрено вырезание заготовок из 3-х и более различных мест одного блока сферопластика.

3.2 Для проведения испытаний при заданном уровне гидростатического давления изготавливают партию образцов не менее 5, которые затем маркируют.

3.3 Образцы изготавливают в виде цилиндра (рис.1) радиусом $R = 10 \pm 0,5$ мм и длиной $L = 100 \pm 0,5$ мм. Размер образцов подобран из условия неограниченного цилиндра: $\frac{L}{R} \geq 10$.



1 – выводной конец термопары (хромель); 2 – спай термопар;
3 – компаунд; 4 – выводной конец термопары (копель)

Рисунок 1 – Экспериментальный образец

3.4 Образцы должны иметь ровную поверхность без сколов, трещин, раковин и заметных следов механической обработки.

3.5 Для заделки термопар внутри образца, вдоль оси цилиндра высверливается центральное отверстие. Диаметр центрального отверстия – R_0 , не должен превышать $0,1 \cdot R$ от диаметра образца, что обеспечит погрешность измерений не более 0,01.

3.6 Для герметизации центрального канала используется компаунд из сфероластика идентичного по составу и свойствам экспериментальным образцам см. рис.1)

4 ОБЪЕМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

4.1 Для проведения испытаний назначаются уровни гидростатического давления (3 – 4 уровня) из диапазона $0,2 \dots 0,5 P_{\text{гид}}$ (уловного предела прочности при гидростатическом сжатии).

4.2 Назначается допустимый при эксплуатации уровень накопленных повреждений $P_{\text{экс}} > 0,3$.

4.3 Для каждого уровня давления готовится партия образцов в количестве не менее 5 шт.

4.4 Перед началом испытаний определяется кажущаяся плотность каждого образца и его температуропроводность.

4.5 Образцы подвергают воздействию гидростатического давления и перепадам температур.

В состав одного цикла (рис.2)испытаний образцов входят следующие операции:

- выдержка в воде при заданном уровне гидростатического давления в течении 1 часа;
- замораживание образцов на воздухе при температуре минус $17 \pm 2^\circ\text{C}$ в течении 2 часов;
- оттаивание образцов в воде при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в течении 2 часов;
- взвешивание, определение массы проникшей воды;
- определение коэффициента температуропроводности.

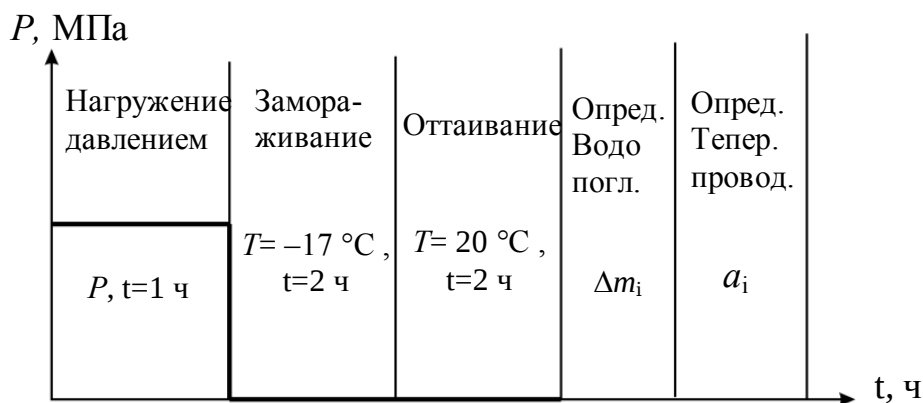


Рисунок 2 – Схема проведения одного цикла испытаний

5 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Проводится гидростатическое взвешивание согласно методики УКФА.730131.003 М, вычисляется масса образца на воздухе – m_0 , его начальный вес в воде – m_2 , гидростатический объем – V_0 и его начальная кажущаяся плотность – ρ_0 .

5.2 Определяется начальный коэффициент температуропроводности материала образца – a_0 согласно методики УКФА.360107.001 М.

5.3 Результаты замеров и вычислений заносятся в «таблицу исходных данных» (Табл. 1).

5.3 Образцы помещаются в испытательную камеру высокого давления.

5.4 Камеру нагружают заданным давлением P_n и выдерживают установленный промежуток времени.

5.5 После выдержки под гидростатическим давлением, образцы помещаются в камеру холода.

5.6 Образцы извлекаются из камеры холода и размораживаются в емкости наполненной водой до температуры окружающей среды.

5.7 Проводится гидростатическое взвешивание согласно методики УКФА.730131.003 М и определяется масса образца – m_i после испытаний. Определяется масса проникшей в материал воды – Δm по формуле:

$$\Delta m = m - m_2. \quad (1)$$

5.8 Определяется коэффициент температуропроводности – a_i по методике УКФА.360107.001 М.

5.9 Для каждого цикла испытаний проводятся действия в соответствии с п.5.3 – 5.8.

5.10 Результаты замеров заносятся в «Результаты испытаний» (Табл. 2) и оформляются протоколом испытаний (см. Приложение)

6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

6.1 Величину накопленных повреждений испытываемых образцов сферопластика после i – го цикла нагружения определяют по формуле:

$$\Pi_i = \frac{\Delta m_i}{\rho_v \cdot V_{\Pi}} \quad (2)$$

где Δm_i – масса проникшей в сферопластик воды, г;

$\rho_v = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность дистиллированной воды;

V_{Π} – объем воздушных включений см^3 .

Объем воздушных включений V_{Π} складывается из объема закрытых воздушных пор (дополнительная пористость) – $V_{\text{ДП}}$ и объема закрытой пористости, заключенной внутри микросфер – $V_{\text{ВМС}}$:

$$V_{\Pi} = V_{\text{ДП}} + V_{\text{ВМС}}. \quad (3)$$

Объем внутри микросфер определяется как:

$$V_{\text{ВМС}} = (1 - \nu) \cdot V_0 \cdot \chi - \frac{m_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент пористости, характеризующий относительный объем пор, который вводится в основу сферопластика при его изготовлении;

V_0 – гидростатический объем образца см^3 ;

χ – коэффициент заполнения объема микросферами;

$m_{\text{ст}}$ – масса стекла, г;

$\rho_{\text{ст}}$ – плотность стекла, из которого изготовлены микросферы г/см^3 .

Масса стекла вычисляется по формуле:

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{МК}} \cdot (1 - \nu) \cdot V_0 \cdot \chi, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{МК}}$ – плотность микросфер, г/см^3

Объем занимаемый дополнительными порами, вычисляется как

$$V_{\text{ДП}} = V_0 \cdot \nu. \quad (6)$$

6.2 Плотность испытываемых образцов сферопластика после i – го цикла нагружения определяют по формуле:

$$\rho_i = \frac{m_0 + \Delta m_i}{V_0}. \quad (7)$$

6.3 Результаты расчетов заносятся в «Результаты испытаний» (Табл. 2).

7 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

7.1 К проведению испытаний допускаются лица, имеющие право работы с сосудами высокого давления.

7.2 Камера высокого давления должна быть испытана на пробное давление $P_{\text{и}} < P_{\text{раб}}$.

7.3 Камера высокого давления с измерительным манометром во время испытаний должна быть закрыта защитным кожухом, имеющим смотровое окно.

7.4 Электротехнические средства испытаний и измерений должны иметь заземление и защиту от короткого замыкания.

7.5 К проведению испытаний допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лаборатории композиционных материалов и имеющие право работать с электрическим оборудованием до 1000 В.

7.6 Потенциометр, термометр, термопары и другие измерительные приборы должны пройти поверку по ДСТУ 2708 – 2006 .

7.7 Место проведения испытаний должно обеспечиваться хорошим освещением 400 лк.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

1. Камера высокого давления ($P_{\text{раб}}=100$ МПа).
2. Насосная станция для создания давления воды УНГР – 2000.
3. Манометр ЭКМ – 2У №32191.
4. Водопроводная вода ГОСТ 2874-82.
5. Весы ВЛЮ–1 класс точности 2.
6. Набор ртутных термометров – ТЛ 4: -20÷20 °С, 0÷50 °С, 50÷100 °С цена деления 0.5
7. Вода дистиллированная ГОСТ 6709-72.
8. Сосуд для гидростатического взвешивания
9. Камера тепла-холода для создания температуры минус 17 °С.
10. Термостат жидкостный лабораторный СЖМЛ –19/2,5–И1, объемом V=19 л, точность автоматического поддержания температуры $\pm 0,5$ °С
11. Потенциометр КСП2 – класс точности 1, по виду отсчетного устройства показывающий (или регистрирующий).
12. Термопара хромель-копель – градуировка ХК₆₈ предел измерения температур 0–100 °С, допускаемая погрешность $\Delta E=0,7\%$.
13. Секундомер точностью $\pm 0,05$ с
14. Электро-контактный термометр – предел измерений 0–100 °С классом точности 2.
15. Штангенциркуль ШЦ–11, точность измерений 0.05 мм, ГОСТ 166–89.
16. Используемое оборудование должно пройти метрологический контроль.

Образец протокола испытаний

ПРОТОКОЛ №

Эксперимент по определению повреждаемости и теплофизических свойств образцов из сферопластика при циклическом действии эксплуатационных факторов

Материал

Номер партии

Уровень гидростатического давления

Количество испытываемых образцов

Дата испытаний

Таблица 1 – Исходные данные

№ образца	Линейные размеры		Масса в воде m_z , г	Масса на воздухе m_0 , г	Объем V_0 , г/см ³	Плотность ρ_0 , г/см ³	Температуропроводность a_0 , м ² /с
	R, мм	L, мм					

Таблица 2 – Результаты испытаний

№ цикла i	Масса после испытаний m_i , г	Масса проникшей воды Δm_i , г	Повреждаемость Π_i	Плотность, ρ_i , г/см ³	Температуропроводность a_i , м ² /с
1					
2					
3					
.....					

Таблица 3 – Результаты статистической обработки повреждаемости

№ цикла i	Мат. Ожидание, $M(\Pi_i)$	Дисперсия, $S^2(\Pi_i)$	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{S^2(\Pi_i)}$	Коэффициент вариации $\nu = \frac{S(\Pi_i)}{M(\Pi_i)} \cdot 100\%$
1				
2				
3				

Таблица 4 – Результаты статистической обработки плотности

№ цикла i	Мат. Ожидание, $M(\rho_i), \text{г/см}^3$	Дисперсия, $S^2(\rho_i),$ $(\text{г/см}^3)^2$	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{S^2(\rho_i)}, \text{г/см}^3$	Коэффициент вариации $v = \frac{S(\rho_i)}{M(\rho_i)} \cdot 100\%$
1				
2				
3				

Таблица 5 – Результаты статистической обработки температуропроводности

№ цикла i	Мат. Ожидание, $M(a_i), \text{м}^2/\text{с}$	Дисперсия, $S^2(a_i),$ $(\text{м}^2/\text{с})^2$	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{S^2(a_i)}, \text{м}^2/\text{с}$	Коэффициент вариации $v = \frac{S(a_i)}{M(a_i)} \cdot 100\%$
1				
2				
3				

Расчетные формулы статистической обработки

Математическое ожидание:
$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j$$

Дисперсия:
$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(\bar{y} - y_j \right)^2$$

Среднеквадратическое отклонение:
$$S = \sqrt{S_y^2}$$

Коэффициент вариации:
$$v = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\%$$

где y – значение функции отклика, соответственно повреждаемости, плотности, температуропроводности.

j – порядковый номер образца;

N – количество образцов.

ДОДАТОК В

«Программа и методика определения температуропроводности
опытных образцов легковесомого материала плавучести сферопластика»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНЕВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

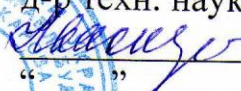
им. адм. Макарова



УТВЕРЖДАЮ

Проректор з НР

д-р техн. наук, проф.

 Квасницький В.Ф.
" " " " 2007р.

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ
ЛЕГКОВЕСОМОГО МАТЕРИАЛА ПЛАВУЧЕСТИ СФЕРОПЛАСТИКА

УКФА.360107.001 М.

Научный руководитель:
к.т.н., профессор



Бурдун. Е.Т

Нач. БМиС



Мацкевич. В.В

2007

1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

1.1 Согласно настоящей методике испытаниям подлежат образцы материала, называемого сферопластик. Последний представляет собой композит на основе эпоксидной смолы наполненной стеклянными микросферами Ø 5-200 мкм.

1.2 Предлагаемая методика может применяться для определения температуропроводности композиционных материалов.

1.3 Испытания проводятся с целью определения температуропроводности материала.

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.2 Методика разработана на основании результатов экспериментальных исследований температуропроводности сферопластика в соответствии с законом теплопроводности при граничных условиях 1-го рода. Изменение температуры во времени для тела, имеющего форму неограниченного цилиндра при равномерном распределении температур в начальный момент времени ($V_0=0$) выражается следующей зависимостью:

$$\theta = \frac{t - t_{жс}}{t_0 - t_{жс}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n I_1(\mu_n)} \cdot \exp\left(\frac{-\mu_n^2 a \tau}{R^2}\right), \quad (1)$$

где t_0 – начальная температура образца, °С;

$t_{жс}$ – температура среды (жидкости), °С;

t – текущее значение температуры, °С;

θ – относительная скорость изменения температура тела;

$(\mu_n \frac{r}{R})$ – аргумент, зависящий от координат;

μ_n – корни функции Бесселя $I_0(\mu)=0$ ($\mu_1=2,4048$, $\mu_2=5,5201\dots$,

$\mu_{n+1} - \mu_n \approx 3,14$);

I_0, I_1 – функции Бесселя первого рода, соответственно нулевого и первого порядка;

a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ – время, с;

R – радиус цилиндра, м.

По истечении некоторого времени, а следовательно увеличения числа Фурье $F_0 \geq 0,3$ ряд (1) оказывается настолько быстро сходящимся, что для практических расчетов достаточно ограничиться первым членом (погрешность не превышает 1%):

$$\theta = \frac{2I_0(\mu_1 \frac{r}{R})}{\mu_1 I_1(\mu_1)} e^{-m\tau}. \quad (2)$$

Величина m , входящая в уравнение (2) носит название темпа охлаждения (нагрева):

$$m = \frac{-\mu_1^2 a}{R^2}. \quad (3)$$

Темп охлаждения зависит от физических свойств, геометрической формы и размеров тела, а также от условий теплообмена с окружающей средой. Темп охлаждения характеризует относительную скорость изменения температуры тела от времени.

Сущность экспериментальных исследований состоит в определении скорости или темпа охлаждения (нагрева) образца, во времени. Для регулярного теплообмена относительная скорость изменения температуры во времени остается постоянной. В координатах $\ln V \sim \tau$ зависимость изменения относительной температуры $\ln V$ будет линейной (рис.1), что позволяет найти темп охлаждения (нагрева) графически, как угловой коэффициент прямой по формуле:

$$m_\infty = \frac{\ln V_1 - \ln V_2}{\tau_{a2} - \tau_{a1}}, \quad (4)$$

где $\ln V = t_{\text{ж}} - t_i$, ($i = 1; 2$);

t_i , °C – текущее значение температуры в момент времени τ ;

$t_{\text{ж}}$, °C – температура среды (жидкости);

τ_i – время, с.

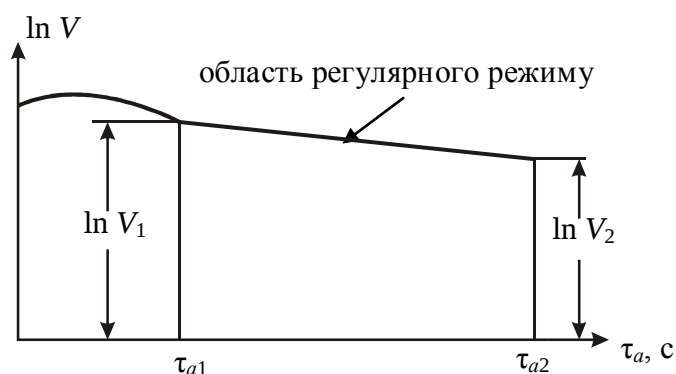


Рисунок 1 – Зависимость изменения температуры тела от времени при регулярном тепловом режиме

Если охлаждение (нагревание) тела происходит в среде с постоянной температурой при коэффициенте теплоотдачи $\alpha \rightarrow \infty$, то скорость охлаждения (нагревания) m прямо пропорционально коэффициенту температуропроводности:

$$a = k \cdot m_{\infty}, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности, характеризующий геометрическую форму и размеры тела. Расчетная формула коэффициента формы неограниченного цилиндра:

$$k = \left[\left(\frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (6)$$

где R – радиус цилиндра, м.

L – длина цилиндра, м.

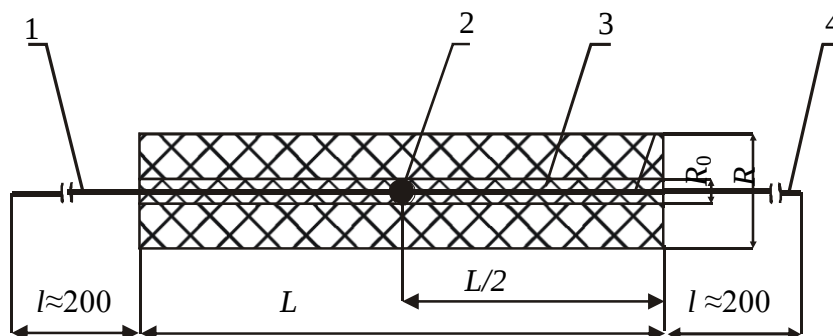
3 ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Образцы для испытаний изготавливают методами механической обработки по технологической карте раскроя, в которой предусмотрено вырезание заготовок из 3-х и более различных мест одного блока сферопластика.

3.2 Для проведения испытаний готовят партию образцов не менее 5, которые затем маркируют.

3.3 Образцы изготавливают в виде цилиндра с диаметром $R=20 \pm 0,5$ мм и длиной $L=100 \pm 0,5$ мм (рис.2). Размер образцов подобран из условия неограниченного цилиндра: $-\frac{L}{R} \geq 10$.

3.4 Образцы должны иметь ровную поверхность без сколов, трещин, раковин и заметных следов механической обработки.



1 – выводной конец термопары (хромель); 2 – спай термопар;
3 – компаунд; 4 – выводной конец термопары (копель)

Рисунок 1 – Экспериментальный образец

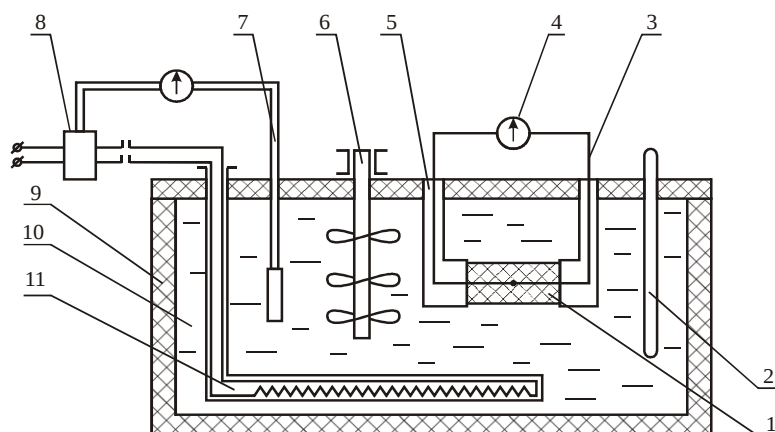
3.5 Для заделки термопар внутри образца, вдоль оси цилиндра высверливается центральное отверстие. Радиус центрального отверстия – R_0 , не должен превышать $0,1 \cdot R$ от радиуса образца, что обеспечит погрешность измерений не более 0,01:

$$\delta \sim \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \leq 0,005. \quad (7)$$

3.6 Для герметизации центрального канала используется компаунд из сфероластика идентичного по составу и свойствам экспериментальным образцам. Длина выводных концов термопары $l \approx 200 \div 250$ мм.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис 3.) состоит из следующих элементов: образец 1, на концах которого закреплены гидроизолирующие захваты 5, погружается в термостат 10, наполненный нагретой жидкостью 11 со стабильной температурой, которая визуальнo контролируется термометром 2. Нагрев жидкости осуществляется при помощи плоского электронагревателя 8. Автоматическое отключение нагревателя, при повышении температуры выше установленной нормы, осуществляется электро-контактным термометром 7, который подает сигнал магнитному пускателю 9 на размыкание электроцепи. Для равномерного распределения температуры жидкости используется лопастный смеситель 6. Температура внутри образца измеряется при помощи термопары 3, выводные концы которой присоединяются к контактам потенциометра 4.



- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 – исследуемый образец; | 2 – контрольный термометр; |
| 3 – термопара; | 4 – потенциометр; |
| 5 – гидроизолирующие захваты; | 6 – лопастный смеситель; |
| 7 – электро-контактный термометр; | 8 – магнитный пускатель; |
| 9 – корпус термостата; | 10 – дистиллированная вода; |
| 11 – нагреватель | |

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

5 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Испытания проводятся в закрытом помещении при температуре воздуха 20 ± 2 С°.

5.2 В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода.

5.3 Нагрев воды в термостате осуществляется одновременно с интенсивным перемешиванием.

5.4 Температура нагрева воды не должна превышать $80 \pm 0,5$ С°.

5.5 На концах образца устанавливаются гидроизолирующие захваты, что бы избежать влияния торцевых эффектов.

5.6 Во время испытаний отмечается начальная температура жидкости и время нагрева образца на каждые $2,5$ С°, показания заносятся в протокол испытаний.

5.7 Измерение температуры осуществляется в ручном или в автоматическом режиме.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1 Включается лопастной смеситель и нагреватель термостата, дистиллированная вода нагревается до температуры 80 С°.

6.2 По показаниям контрольного термометра визуально контролируется температура нагрева воды.

6.3 Температура нагретой воды поддерживается на уровне $80 \pm 0,5$ С°.

6.4 На концах образца устанавливаются гидроизолирующие захваты.

6.5 Выводные концы установленной вдоль оси цилиндра термопары, присоединяются к контактам потенциометра.

6.6 Измеряется начальная температура образца по показаниям потенциометра.

6.7 Образец погружается в термостат.

6.8 Включается секундомер отсчета времени.

6.9 Измеряется время при увеличении температуры на каждые $2,5$ С° на шкале потенциометра.

6.10 Испытание проводится до прогрева центральной зоны образца до 75 С°.

6.11 Образец извлекается из термостата и охлаждается на воздухе до температуры окружающей среды.

6.12 Для каждого образца проводится по два испытания, результаты заносятся в таблицу замеров и оформляются протоколом испытаний (табл.1).

7 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

7.1 По результатам изменения температуры образца от температуры окружающей среды в зафиксированное время, строится график зависимости $\ln(V_i) = f(\tau_i)$, где $\ln(V) = \left| t_{\text{ж}} - t_i \right|$

$t_{\text{ж}}$ – температура среды (жидкости), °C;

t_i – температура образца в момент времени τ_i , °C;

7.2 Визуально определяется прямолинейный участок и количество точек на нем n . В порядке возрастания τ пронумеровываются экспериментальные точки от $i = 1 \dots n$.

7.3 По графику определяется угловой коэффициент прямолинейного участка, характеризующий темп нагревания образца. Для точного определения прямолинейного участка, угловой коэффициент вычисляется по методу наименьших квадратов по формуле:

$$m_{\infty} = - \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \ln V_i - \sum_{i=1}^n \ln V_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right)^2}, \quad (8)$$

где n – количество точек на прямолинейном участке.

7.4 Температуропроводность испытуемого образца вычисляют по формуле:

$$a = k = \left[\left(\frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{-1} \cdot m_{\infty}. \quad (9)$$

7.5 Осредняются результаты расчетов температуропроводности материала образца по двум опытам:

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2}{2}. \quad (10)$$

7.6 Результаты расчетных значений заносятся в протокол испытаний (табл.1).

7.7 Производится статистическая обработка результатов испытаний партии образцов (табл.2).

8 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

8.1 К проведению испытаний допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лаборатории композиционных материалов и имеющие право работать с электрическим оборудованием до 1000 В.

8.2 Электрические части термостата и потенциометра должны иметь заземление.

8.3 Потенциометр, термометр, термопары и другие измерительные приборы должны пройти проверку ГОСТ стандарта.

8.4 Место проведения испытаний должно обеспечиваться хорошим освещением 400 лк.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

1. Термостат жидкостный лабораторный СЖМЛ–19/2,5–И1 объемом $V=19$ л, точность автоматического поддержания температуры $\pm 0,5$ °С
2. Вода, дистиллированная по ГОСТ 6709-72
3. Термометр спиртовой – предел измерений $0 \dots 100$ °С класс точности 2.
4. Потенциометр КСП2 – класс точности 1, по виду отсчетного устройства показывающий (или регистрирующий).
5. Термопара хромель-копель – градуировка ХК₆₈ предел измерения температур $0 \dots 100$ °С, допускаемая погрешность $\Delta E=0,7\%$.
6. Секундомер точностью $\pm 0,05$ с
7. Электро-контактный термометр – предел измерений $0 \dots 100$ °С классом точности 2.0.
8. Используемое оборудование должно пройти метрологический контроль.

Образец протокола испытаний

ПРОТОКОЛ №

Эксперимент по определению температуропроводности образцов из
сферопластика с дополнительной пористостью

Материал

Номер партии

Количество испытываемых образцов

Дата испытаний

Длина образца, м –

Диаметр образца, м –

Таблица 1– Показания измерений

№	Тем - ра внутри образца, °C во время нагрева t_i	Время нагрева τ_i , с	
		Опыт 1	Опыт 2
	20		
	22,5		
	25		
	27,5		
	30		
	32,5		
	35		
	37,5		
	40		
	42,5		
	45		
	47,5		
	50		
	52,5		
	55		
	57,5		
	60		
	62,5		
	65		
	67,5		
	70		
	72,5		
	75		

Начальная температура образца при опыте 1, t_n , °C =

Температура в термостате при опыте 1, $t_{ж}$ °C =

Начальная температура образца при опыте 2, t_n , °C =

Температура в термостате при опыте 2, $t_{ж}$ °C =

Температуропроводность материала при опыте 1: a_1

Температуропроводность материала при опыте 2: a_2

Среднее значение температуропроводности: $\bar{a}$

Таблица 2 – Результаты статистической обработки

№ образца j	Температуропроводность, м ² /с	Мат. Ожидание, м ² /с	Дисперсия, (м ² /с) ²	Среднеквадратическое отклонение, м ² /с	Коэффициент вариации
1					
2					
3					
4					
5					

Расчетные формулы статистической обработки:

Математическое ожидание:
$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_j$$

Дисперсия:
$$S_a^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(\bar{a} - a_j \right)^2$$

Среднеквадратическое отклонение:
$$S = \sqrt{S_a^2}$$

Коэффициент вариации:
$$v = \frac{S}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

ДОДАТОК Г

**Початкові характеристики моделей блока плавучості до гідростатичних
навантажень**

ДОДАТОК Г

Протокол випробувань з визначення початкової уявної густини зразків блока зі СДП, що використовуються для тривалого гідростатичного навантаження

Дата проведення випробувань –

Кількість зразків – 20

Умови проведення випробувань – лабораторні

Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,240$ г

Густина дистильованої води $\rho_{\text{в}} = 1$ г/см³

Таблиця Г 1 – Визначення уявної густини зразків

№ зразка	Лінійні розміри зразка		Маса зразка на повітрі, m_0 , г	Маса зразка у воді з вантажем, m_z , г	Гідростатичний об'єм зразка, $V_0 = \frac{m_0 - (m_z - m_{zp})}{\rho_{\text{в}}}$, см ³	Уявна густина зразка, $\rho = \frac{m_0}{V_0}$, г/см ³
	Радіус R , мм	Довжина L , мм				
1	2	3	4	5	6	7
1.	10,1	100,5	14,79	103,95	31,08	0,48
2.	10,25	100,45	14,91	103,93	31,22	0,48
3.	10,13	100,05	14,87	104,18	30,93	0,48
4.	10,05	100,3	15,05	103,97	31,32	0,48
5.	9,98	100,2	14,65	104,65	30,24	0,48
6.	10,13	100,05	14,91	104,27	30,88	0,48
7.	10,03	100,25	15,22	104,2	31,26	0,48
8.	10,05	90,95	14,63	104,59	30,28	0,49
9.	10,25	100,05	14,62	104,03	30,83	0,49
10.	10,05	100,05	14,88	103,8	31,32	0,49
11.	10,05	100,2	15,12	104,67	30,69	0,49
12.	10,15	100,05	15,3	104,53	31,01	0,47
13.	10,03	100,45	14,97	103,62	31,59	0,47
14.	10,23	100,1	15,23	104,42	31,05	0,47
15.	10,13	100,25	14,83	103,81	31,26	0,47

Продовження таблиці Г1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
16.	10,18	100,1	15,08	104,5	30,82	0,47
17.	10,15	100,1	15,15	103,79	31,6	0,48
18.	10,03	100,05	15,32	103,8	31,76	0,48
19.	10,08	100,2	15,28	103,87	31,65	0,48
20.	10,05	100,25	15	104,5	30,74	0,49

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

ДОДАТОК Г

Протокол випробувань визначення початкових теплофізичних властивостей зразків блока зі СДП для тривалого гідростатичного навантаження

Дата проведення випробувань –

Кількість зразків – 20

Умови проведення випробувань – лабораторні

Таблиця Г 2 – Визначення теплофізичних характеристик зразків

№ зразка	Темп нагріван-ня $m \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$	Коеф. форми $k \cdot 10^5, \text{м}^2$ $k = \left[\left(\frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{-1}$	Коеф. температуро- провідності $a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$ $a = k \cdot m$	Теплоємність $c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	Уявна густина зразка $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Коеф. теплопровідності $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°К})$ $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$
1	2	3	4	5	6	7
1.	8,15	1,73	1,41	1,28	480	0,087
2.	7,82	1,79	1,40	1,28	480	0,086
3.	8,16	1,74	1,42	1,28	480	0,087
4.	8,08	1,72	1,39	1,28	480	0,085
5.	8,28	1,69	1,40	1,28	480	0,086
6.	7,93	1,74	1,38	1,28	480	0,085
7.	8,19	1,71	1,40	1,28	480	0,086
8.	8,19	1,71	1,40	1,28	490	0,088
9.	7,92	1,78	1,41	1,28	490	0,088
10.	8,26	1,72	1,42	1,28	490	0,089
11.	8,20	1,72	1,38	1,28	490	0,088
12.	7,94	1,75	1,41	1,28	470	0,084
13.	8,01	1,71	1,39	1,28	470	0,082
14.	7,75	1,78	1,37	1,28	470	0,083
15.	7,99	1,74	1,38	1,28	470	0,084
16.	7,84	1,76	1,38	1,28	470	0,083
17.	8,06	1,75	1,41	1,28	480	0,087
18.	8,19	1,71	1,4	1,28	480	0,086

Продовження таблиці Г 2

1	2	3	4	5	6	7
19.	8,03	1,73	1,39	1,28	480	0,085
20.	8,26	1,72	1,42	1,28	490	0,089

(5) – теплоємність зразків, знаходилася за формулою:

$$c = \frac{c_{cm} \cdot m_{cm} + c_{cv} \cdot m_{cv}}{m_{cm} + m_{cv}},$$

де $c_{cm} = 670$ Дж/(кг·К) теплоємність скляних мікросфер;

$c_{cv} = 1500$ Дж/(кг·К) теплоємність епоксидного зв'язуючого (ЕД-20);

m_{cm} – маса скляних мікросфер для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг ;

m_{cv} – маса зв'язуючого для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг;

Маса повітряних включень мала в порівнянні з масою інших компонентів, тому на результат розрахунку не впливає, и при розрахунках не враховувалась.

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

ДОДАТОК Д

**Характеристики моделей блока плавучості після тривалих гідростатичних
навантажень**

ДОДАТОК Д

Протокол випробувань визначення теплофізичних властивостей в пошкодженості зразків блока зі СДП при тривалому гідростатичному навантаженні

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 18$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$

Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150 \text{ г}$

Таблиця Д1 – Розрахунок пошкодженості і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Тривалість навантаження, τ , год	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·°К)	Коеф.температуропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7$, ($\text{м}^2/\text{с}$)	Коеф. теплопровідності λ , Вт/(м·°К) $\lambda = ac\rho$	Пошкодженість зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_g \cdot V_{\Pi}} \cdot 100 \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$e^{0.5}$	105,53	105,93	0,4	0,493	1357	1,377	0,092	1,962
	e^1		106,07	0,54	0,497	1382	1,408	0,097	2,65
	e^2		106,09	0,56	0,498	1386	1,378	0,095	2,75
	e^3		106,09	0,56	0,498	1386	1,414	0,098	2,75
	e^4		106,18	0,65	0,501	1420	1,410	0,100	3,1
	e^5		106,42	0,89	0,509	1445	1,39	0,102	4,37
	e^6		106,66	1,13	0,516	1486	1,366	0,105	4,98

Продовження таблиці Д1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	$e^{0.5}$	105,51	106,03	0,52	0,497	1379	1,376	0,094	2,56
	e^1		106,16	0,65	0,501	1402	1,41	0,099	3,20
	e^2		106,2	0,69	0,502	1409	1,395	0,099	3,39
	e^3		106,23	0,72	0,503	1415	1,399	0,100	3,54
	e^4		106,32	0,81	0,506	1425	1,382	0,100	3,98
	e^5		106,42	0,91	0,509	1447	1,389	0,102	4,47
	e^6		106,82	1,31	0,522	1470	1,373	0,105	6,44
3	$e^{0.5}$	105,86	106,5	0,64	0,501	1400	1,386	0,098	3,15
	e^1		106,56	0,7	0,503	1411	1,402	0,101	3,44
	e^2		106,64	0,78	0,505	1425	1,381	0,101	3,83
	e^3		106,64	0,78	0,505	1425	1,380	0,101	3,83
	e^4		106,71	0,85	0,507	1455	1,360	0,104	4,18
	e^5		106,91	1,05	0,514	1469	1,356	0,104	5,16
	e^6		107,05	1,19	0,518	1496	1,365	0,106	5,85
4	$e^{0.5}$	105,49	106,18	0,69	0,502	1409	1,377	0,097	3,39
	e^1		106,27	0,78	0,505	1425	1,385	0,100	3,83
	e^2		106,31	0,82	0,506	1432	1,375	0,100	4,03
	e^3		106,31	0,82	0,506	1432	1,377	0,100	4,03
	e^4		106,39	1,04	0,513	1460	1,365	0,108	5,13
	e^5		106,55	1,06	0,514	1470	1,357	0,103	5,21
	e^6		106,64	1,15	0,517	1489	1,350	0,104	5,65
5	$e^{0.5}$	105,32	106,06	0,74	0,504	1418	1,365	0,098	3,64
	e^1		106,25	0,93	0,511	1440	1,384	0,102	4,57
	e^2		106,25	0,93	0,511	1446	1,380	0,102	4,57
	e^3		106,25	0,93	0,511	1446	1,375	0,102	4,57
	e^4		106,47	1,15	0,518	1450	1,365	0,103	5,65
	e^5		106,64	1,32	0,524	1470	1,353	0,104	6,49
	e^6		106,83	1,51	0,530	1480	1,376	0,108	7,42

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 26$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$
Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150 \text{ г}$

Таблиця Д 2 – Розрахунок пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Тривалість навантаження, τ , год	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·°К)	Коеф.темпериатуропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7 (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. теплопровідності λ , Вт/(м·°К) $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджуваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_e \cdot V_{\Pi}} \cdot 100$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	$e^{0.5}$	105,42	106,42	1	0,512	1464	1,358	0,102	4,91
	e^1		106,66	1,24	0,520	1504	1,328	0,104	6,08
	e^2		107,27	1,85	0,540	1602	1,294	0,112	9,07
	e^3		109,22	3,8	0,603	1871	1,246	0,141	18,64
	e^4		111,57	6,15	0,679	2130	1,213	0,175	30,16
	e^5		114,08	7,66	0,738	2339	1,21	0,209	37,5
	e^6		115,43	9,55	0,785	2439	1,16	0,222	46,85
7	$e^{0.5}$	105,53	106,83	1,3	0,522	1514	1,3	0,103	6,38
	e^1		107,1	1,57	0,530	1558	1,42	0,117	7,70
	e^2		107,61	2,08	0,547	1637	1,41	0,126	10,20
	e^3		109,26	3,73	0,599	1863	1,384	0,154	18,29
	e^4		110,52	4,99	0,640	2010	1,364	0,175	24,48
	e^5		113,47	7,94	0,734	2291	1,279	0,215	38,95
	e^6		115,51	9,78	0,793	2440	1,231	0,238	47,98

Продовження таблиці Д 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	$e^{0.5}$	105,380	106,44	1,06	0,525	1474	1,37	0,106	5,29
	e^1		106,77	1,29	0,523	1519	1,39	0,110	6,33
	e^2		107,36	1,98	0,555	1622	1,384	0,125	9,88
	e^3		108,81	3,43	0,603	1825	1,382	0,152	17,12
	e^4		110,8	5,42	0,669	2056	1,348	0,185	27,05
	e^5		113,28	7,9	0,751	2288	1,32	0,227	39,43
	e^6		114,5	9,12	0,791	2384	1,29	0,243	45,52
9	$e^{0.5}$	105,46	106,63	1,00	0,522	1485	1,37	0,106	5,84
	e^1		106,9	1,35	0,524	1530	1,42	0,114	6,66
	e^2		107,69	2,05	0,556	1650	1,413	0,130	10,00
	e^3		109,19	3,73	0,611	1855	1,387	0,157	18,62
	e^4		111,01	5,55	0,67	2100	1,362	0,192	29,5
	e^5		113,76	8,3	0,759	2336	1,322	0,234	42,37
	e^6		114,96	9,5	0,798	2430	1,265	0,245	49,06
10	$e^{0.5}$	105,54	106,52	0,98	0,521	1460	1,385	0,105	4,892
	e^1		106,8	1,26	0,530	1507	1,42	0,113	6,289
	e^2		107,69	2,0	0,554	1642	1,42	0,129	9,810
	e^3		109,52	3,98	0,617	1893	1,417	0,166	19,866
	e^4		111,68	6,14	0,686	2129	1,371	0,200	30,648
	e^5		113,85	8,31	0,755	2322	1,291	0,226	41,479
	e^6		115,22	9,38	0,794	2420	1,268	0,244	46,00

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 30$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$
Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150$ г

Таблиця Д 3 - Розрахунок пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Тривалість навантаження, τ , год	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·°К)	Коеф.темпера-туропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7 (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. тепло-провідності λ Вт/(м·°К) $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджу-ваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_s \cdot V_{\Pi}} \cdot 100$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11		105,45	108,01	2,56	0,573	1800	1,306	0,135	12,56
			109,89	4,44	0,635	2058	1,305	0,171	21,79
	e^2		112,16	6,71	0,709	2183	1,254	0,194	32,92
	e^3		113,09	7,64	0,739	2266	1,214	0,203	37,49
	e^4		113,68	8,23	0,758	2315	1,15	0,202	40,38
	e^5		115,2	9,75	0,808	2431	1,21	0,238	47,84
	e^6		115,7	10,25	0,824	2466	1,1	0,224	50,29
12	$e^{0.5}$	105,52	107,81	2,29	0,564	1495	1,3	0,110	11,24
	e^1		109,98	4,46	0,634	1950	1,42	0,176	21,88
	e^2		112,16	6,64	0,704	2177	1,41	0,216	32,58
	e^3		114,07	8,55	0,766	2341	1,384	0,248	41,95
	e^4		115,21	9,69	0,802	2341	1,364	0,256	47,55
	e^5		115,97	10,45	0,827	2479	1,250	0,256	51,28
	e^6		116,47	10,95	0,843	2505	1,231	0,260	53,73

Продовження таблиці ДЗ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	$e^{0.5}$	105,35	107,99	2,49	0,549	1690	1,41	0,131	12,22
	e^1		109,89	4,39	0,609	1942	1,396	0,165	21,54
	e^2		111,84	6,34	0,671	2148	1,38	0,199	31,11
	e^3		113,77	8,27	0,732	2318	1,32	0,224	40,58
	e^4		114,71	9,21	0,762	2318	1,31	0,231	45,19
	e^5		115,5	10	0,787	2448	1,275	0,246	49,07
	e^6		116,27	10,77	0,811	2500	1,248	0,253	52,85
14	$e^{0.5}$	105,43	107,89	2,46	0,569	1693	1,41	0,136	12,07
	e^1		109,79	4,36	0,630	1939	1,41	0,172	21,39
	e^2		111,84	6,41	0,696	2155	1,4	0,210	31,45
	e^3		113,83	8,4	0,761	2329	1,353	0,240	41,22
	e^4		114,61	9,18	0,786	2389	1,261	0,237	45,04
	e^5		115,21	9,78	0,805	2433	1,21	0,237	47,99
	e^6		115,96	10,53	0,829	2484	1,18	0,243	51,67
15	$e^{0.5}$	105,48	107,81	2,33	0,545	1634	1,42	0,126	11,43
	e^1		109,65	4,17	0,603	1916	1,41	0,163	20,46
	e^2		111,5	6,02	0,663	2117	1,39	0,195	29,54
	e^3		112,99	7,51	0,710	2255	1,327	0,212	36,85
	e^4		113,88	8,4	0,739	2329	1,264	0,218	41,22
	e^5		114,57	9,09	0,761	2382	1,258	0,228	44,60
	e^6		115,45	10,05	0,791	2450	1,196	0,232	49,31

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 34$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$
Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150 \text{ г}$

Таблиця Д 4 – Розрахунок пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Тривалість навантаження, τ , год	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·°К)	Коеф.температуропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7 (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. теплопровідності $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$ $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджуваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_e \cdot V_{\Pi}} \cdot 100$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	$e^{0.5}$	105,32	110,48	5,56	0,650	2048	1,382	0,184	25,76
	e^1		112,38	7,06	0,699	2215	1,272	0,197	35,24
	e^2		113,34	8,02	0,730	2298	1,255	0,211	40,032
	e^3		114,01	8,69	0,752	2352	1,231	0,218	43,376
	e^4		114,66	9,34	0,773	2401	1,195	0,222	46,621
	e^5		116,05	10,73	0,818	2498	1,193	0,244	53,56
	e^6		117,13	11,81	0,853	2566	1,184	0,259	58,95
17	$e^{0.5}$	105,45	111,11	5,66	0,659	2081	1,355	0,186	27,45
	e^1		113,79	8,34	0,744	2324	1,294	0,224	40,45
	e^2		114,9	9,45	0,779	2409	1,239	0,233	45,84
	e^3		115,65	10,2	0,803	2462	1,23	0,243	49,74
	e^4		116,43	10,98	0,827	2514	1,194	0,248	53,26
	e^5		117,53	12,08	0,862	2624	1,19	0,269	62,09
	e^6		118,51	13,06	0,893	2639	1,177	0,277	63,35

Продовження таблиці Д4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	$e^{0.5}$	105,38	111,23	5,85	0,664	2196	1,393	0,203	33,23
	e^1		114,08	8,7	0,754	2352	1,28	0,227	42,19
	e^2		114,85	9,47	0,778	2410	1,243	0,233	45,93
	e^3		115,36	9,98	0,794	2447	1,236	0,240	48,41
	e^4		115,99	10,61	0,814	2490	1,154	0,234	51,46
	e^5		116,9	11,52	0,843	2548	1,142	0,245	55,88
	e^6		117,74	12,36	0,869	2599	1,125	0,254	59,95
19	$e^{0.5}$	105,42	111,58	6,16	0,675	2131	1,366	0,201	29,88
	e^1		112,6	7,18	0,707	2226	1,3	0,196	34,83
	e^2		113,34	7,92	0,730	2290	1,291	0,205	38,42
	e^3		113,83	8,41	0,746	2330	1,263	0,216	40,79
	e^4		114,41	8,99	0,764	2375	1,216	0,220	43,61
	e^5		115,17	9,75	0,788	2431	1,214	0,221	47,29
	e^6		116,15	10,73	0,819	2498	1,211	0,233	52,04
20	$e^{0.5}$	105,36	111,9	6,54	0,703	2167	1,334	0,203	31,72
	e^1		113,48	8,12	0,754	2306	1,271	0,221	39,38
	e^2		114,04	8,68	0,772	2351	1,262	0,229	42,10
	e^3		114,62	9,26	0,791	2395	1,256	0,238	44,91
	e^4		115,2	9,84	0,810	2437	1,237	0,244	47,73
	e^5		116,15	10,79	0,841	2502	1,211	0,255	52,34
	e^6		117,05	11,69	0,870	2559	1,21	0,269	56,70

(7) - теплоємність пошкоджених зразків, знаходилася за формулою:

$$C = \frac{c_{cm} \cdot m_{cm} + c_{cv} \cdot m_{cv} + c_v \cdot \Delta m}{m_{cm} + m_{cv} + \Delta m},$$

де $c_{cm} = 670$ Дж/(кг·°К) теплоємність скляних мікросфер;

$c_{cv} = 1500$ Дж/(кг·К) теплоємність епоксидного зв'язуючого (ЕД-20);

$c_v = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ теплоємність води, що проникла у зразок;
 $m_{ст}$ – маса скляних мікросфер для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг ;
 $m_{св}$ – маса зв'язуючого для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг;
 Δm – маса води, що проникла у зразок, кг.

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

Статистична обробка результатів експерименту при тривалому гідростатичному навантаженні тиском $P = 18$ МПа

Таблиця Д5 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\Pi)$, %	Дисперсія, $S^2(\Pi_i)$, $(\%)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	3,18	0,21	0,46	14,15
e^1	3,28	0,24	0,49	15,05
e^2	3,96	0,24	0,49	12,37
e^3	3,99	0,14	0,37	9,42
e^4	4,74	0,62	0,79	16,68
e^5	5,14	0,71	0,84	16,47
e^6	6,06	0,84	0,91	15,13

Таблиця Д6 – Результати статистичної обробки густини

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\rho)$, г/см ³	Дисперсія, $S^2(\rho)$, $(\text{г/см}^3)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, г/см ³	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,499	0,000019	0,0044	0,882
e^1	0,503	0,000027	0,0052	1,034
e^2	0,504	0,000023	0,0048	0,961
e^3	0,505	0,000022	0,0047	0,940
e^4	0,515	0,000269	0,016	3,19
e^5	0,515	0,000038	0,0061	1,184
e^6	0,520	0,000033	0,0057	1,103

Таблиця Д7 – Результати статистичної обробки коеф. температуропровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(a)$, м ² /с	Дисперсія, $S^2(a_i)$, $(\text{м}^2/\text{с})^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(a)}$, м ² /с	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	1,37	0,000055	0,0075	0,54
e^1	1,39	0,000157	0,012	0,89
e^2	1,38	0,000064	0,0080	0,57
e^3	1,38	0,000286	0,0169	1,22
e^4	1,37	0,000473	0,0218	1,58
e^5	1,37	0,000242	0,0156	1,14
e^6	1,36	0,000146	0,0121	0,88

Таблиця Д8 – Результати статистичної обробки коеф. теплопровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\lambda)$, Вт/(м·°K)	Дисперсія, $S^2(\lambda)$, $(\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{K}))^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, Вт/(м·°K)	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,096	$7,25 \cdot 10^{-6}$	0,0027	2,81
e^1	0,099	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,0021	2,12
e^2	0,099	$7,5 \cdot 10^{-6}$	0,0027	2,75
e^3	0,100	$2,25 \cdot 10^{-6}$	0,0015	1,50
e^4	0,103	0,000011	0,0033	3,2
e^5	0,103	$1 \cdot 10^{-6}$	0,0010	0,97
e^6	0,105	$2,75 \cdot 10^{-6}$	0,0017	1,57

Статистична обробка результатів експерименту при тривалому гідростатичному навантаженні тиском $P = 26$ МПа

Таблиця Д9 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Трива- лість наванта- ження, τ, год	Мат. очікуван- ня М (Π) , %	Диспер- сія, $S^2(\Pi_i)$, (%) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	5,46	0,411	0,64	11,72
e^1	6,61	0,413	0,64	9,72
e^2	9,79	0,817	0,43	4,38
e^3	18,5	0,962	0,98	5,30
e^4	28,37	6,64	2,57	9,08
e^5	40,95	5,127	2,26	5,67
e^6	48,19	2,317	1,52	3,215

Таблиця Д11 – Результати статистичної обробки коеф.
температуропровідності

Трива- лість наванта- ження, τ, год	Мат. очікуван- ня М(a), м ² /с	Диспер- сія, $S^2(a_i)$, (м ² /с) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(a)}$, м ² /с	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	1,356	0,00109	0,033	2,43
e^1	1,40	0,00162	0,040	2,88
e^2	1,391	0,00278	0,053	3,81
e^3	1,363	0,00449	0,067	4,92
e^4	1,332	0,00446	0,066	5,01
e^5	1,284	0,00207	0,045	3,54
e^6	1,242	0,00258	0,050	4,09

Таблиця Д10 – Результати статистичної обробки густини

Трива- лість наванта- ження, τ, год	Мат. очікуван- ня М (ρ), г/см ³	Диспер- сія, $S^2(\rho)$, (г/см ³) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, г/см ³	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,519	0,000032	0,0057	1,08
e^1	0,525	0,00002	0,0045	0,85
e^2	0,550	0,000046	0,0068	1,24
e^3	0,600	0,000107	0,104	1,71
e^4	0,668	0,000308	0,017	2,63
e^5	0,747	0,000118	0,109	1,46
e^6	0,792	0,000022	0,0048	0,60

Таблиця Д12 – Результати статистичної обробки коеф.
теплопровідності

Трива- лість наванта- ження, τ, год	Мат. очікуван- ня М(λ), Вт/(м·°K)	Диспер- сія, $S^2(\lambda)$, (Вт/(м·°K)) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$,Вт/(м·°K)	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,104	6,5·10-6	0,0025	2,43
e^1	0,112	0,0000245	0,0049	4,44
e^2	0,124	0,0000585	0,0076	6,13
e^3	0,154	0,0000815	0,0090	5,86
e^4	0,184	0,000120	0,0110	5,93
e^5	0,222	0,000100	0,01	4,52
e^6	0,238	0,000091	0,0096	4,01

Статистична обробка результатів експерименту при тривалому гідростатичному навантаженні тиском $P = 30$ МПа

Таблиця Д13 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\Pi)$, %	Дисперсія, $S^2(\Pi_i)$, $(\%)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	11,9	0,408	0,639	5,36
e^1	22,40	0,428	0,655	3,05
e^2	31,51	1,794	1,339	4,25
e^3	39,61	5,280	2,297	5,80
e^4	43,86	8,964	2,994	6,82
e^5	48,14	5,842	2,417	5,02
e^6	51,85	3,363	1,833	3,55

Таблиця Д15 – Результати статистичної обробки коеф. температуропровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(a)$, m^2/c	Дисперсія, $S^2(a_i)$, $(m^2/c)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(a)}$, m^2/c	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	1,380	0,00382	0,0618	4,51
e^1	1,380	0,00309	0,0556	4,00
e^2	1,366	0,00410	0,0640	4,69
e^3	1,320	0,00411	0,0642	4,86
e^4	1,270	0,00624	0,0790	6,22
e^5	1,241	0,00086	0,0294	2,36
e^6	1,20	0,00342	0,0585	4,91

Таблиця Д14 – Результати статистичної обробки густини

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\rho)$, $г/см^3$	Дисперсія, $S^2(\rho_i)$, $(г/см^3)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, $г/см^3$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,560	0,000153	0,0124	2,21
e^1	0,621	0,000304	0,0175	2,81
e^2	0,688	0,000426	0,0207	2,99
e^3	0,742	0,000517	0,0227	3,06
e^4	0,770	0,000612	0,0247	3,22
e^5	0,797	0,000620	0,0249	3,12
e^6	0,820	0,000417	0,0204	2,49

Таблиця Д16 – Результати статистичної обробки коеф. теплопровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\lambda)$, $Вт/(м \cdot ^\circ K)$	Дисперсія, $S^2(\lambda_i)$, $(Вт/(м \cdot ^\circ K))^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, $Вт/(м \cdot ^\circ K)$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,127	0,00015	0,0123	9,60
e^1	0,170	0,0000383	0,0062	3,65
e^2	0,203	0,0000948	0,0097	4,79
e^3	0,225	0,000352	0,0188	8,32
e^4	0,228	0,000412	0,0203	8,87
e^5	0,240	0,000112	0,0106	4,39
e^6	0,244	0,000226	0,0151	6,21

Статистична обробка результатів експерименту при тривалому гідростатичному навантаженні тиском $P = 34$ МПа

Таблиця Д17 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\Pi)$, %	Дисперсія, $S^2(\Pi_i)$, $(\%)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	29,61	9,27	3,04	10,28
e^1	38,42	10,56	3,25	8,46
e^2	42,46	11,45	3,38	7,97
e^3	45,46	13,37	3,65	8,04
e^4	48,54	14,86	3,85	7,94
e^5	54,23	29,17	5,40	9,95
e^6	58,20	17,58	4,19	7,21

Таблиця Д19 – Результати статистичної обробки коеф. температуропровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(a)$, $\text{м}^2/\text{с}$	Дисперсія, $S^2(a_i)$, $(\text{м}^2/\text{с})^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(a)}$, $\text{м}^2/\text{с}$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	1,366	0,000533	0,0231	1,69
e^1	1,283	0,000171	0,0131	1,02
e^2	1,258	0,000425	0,0206	1,64
e^3	1,243	0,000233	0,0153	1,23
e^4	1,199	0,000949	0,0308	2,57
e^5	1,190	0,000832	0,0289	2,42
e^6	1,181	0,001225	0,0350	2,96

Таблиця Д18 – Результати статистичної обробки густини

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\rho)$, $\text{г}/\text{см}^3$	Дисперсія, $S^2(\rho_i)$, $(\text{г}/\text{см}^3)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, $\text{г}/\text{см}^3$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,689	0,000859	0,0293	4,37
e^1	0,732	0,000706	0,0266	3,63
e^2	0,760	0,000657	0,0256	3,38
e^3	0,780	0,000696	0,0264	3,39
e^4	0,800	0,000762	0,0276	3,46
e^5	0,835	0,000832	0,0288	3,47
e^6	0,865	0,000771	0,0278	3,22

Таблиця Д 20 – Результати статистичної обробки коеф. теплопровідності

Тривалість навантаження, τ , год	Мат. очікування $M(\lambda)$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{K})$	Дисперсія, $S^2(\lambda_i)$, $(\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{K}))^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{K})$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
$e^{0,5}$	0,196	0,000092	0,0096	4,90
e^1	0,213	0,000231	0,0152	7,14
e^2	0,225	0,000185	0,0136	6,12
e^3	0,235	0,000187	0,0137	5,92
e^4	0,240	0,000210	0,0145	6,20
e^5	0,250	0,000322	0,0179	7,27
e^6	0,260	0,000284	0,0169	6,52

ДОДАТОК Е

Початкові характеристики моделей блока плавучості до кліматичних навантажень

ДОДАТОК Е

Протокол випробувань визначення початкових теплофізичних властивостей зразків блока зі СДП, що використовуються для кліматичного навантаження

Дата проведення випробувань –
 Умови проведення випробувань – лабораторні
 Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150$ г
 Густина дистильованої води $\rho_в = 1$ г/см³

Кількість зразків – 15

Таблиця Е1 – Визначення уявної густини зразків

№ зразка	Лінійні розміри зразка		Маса зразка на повітрі, m_0 , г	Маса зразка у воді з вантажем, m_z , г	Гідростатичний об'єм зразка, $V_0 = \frac{m_0 - (m_z - m_{zp})}{\rho_в}$, см ³	Уявна густина зразка, $\rho = \frac{m_0}{V_0}$, г/см ³
	Радіус R , мм	Довжина L , мм				
1	2	3	4	5	6	7
1.	10,08	100,25	14,8	103,76	31,19	0,47
2.	10	100,35	14,52	104,1	30,57	0,47
3.	10,05	100,25	14,81	104	30,96	0,48
4.	10,08	100	15,05	103,73	31,47	0,48
5.	10,13	100,25	14,82	104,09	30,88	0,48
6.	10	100,25	14,95	103,96	31,14	0,48
7.	10,08	100,05	15,03	103,95	31,23	0,47
8.	10,03	100,15	15,22	103,7	31,67	0,48
9.	10,03	100,15	14,85	104,13	30,87	0,48
10.	10	100,15	14,99	104,1	31,04	0,48
11.	10,05	100,05	15,21	104	31,36	0,49
12.	10,03	100,05	15,15	104,1	31,2	0,49
13.	10,08	100,05	15,4	104,1	31,45	0,49
14.	10,05	100,25	15,17	104,39	30,93	0,49
15.	10,05	100,25	15,39	104,2	31,34	0,49

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

ДОДАТОК Е

Протокол випробувань визначення початкових теплофізичних властивостей зразків блока зі СДП

для кліматичних навантажень

Дата проведення випробувань –

Кількість зразків – 15

Умови проведення випробувань – лабораторні

Таблиця Е2 – Визначення теплофізичних характеристик зразків

№ зразка	Темп нагрівання $m \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$	Коеф. форми $k \cdot 10^5, \text{м}^2$ $k = \left[\left(\frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{-1}$	Коеф. температуро- провідності $a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$ $a = k \cdot m$	Теплоємність $c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{К})$	Уявна густина зразка $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Коеф. теплопровідності $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$ $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$
1	2	3	4	5	6	7
1.	8,32	1,73	1,43	1,28	470	0,086
2.	8,092	1,70	1,40	1,28	470	0,084
3.	7,462	1,72	1,30	1,28	480	0,080
4.	7,602	1,73	1,32	1,28	480	0,081
5.	8,35	1,74	1,44	1,28	480	0,088
6.	7,918	1,70	1,37	1,28	480	0,084
7.	8,195	1,73	1,40	1,28	470	0,084
8.	8,112	1,71	1,41	1,28	480	0,087
9.	8,334	1,71	1,44	1,28	480	0,088
10.	8,050	1,70	1,39	1,28	480	0,085
11.	8,096	1,72	1,40	1,28	490	0,088
12.	8,195	1,71	1,41	1,28	490	0,088
13.	8,101	1,73	1,40	1,28	490	0,088
14.	8,118	1,72	1,40	1,28	490	0,088
15.	8,68	1,72	1,41	1,28	490	0,088

(5) – теплоємність зразків, знаходилася за формулою:

$$c = \frac{c_{cm} \cdot m_{cm} + c_{cv} \cdot m_{cv} + c_e \cdot \Delta m}{m_{cm} + m_{cv} + \Delta m},$$

де $c_{cm} = 670$ Дж/(кг·К) теплоємність скляних мікросфер;

$c_{cv} = 1500$ Дж/(кг·К) теплоємність епоксидного зв'язуючого (ЕД-20);

m_{cm} – маса скляних мікросфер для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг ;

m_{cv} – маса зв'язуючого для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг;

Маса повітряних включень мала в порівнянні з масою інших компонентів, тому на результат розрахунку не впливає, и при розрахунках не враховувалась.

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

ДОДАТОК Ж

Результати кліматичних випробувань

ДОДАТОК Ж

Протокол випробувань визначення теплофізичних властивостей в пошкодженості зразків блока зі СДП при кліматичних навантаженнях

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 18$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$
Маса вантажу у воді $m_{ep} = 120,150$ г

Таблиця Ж1 – Розрахунок пошкодженості і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Номер циклу, N	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·°К)	Коеф.темпера-туропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7 (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. тепло-провідності λ Вт/(м·°К) $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджу-ваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_s \cdot V_{\Pi}} \cdot 100 \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	105,9	106,3	0,4	0,487	1357	1,295	0,086	1,962
	2		106,3	0,4	0,487	1357	1,338	0,089	1,962
	3		106,4	0,5	0,491	1375	1,333	0,09	2,453
	5		106,72	0,82	0,501	1433	1,332	0,096	4,022
	8		106,99	1	0,507	1464	1,332	0,099	4,905
	13		107,08	1,18	0,512	1495	1,381	0,106	5,788
	21		107,32	1,82	0,533	1598	1,408	0,115	8,93
	34		108,5	2,6	0,558	1714	1,429	0,137	12,75
	55		109,8	3,9	0,600	1885	1,44	0,16	19,13

Продовження таблиці Ж1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	105,8	106,2	0,4	0,488	1357	1,314	0,087	1,962
	2		106,2	0,4	0,488	1357	1,334	0,088	1,962
	3		106,3	0,5	0,491	1375	1,303	0,088	2,453
	5		106,46	0,66	0,497	1404	1,336	0,093	3,273
	8		106,64	0,84	0,502	1436	1,35	0,097	4,12
	13		106,77	0,97	0,507	1459	1,369	0,101	4,758
	21		107,32	1,52	0,525	1550	1,355	0,111	7,456
	34		<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>
	55		<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>	<u>**</u>
3	1	105,73	106,15	0,42	0,492	1361	1,253	0,084	2,06
	2		106,29	0,56	0,496	1386	1,299	0,089	2,747
	3		106,29	0,56	0,496	1386	1,302	0,09	2,747
	5		106,42	0,69	0,501	1410	1,337	0,094	3,385
	8		106,64	0,91	0,508	<u>*</u>	<u>*</u>	<u>*</u>	4,464
	13		106,64	0,91	0,508	<u>*</u>	<u>*</u>	<u>*</u>	4,464
	21		106,95	1,22	0,518	<u>*</u>	<u>*</u>	<u>*</u>	5,984
	34		107,60	1,87	0,492	<u>*</u>	<u>*</u>	<u>*</u>	9,173
	55		108,24	2,51	0,496	<u>*</u>	<u>*</u>	<u>*</u>	12,31
4	1	105,75	106,27	0,52	0,495	1379	1,252	0,086	2,551
	2		106,35	0,6	0,497	1394	1,25	0,087	2,943
	3		106,35	0,6	0,497	1394	1,283	0,089	2,943
	5		106,57	0,82	0,504	1433	1,379	0,1	4,022
	8		106,86	1,11	0,514	1483	1,282	0,1	5,445
	13		106,86	1,11	0,514	1483	1,283	0,1	5,445
	21		107,00	1,25	0,518	1506	1,316	0,103	6,131
	34		107,95	2,2	0,548	1506	1,371	0,113	10,79
	55		108,95	3,2	0,580	1796	1,39	0,14	15,69

Продовження таблиці Ж1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	1	106,19	106,38	0,19	0,486	1317	1,278	0,082	0,932
	2		106,48	0,29	0,489	1336	1,274	0,083	1,422
	3		106,48	0,29	0,489	1336	1,297	0,085	1,422
	5		106,60	0,29	0,489	1359	1,344	0,09	1,422
	8		106,87	0,68	0,502	1408	1,354	0,096	3,335
	13		106,87	0,68	0,502	1408	1,381	0,098	3,335
	21		107,23	1,04	0,514	1471	1,386	0,105	5,1
	34		108,00	1,81	0,539	1596	1,429	0,128	8,878
	55		109,1	2,91	0,574	1757	1,43	0,144	14,27

Примечание: * - после 8 циклов нагружения в образце №3 был поврежден термоэлектрический преобразователь, в дальнейшем на нем проводились измерения только водопоглощения. ** - после 21 цикла нагружения образец №2 был поврежден и в дальнейшем не использовался.

Дата проведення випробувань –
Умови проведення випробувань – лабораторні

Рівень тиску $P = 22$ МПа
Кількість зразків – 5

Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$

Маса вантажу у воді $m_{ep} = 120,150 \text{ г}$

Таблиця Ж2 – Розрахунок пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Номер циклу, N	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_e , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{ep} , Г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_e - m_{ep}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·К)	Коеф. теплопровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7, (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. теплопровідності λ Вт/(м·°К) $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджуваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_e \cdot V_{\Pi}} \times 100\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	1	105,9	106,3	0,4	0,493	1357	1,261	0,084	1,962
	2		106,56	0,66	0,501	1404	1,292	0,09	3,237
	3		106,56	0,66	0,501	1404	1,285	0,09	3,237
	5		106,7	0,8	0,506	1429	1,285	0,093	3,924
	8		107,05	1,15	0,517	1489	1,301	0,1	5,641
	13		107,4	1,5	0,528	1547	1,337	0,109	7,357
	21		108,25	2,35	0,556	1678	1,379	0,129	11,53
	34		109,55	3,65	0,597	1854	1,4	0,16	17,94
	55		111,4	5,5	0,657	2066	1,401	0,19	26,98
7	1	105,6	106,16	0,56	0,484	1386	1,275	0,086	2,747
	2		106,59	0,99	0,497	1462	1,255	0,091	4,856
	3		106,59	0,99	0,497	1462	1,259	0,091	4,856
	5		106,77	1,17	0,503	1493	1,251	0,094	5,739
	8		107,25	1,65	0,518	1571	1,285	0,105	8,039
	13		107,69	2,09	0,531	1639	1,24	0,108	10,25
	21		108,60	3	0,559	1769	1,343	0,133	14,72
	34		110,20	4,6	0,609	1968	1,416	0,170	22,56
	55		112,00	6,4	0,665	2156	1,361	0,195	31,39

Продовження таблиці Ж2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1	105,97	106,38	0,41	0,494	1359	1,173	0,079	2,01
	2		106,67	0,7	0,503	1411	1,203	0,085	3,434
	3		106,67	0,7	0,503	1411	1,206	0,086	3,434
	5		106,70	0,73	0,504	1417	1,213	0,087	3,581
	8		107,02	1,05	0,514	1473	1,231	0,093	5,15
	13		107,28	1,31	0,522	1516	1,242	0,098	6,425
	21		108,00	2,03	0,545	1630	1,264	0,112	9,96
	34		110,20	3,03	0,576	1773	1,326	0,135	14,86
	55		112,00	4,63	0,627	1971	1,324	0,164	22,71
9	1	105,9	106,68	0,78	0,506	1426	1,237	0,089	3,826
	2		106,95	1,05	0,515	1473	1,278	0,097	5,15
	3		106,95	1,05	0,515	1473	1,325	0,101	5,15
	5		107,36	1,46	0,528	1541	1,344	0,109	7,161
	8		107,82	1,92	0,543	1613	1,357	0,119	9,418
	13		108,57	2,67	0,568	1723	1,391	0,136	13,09
	21		109,69	3,79	0,604	1871	1,407	0,159	18,59
	34		111,52	5,62	0,663	2078	1,406	0,194	27,57
	55		110,53	7	0,708	2212	1,361	0,213	34,34
10	1	106	106,49	0,49	0,499	1374	1,186	0,081	2,403
	2		106,87	0,87	0,511	1441	1,203	0,089	4,267
	3		106,87	0,87	0,511	1441	1,208	0,089	4,267
	5		107,10	1,1	0,518	1481	1,235	0,095	5,396
	8		107,55	1,55	0,533	1551	1,237	0,102	7,603
	13		107,87	1,87	0,543	1606	1,27	0,111	9,172
	21		108,65	2,65	0,568	1721	1,292	0,126	12,99
	34		110,05	4,05	0,613	1903	1,351	0,158	19,87
	55		111,70	5,7	0,667	2087	1,392	0,194	27,96

Дата проведення випробувань – Рівень тиску $P = 26$ МПа
 Умови проведення випробувань – лабораторні Кількість зразків – 5
 Загальний обсяг повітряних включень, м^3 (задається при виготовленні блока) $V_{\Pi} = 20,38 \text{ м}^3$
 Маса вантажу у воді $m_{zp} = 120,150 \text{ г}$

Таблиця ЖЗ – Розрахунок пошкоджуваності і коефіцієнту теплопровідності зразків

№ зразка	Номер циклу, N	Маса зразка з термопарою і вантажем у воді до випробувань m_z , г	Маса зразка з вантажем у воді після впливу тиску m_{zp} , г	Кількість води, що проникла у зразок $\Delta m = m_z - m_{zp}$, г	Густина пошкодженого зразка $\rho = \frac{m_0 + \Delta m}{V_0}$, г/см^3	Теплоємність пошкодженого зразка, c Дж/(кг·К)	Коеф.темпера-туропровідності пошкодженого зразка $a \cdot 10^7 (\text{м}^2/\text{с})$	Коеф. тепло-провідності λ Вт/(м·°К) $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$	Пошкоджу-ваність зразка Π , % $\Pi = \frac{\Delta m_i}{\rho_e \cdot V_{\Pi}} \times 100\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	1	105,91	106,90	0,99	0,517	1462	1,231	0,093	4,86
	2		107,70	1,79	0,542	1593	1,257	0,109	8,78
	3		108,30	2,39	0,561	1683	1,244	0,117	11,72
	5		108,90	3,84	0,607	1878	1,22	0,139	18,84
	8		109,75	4,99	0,644	2011	1,215	0,157	24,48
	13		110,90	5,99	0,676	2116	1,176	0,168	29,38
	21		113,46	7,55	0,726	2260	1,302	0,214	37,03
12	1	105,63	106,48	0,85	0,513	1438	1,279	0,094	4,169
	2		106,98	1,35	0,529	1523	1,276	0,103	6,622
	3		107,38	1,75	0,542	1587	1,303	0,112	8,584
	5		108,73	3,1	0,585	1782	1,326	0,138	15,21
	8		109,68	4,05	0,615	1903	1,315	0,154	19,87
	13		110,92	5,29	0,655	2044	1,313	0,176	25,95
	21		112,66	7,03	0,711	2214	1,322	0,208	34,48

Продолження таблиці ЖЗ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	1	106,1	106,8	0,7	0,512	1411	1,219	0,088	3,433
	2		107,44	1,34	0,532	1521	1,283	0,104	6,573
	3		107,55	1,45	0,536	1539	1,295	0,107	7,112
	5		108,4	2,3	0,563	1670	1,35	0,127	11,28
	8		109,18	3,08	0,588	1780	1,351	0,141	15,11
	13		110,12	4,02	0,617	1900	1,347	0,158	19,82
	21		111,92	5,82	0,675	2099	1,351	0,191	28,55
14	1	106,25	106,92	0,67	0,512	1406	1,272	0,092	3,286
	2		107,60	1,35	0,534	1523	1,304	0,106	6,622
	3		108,00	1,75	0,547	1587	1,332	0,116	8,584
	5		109,60	3,35	0,599	1815	1,338	0,145	16,43
	8		110,96	4,71	0,643	1980	1,344	0,171	23,1
	13		112,06	5,81	0,678	2098	1,337	0,19	28,49
	21		113,68	7,43	0,731	2250	1,358	0,223	36,45
15	1	106,4	107,03	0,63	0,511	1399	1,235	0,089	3,09
	2		107,75	1,35	0,534	1523	1,251	0,103	6,622
	3		108,05	1,65	0,544	1571	1,302	0,113	8,094
	5		109,23	2,83	0,581	1746	1,338	0,137	13,88
	8		110,19	3,79	0,612	1871	1,344	0,156	18,59
	13		111,33	4,93	0,648	2005	1,325	0,174	24,18
	21		112,98	6,58	0,701	2173	1,344	0,207	32,28

(7) - теплоємність пошкоджених зразків, знаходилася за формулою:

$$c = \frac{c_{cm} \cdot m_{cm} + c_{cv} \cdot m_{cv} + c_v \cdot \Delta m}{m_{cm} + m_{cv} + \Delta m},$$

де $c_{cm} = 670$ Дж/(кг·°К) теплоємність скляних мікросфер;

$c_{cv} = 1500$ Дж/(кг·°К) теплоємність епоксидного зв'язуючого (ЕД-20);

$c_v = 4200$ Дж/(кг·°К) теплоємність води, що проникла у зразок;

m_{cm} – маса скляних мікросфер для виготовлення блока зі СДП

об'ємом 5 л, кг; m_{cv} – маса зв'язуючого для виготовлення блока зі СДП об'ємом 5 л, кг;

Δm – маса води, що проникла у зразок, кг.

Вимірювання виконав

Розрахунки виконав

Статистична обробка результатів кліматичних навантажень при дії тиску $P = 18$ МПа

Таблиця Ж 4 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\Pi)$, %	Дисперсія, $S^2(\Pi_i)$, $(\%)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	1,89	0,348	0,590	30,05
2	2,21	0,392	0,626	28,38
3	2,40	0,344	0,587	24,41
5	3,67	0,122	0,403	10,95
8	4,45	0,849	0,922	20,70
13	5,14	0,371	0,609	11,91
21	6,72	2,976	1,726	25,68
34	10,30	4,645	2,155	20,99
55	15,35	5,190	2,278	14,84

Таблиця Ж6 – Обробка результатів коеф. температуропровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(a)$, $\cdot 10^{-7}$, m^2/c	Дисперсія, $S^2(a)$, $\cdot (10^{-7})^2$, $(m^2/c)^2$	Середнє квадрат. відхилення $\sqrt{S^2(a)} \cdot 10^{-7}$, m^2/c	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	1,278	0,000721	0,0268	2,10
2	1,299	0,001443	0,0380	2,92
3	1,304	0,000334	0,0183	1,40
5	1,346	0,000367	0,0192	1,42
8	1,329	0,00109	0,0331	2,49
13	1,350	0,00224	0,0473	3,50
21	1,360	0,001647	0,0405	2,97
34	1,420	0,000531	0,0230	1,63
55	1,420	0,0007	0,0264	1,86

Таблиця Ж 5 – Результати статистичної обробки густини

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\rho)$, $г/см^3$	Дисперсія, $S^2(\rho)$, $(г/см^3)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, $г/см^3$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,490	0,0000145	0,0038	0,77
2	0,492	0,0000228	0,0048	0,97
3	0,493	0,0000123	0,0035	0,71
5	0,499	0,0000342	0,0059	1,17
8	0,506	0,000025	0,0050	0,99
13	0,508	0,0000296	0,0054	1,07
21	0,522	0,0000565	0,0075	1,44
34	0,542	0,00140	0,0374	6,9
55	0,570	0,00162	0,04028	7,16

Таблиця Ж7 – Обробка результатів коеф. теплопровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\lambda)$, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Дисперсія, $S^2(\lambda)$, $(Вт/м \cdot ^\circ C)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,085	$4 \cdot 10^{-6}$	0,0020	2,35
2	0,087	$6,25 \cdot 10^{-6}$	0,0025	2,87
3	0,088	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,0021	2,39
5	0,095	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,00374	3,95
8	0,097	$4,7 \cdot 10^{-6}$	0,00216	2,20
13	0,101	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,00342	3,37
21	0,108	$3,07 \cdot 10^{-5}$	0,00554	5,10
34	0,135	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,00625	4,62
55	0,147	0,000114	0,01065	7,19

Статистична обробка результатів кліматичних навантажень при дії тиску $P = 22$ МПа

Таблиця Ж8 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\Pi)$, %	Диспер-сія, $S^2(\Pi_i)$, (%) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	2,59	0,570	0,755	29,17
2	4,19	0,711	0,843	20,13
3	4,19	0,711	0,843	20,13
5	5,16	2,090	1,445	28,01
8	7,18	3,058	1,748	24,39
13	9,26	6,82	2,612	28,22
21	13,56	10,931	3,306	24,38
34	20,55	23,243	4,821	23,45
55	28,68	19,607	4,428	15,44

Таблиця Ж 10 – обробка результатів коеф.температуропровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(a)$, $\cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	Дисперсія, $S^2(a) \cdot (10^7)^2$ ($\text{м}^2/\text{с}$) ²	Середнє квадрат.відхи-лення $\sqrt{S^2(a)}$ $10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	1,226	0,00162	0,0403	3,28
2	1,246	0,00127	0,0356	2,86
3	1,257	0,04475	0,04476	3,56
5	1,265	0,00238	0,04884	3,85
8	1,282	0,00215	0,04637	3,62
13	1,316	0,00433	0,0657	5,07
21	1,337	0,00300	0,0548	4,10
34	1,380	0,00153	0,0391	2,83
55	1,368	0,00093	0,0304	2,22

Таблиця Ж9 – Результати статистичної обробки густини

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\rho)$, $\text{г}/\text{см}^3$	Диспер-сія, $S^2(\rho)$, ($\text{г}/\text{см}^3$) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, $\text{г}/\text{см}^3$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,498	0,0000753	0,0086	1,75
2	0,509	0,0000700	0,0084	1,66
3	0,509	0,0000700	0,0084	1,66
5	0,515	0,000129	0,0113	2,22
8	0,528	0,000161	0,012	2,41
13	0,542	0,000348	0,0186	3,46
21	0,570	0,000524	0,0229	4,04
34	0,616	0,001055	0,0324	5,31
55	0,665	0,00084	0,0289	4,36

Таблиця Ж 11 – Обробка результатів коеф. теплопровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\lambda)$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Диспер-сія, $S^2(\lambda)$, ($\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$) ²	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,084	0,0000135	0,0036	4,38
2	0,091	0,0000183	0,0043	7,23
3	0,092	0,0000305	0,0055	6,04
5	0,096	0,0000658	0,0081	8,48
8	0,104	0,0000908	0,0095	9,17
13	0,115	0,000204	0,0143	12,69
21	0,133	0,000283	0,0168	12,76
34	0,160	0,000471	0,0217	13,28
55	0,192	0,000311	0,0176	9,21

Статистическая обработка результатов климатических испытаний при нагружении давлением $P = 26$ МПа

Таблица Ж 12 – Результати статистичної обробки пошкоджуваності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\Pi)$, %	Дисперсія, $S^2(\Pi_i)$, $(\%)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\Pi)}$, %	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\Pi)}}{M(\Pi)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	3,77	0,539	0,734	19,49
2	7,04	0,942	0,970	13,78
3	8,81	2,99	1,729	19,61
5	15,13	7,96	2,282	18,65
8	20,33	13,84	3,721	18,39
13		14,55	3,810	14,91
21	33,76	11,945	3,456	10,24

Таблица Ж 14 – Результати статистичної обробки коеф. температуропровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(a)$, $\cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	Дисперсія, $S^2(a)$, $(\cdot 10^{-7})^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(a)}$, $\cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(a)}}{M(a)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	1,247	0,000708	0,0266	2,13
2	1,274	0,00045	0,0212	1,67
3	1,295	0,00102	0,0319	2,46
5	1,314	0,00285	0,0534	4,06
8	1,314	0,00324	0,0569	4,33
13	1,300	0,00494	0,0702	5,41
21	1,316	0,001	0,0316	2,37

Таблица Ж 13 – Результати статистичної обробки густини

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\rho)$, $\text{г}/\text{см}^3$	Дисперсія, $S^2(\rho)$, $(\text{г}/\text{см}^3)^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\rho)}$, $\text{г}/\text{см}^3$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\rho)}}{M(\rho)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,514	$6,75 \cdot 10^{-6}$	0,00259	0,51
2	0,536	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,00522	0,97
3	0,546	$8,65 \cdot 10^{-5}$	0,00930	1,7
5	0,587	0,00029	0,0170	2,9
8	0,620	0,00055	0,0235	7,96
13	0,656	0,00062	0,0248	3,79
21	0,710	0,0005	0,02238	3,16

Таблица Ж 15 – Результати статистичної обробки коеф. теплопровідності

Номер циклу, N	Мат. очікуван-ня $M(\lambda)$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Дисперсія, $S^2(\lambda)$, $(\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}))^2$	Середнє квадратичне відхилення $\sqrt{S^2(\lambda)}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Коеф. варіації $\frac{\sqrt{S^2(\lambda)}}{M(\lambda)} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,091	$6,75 \cdot 10^{-6}$	0,00259	2,85
2	0,105	$6,50 \cdot 10^{-6}$	0,00255	2,43
3	0,113	$1,55 \cdot 10^{-5}$	0,00394	3,48
5	0,137	$4,23 \cdot 10^{-5}$	0,0065	4,73
8	0,156	0,000114	0,0106	6,85
13	0,173	0,00014	0,01172	6,76
21	0,205	0,00015	0,01239	5,94

ДОДАТОК И
«Акт метрологической проработки исследовательских испытаний
диссертационной работы»

СОГЛАСОВАНО

Главный метролог НУК
_____ В.В. Мацкевич
« _____ » _____ 200

УТВЕРЖДЕНО

Проректор по научной работе
Национального университета
кораблестроения д.т.н., проф.

_____ В.С. Блинцов
« _____ » _____ 200



АКТ

метрологической проработки исследовательских испытаний диссертационной работы

1. Тема диссертационной работы «Усовершенствование конструкции подводных обитаемых аппаратов теплоизолирующими блоками плавучести».
2. Краткая характеристика методов измерения:
 - 2.1 Масса образца: прямой метод сравнения с мерами на лабораторных весах.
 - 2.2 Размеры образцов: прямой дифференциальный метод измерения по делениям шкалы штангенциркуля.
 - 2.3 Давление воды в гидростатической камере прямой метод непосредственной оценки по показаниям манометра.
 - 2.4 Температура нагрева, охлаждения образцов: прямой метод непосредственной оценки по делениям шкалы потенциометра.
3. Характеристика способа обработки наблюдений: расчетом статистических оценок – математического ожидания, дисперсии.
4. Используемые средства измерений: в табл.1.

Таблица 1 – Используемые средства измерения в экспериментальных исследованиях диссертационной работы

Величина, что измеряется			Используемое средство измерений						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование единицы измерения	Диапазон значений	Допустимая погрешность	Наименование	Диапазон измерений	Нормированные метрологические характеристики	Условия измерений	Дата проведения эксперимента	Дата поверки *	Периодичность поверки
Масса образцов	100...150 г	0,01 г	Весы лабораторные ВЛО – 1 №781	0...1000 г	Класс точности 2	Лабораторные	11.07	10.07	1 раз/в год
			Гири Г2-210	1...1000 г	Класс точности 2	Лабораторные	11.07	10.07	1 раз/в год
Размеры образцов	100...10 мм	0,1 мм	Штангенциркуль ЩЦ-III-500-0,1 № 31334	0...500 мм	Абсолютная допустимая погрешность 0,1 мм	Лабораторные	11.07	05.07	1 раз/в год
Температура нагрева образцов	20...80°C	2°C	Преобразователь термоэлек. ТХК68 01/08 02/08 03/08	0... 300°C	Класс точности 0,5	Лабораторные	11.07	04.07	1 раз/в год

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			ГОСТ 7164-78 Потенциометр КСП-032 №4048643	02/ 8	Класс точности 0,5 Цена деления 10°С мл	Лабораторные	12.08	09.08	1 раз/в год
			Термометры лабораторные № 528 №553	0-50 °С 50-100 °С	Класс точности 1 Цена деления 0,5 °С	Лабораторные	11.07	04.07	1 раз/в год
Температура охлаждения образцов	-17...0°С		Термометр лабораторный ТЛ – 6; №528	-30+20°С	Класс точности 1 Цена деления 0,5 °С	Лабораторные	04.07	04.07	1 раз/в год
Давление воды в гидростати- ческой камере, МПа	0...40 МПа	1 МПа	Манометр ЭКМ – 2У №32191	0...40 МПа	Класс точности 2,5	Лабораторные	09.07	04.07	1 раз/в год

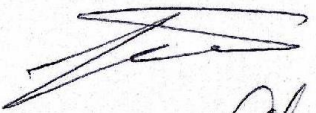
* –Дата последней поверки на момент проведения экспериментальных исследований в соответствии с графиком СИ НУК

Исполнитель

Научный руководитель

Ответственный за метрологический
контроль


Т.А.Юреско


Е.Т. Бурдун


С.В. Копийка

ДОДАТОК К

«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»

Министерство образования и науки Украины
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

Утверждаю
Проректор з НР
Д-р техн. наук, проф.
Блинцов В.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.

Начальник НДЧ
канд. техн. наук, доцент

Наук.руководитель НИР
канд.техн.наук, проф. НУК

Начальник БС и М

Рижков С.С.

Бурдун Е.Т.

Мацкевич В.В.

1 ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Объектом проектирования является подводный обитаемый аппарат (ПОА) в конструкции которого используются блоки плавучести с дополнительной функцией теплоизоляции прочного корпуса, длительно работающие на глубинах 1500...2000 м и в циклическом режиме погружение-всплытие аппарата на поверхность в условиях низких температур воздуха (ниже 0 °С).

2 ЦЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Целью проектирования является учет уменьшения подъемной силы и теплоизоляционных свойств блоков плавучести из сферопластика с дополнительной пористостью (СДП) при длительных работах аппарата на различных глубинах и при его циклическом погружении-всплытии на поверхность в условиях низких температур воздуха, что позволяет корректировать подъемную силу всего ПОА и прогнозировать температурный режим внутри ПОА.

3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

3.1 Объемная повреждаемость (далее: повреждаемость) P (%) – отношение объема пор, что разрушились за счет нагрузки теплоизолирующего блока плавучести гидростатическим давлением во времени, к общему объему воздуха в материале блока.

4 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1 При эксплуатации ПОА вода под воздействие гидростатического давления проникает в теплоизолирующие блоки плавучести. Происходит процесс накопления повреждений (повреждаемость), который сопровождается постепенным разрушением воздушных полостей, макро- и микропор материала в первую очередь, а затем, при больших уровнях давления, и микросфер. За счет повреждаемости блоки уменьшают свою первоначальную подъемную силу, что влияет на свойства балластной системы всего ПОА. Также повреждаемость снижает теплоизоляционные свойства блоков СДП, что ухудшает тепловую защиту прочного корпуса аппарата. Поэтому при проектировании ПОА необходимо учитывать эти изменения.

4.2 Разработанная методика может быть использована на начальных этапах проектирования ПОА, так и для оценки остаточного ресурса работы блоков, если известна история нагружения аппарата (по судовому журналу).

4.3 Методика не учитывает изменение центра тяжести и центра величины аппарата при эксплуатации, так как теплоизолирующие блоки размещаются симметрично относительно прочного корпуса и при повреждаемости не меняют свои первоначальные размеры и конфигурацию, а изменяют только силу плавучести.

5 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Начальные данные устанавливаются от заказчика в соответствии с техническими требованиями для подводного обитаемого аппарата.

К начальным данным относятся:

- Рабочее давление или глубина погружения аппарата P , МПа;
- Время длительности нахождения аппарата на глубине τ , час;
- Количество циклов N погружений-всплытий аппарата на поверхность в условиях отрицательных температур воздуха.

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕГО БЛОКА ПЛАВУЧЕСТИ ИЗ СДП

Толщина теплоизолирующего блока плавучести из СДП рассчитывается с учетом технических характеристик ПОА:

$m_{\text{тех. ср}}$ – масса аппарата с оборудованием на воздухе, кг;

$R, (D)$ – наружный радиус (диаметр) прочного корпуса, что теплоизолируется блоками, м.

6.1 Толщина теплоизолирующего блока плавучести рассчитывается из условия беспрепятственного погружения ПОА:

$$F_{\text{тех. ср}} > F_{\text{в}} + F_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{тех. ср}}$ – сила тяжести подводного аппарата, Н;

$F_{\text{в}}$ – сила плавучести (поддержания) конструкции аппарата, Н;

$F_{\text{пл}}$ – сила плавучести, что создают блоки из СДП и элементы плавучести, что крепятся на раму аппарата, Н.

Сила тяжести подводного аппарата рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{тех. ср}} = m_{\text{тех. ср}} \cdot g, \quad (2)$$

где $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ – ускорение свободного падения.

Сила плавучести (поддержания) конструкции аппарата:

$$F_{\text{в}} = V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot g, \quad (3)$$

где $V_{\text{ап}} = 4/3\pi R^3$ – объем прочного корпуса аппарата (сферической формы), м^3 ;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность морской воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Дополнительная сила плавучести (поддержания) состоит из силы плавучести, которые создают блоки из СДП толщиной δ в составе конструкции аппарата – $F_{\text{СДП}}$ и элементы плавучести, которые крепятся на раму – $F_{\text{б}}$ и определяется по формуле:

$$F_{\text{пл}} = F_{\text{СДП}} + F_{\text{б}}. \quad (4)$$

Сила плавучести, что создают элементы плавучести, что крепятся на раму аппарата, определяется из выражения:

$$F_{\text{б}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}) \cdot g \cdot M_{\text{б}} / \rho_{\text{б}}, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{б}}$ – плотность блоков;

$M_{\text{б}}$ – вес элементов плавучести, кг ;

Сила плавучести (поддержания), что создают блоки из СДП:

$$F_{\text{СДП}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{СДП}}) \cdot S_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot g, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{СДП}}$ – начальная плотность теплоизолирующих блоков из СДП, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$S_{\text{пов}} = 4\pi R^2$ – площадь поверхности прочного корпуса аппарата (сферической формы), м^2 ;

δ – толщина блока СДП, м .

Таким образом, необходимая толщина теплоизолирующего блока определяется по формуле:

$$\delta < \frac{m_{\text{тех.ср}} - V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} - (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}) \frac{M_{\text{б}}}{\rho_{\text{б}}}}{(\rho_{\text{в}} - \rho_0) \cdot S_{\text{пов}}}. \quad (7)$$

6.2 Определение времени охлаждения внутреннего пространства ПОА при обшивки прочного корпуса теплоизолирующими блоками из СДП толщиной δ .

Время охлаждения внутреннего пространства аппарата (рис.1) от начальной температуры $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до критической $T_{кр} = 10^\circ\text{C}$ (опасной для здоровья человека) при погружении на глубину с температурой воды $T_b = 0^\circ\text{C}$ определяется по формуле:

$$t = \frac{\ln \left[\frac{T(t) \cdot F}{1.66 \cdot K_R \cdot \sin(12.07 \cdot K_R - 12.07)} \right]}{-0.0517} \quad (8)$$

где

$$T_{кр}(t) = \frac{[1.66 \cdot K_R \cdot \sin(12.07 \cdot K_R - 12.07)] \cdot \exp^{-0.0517t}}{F},$$

$$F = \frac{5.74 \cdot 10^{-2} \sin(12.07 K_R - 12.07)^2 \lambda_0 - 8.36 \lambda_0 + 5.88 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(12.07 K_R - 12.07)^2 + 8.36 K_R \lambda_0}{\lambda}$$

$$K_R = \frac{R_1}{R};$$

R – наружный радиус прочного корпуса ПОА, м;

$R_1 = R + \delta$ – наружный радиус прочного корпуса ПОА с теплоизолирующим блоком толщиной δ , м;

λ_0 – начальный коэффициент теплопроводности блоков из СДП, Вт/(м·°K).

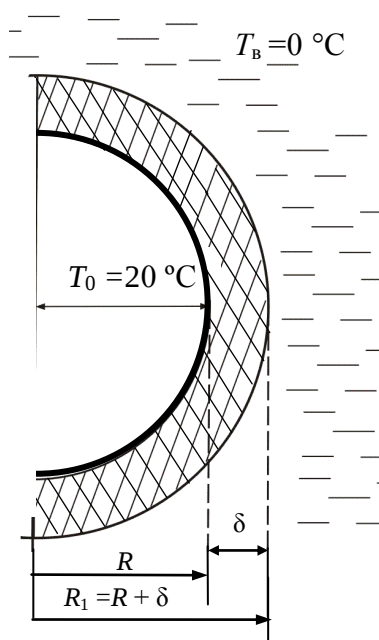


Рисунок 1 – Корпус ПОА теплоизолированный блоками из СДП толщиной δ

6.3 Расчет силы плавучести, что придают блоки из СДП прочному корпусу ПОА при установленной толщине δ рассчитывается по формуле (6).

7 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ, ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЛОКОВ ИЗ СДП

7.1 Средняя повреждаемости блоков из СДП в составе аппарата определяется по физической модели накопления повреждений:

$$\bar{\Pi}_D(\tau; P) = \Pi_{\Pi} - (\Pi_{\Pi} - \Pi_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \cdot \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{\delta^2} \tau \right], \quad (9)$$

где Π_{Π} – верхний уровень повреждаемости СДП, что рассчитывается по формуле:

$$\Pi_{\Pi}(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[a + bP + \frac{c-a}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]}, \quad (10)$$

Π_0 – нижний уровень повреждаемости СДП, что рассчитывается по формуле:

$$\Pi_0(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[c + bP_{кр} - \frac{c-a}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]}, \quad (11)$$

где a ; b , 1/МПа; c – эмпирические коэффициенты;

$P_{кр}$ – уровень критического давления для блоков из СДП, МПа;

μ_n – корни функции Бесселя;

n – количество корней членов ряда;

D – коэффициент массопереноса для блоков из СДП, м²/с.

7.2 Плотность блоков из СДП с учетом накопленной повреждаемости $\bar{\Pi}_D$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{\rho}(\tau; P) = \rho_{СДП} + \bar{\Pi}_D \cdot \rho_{\epsilon} \cdot \left[(1 - \nu) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{МК}}{\rho_{СТ}} \right) + \nu \right], \quad (12)$$

где ρ_{ϵ} – плотность воды, в районе погружения аппарата, кг/м³;

ν – коэффициент пористости, характеризующий относительный объем пор, который вводится в основу блока из СДП при его изготовлении;

χ – коэффициент заполнения объема микросферами;

$\rho_{\text{МК}}$ – плотность микросфер, которые используются для изготовления блоков СДП, кг/м³;

$\rho_{\text{ст}}$ – плотность стекла, из которого изготовлены микросферы, кг/м³.

Установлено, что объем повреждений в СДП, накопленный при климатических нагрузениях, больше в 2 раза чем при длительном нагружении ($\bar{P}_k(N; P) > \bar{P}_d(\tau; P)$) при равных уровнях давлением P (одинаковых глубин погружения) и длительности τ .

Следовательно, плотность СДП с учетом накопленной повреждаемости за N циклов климатического воздействия определяется по формуле:

$$\bar{\rho}(N; P) = \rho_{\text{СДП}} + 2 \cdot \bar{P}_d \cdot \rho_{\text{с}} \cdot \left[(1 - \nu) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{МК}}}{\rho_{\text{ст}}} \right) + \nu \right]. \quad (13)$$

7.3 Сила плавучести, которую создают блоки из СДП в конструкции прочного корпуса определяется по формуле (6). Плотность блоков с учетом накопленных повреждений по (12) составляет $\bar{\rho}$. Следовательно, изменение силы плавучести прочного корпуса рассчитывается по формуле:

$$\bar{F}_{\text{СДП}} = (\rho_{\text{в}} - \bar{\rho}) \cdot S_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot g. \quad (14)$$

Тогда, потеря сил плавучести составляет:

$$\Delta F = F_{\text{СДП}} - \bar{F}_{\text{СДП}}. \quad (15)$$

7.4 Коэффициент теплопроводности блоков из СДП с учетом накопленной повреждаемости $\bar{P}_d$ рассчитывается по формуле:

$$\lambda(\tau; P) = \lambda_0 + 0,338 \cdot \bar{P}_d - 0,04 \cdot \bar{P}_d^2, \quad (16)$$

где λ_0 – начальный коэффициент теплопроводности блоков из СДП, Вт/(м·°К).

При климатическом воздействии коэффициент теплопроводности блоков из СДП определяется по формуле:

$$\lambda_k(N; P) = 0,075 + 2 \cdot 0,471 \cdot \bar{P}_d - 0,278 \cdot (2 \bar{P}_d)^2. \quad (17)$$

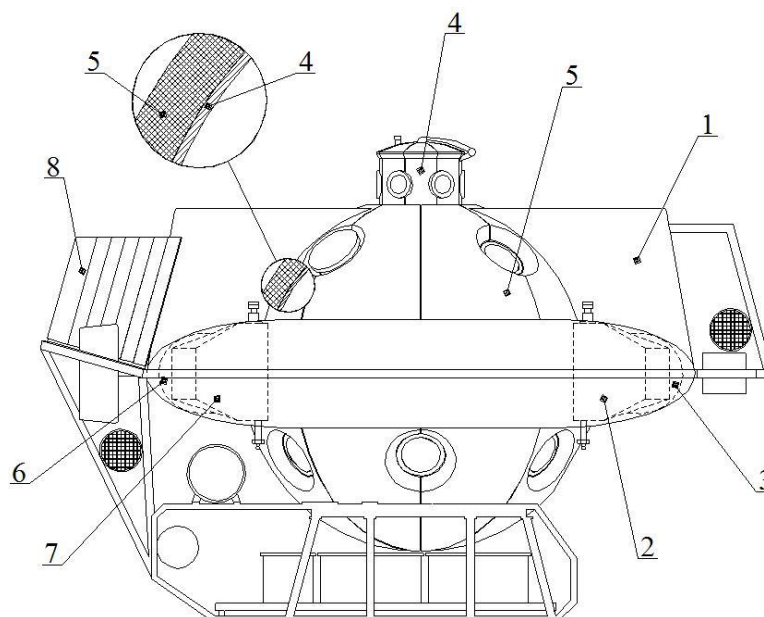
8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЛЛАСТНОЙ И УРАВНИТЕЛЬНО-ЗАМЕСТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМ ПОА

Проектирование балластной и уравнительно-заместительной системы ПОА проводится по правилам кораблестроения с учетом изменения свойств системы плавучести в результате эксплуатации.

Если подъемная сила теплоизолирующих блоков плавучести изменяется в рамках технического задания, балластная, креновая и дифференциальная системы ПОА корректируются в соответствии с изменением свойств системы плавучести. Если подъемная сила меньше, чем указанная в рамках технического задания, принимается решение о частичной или полной замены блоков плавучести.

ПРИМЕР ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ И СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЛОКОВ ИЗ СДП В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: подводный обитаемый подводный аппарат с сферическим прочным корпусом $D=2,5$ м. Общая схема аппарата представлена на рис.1.



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 – гидродинамический обтекатель; | 2 – носовая балластная цистерна; |
| 3 – носовая уравнивающая цистерна; | 4 – прочный корпус; |
| 5 – теплоизолирующие блоки СДП; | 6 – кормовая уравнивающая система; |
| 7 – кормовая балластная цистерна; | 8 – блоки сферопластика |

Рисунок 1 – Подводный обитаемый аппарат

1. НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

- Рабочее давление P , МПа (глубина погружения аппарата L , м):
15 МПа (1500м), 16 МПа (1600м), 17 МПа (1700м), 18 МПа (1800м), 19 МПа (1900м), 20 МПа (2000м);
- Время эксплуатации аппарата на глубине $\tau = 1000$ часов;
- Количество циклов погружений-всплытий аппарата в условиях отрицательных температур воздуха $N = 1000$;
- Район эксплуатации аппарата – Черное море.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОА

- Масса аппарата с оборудованием на воздухе $m_{\text{тех. ср}} = 10\,000$ кг;
- Наружный диаметр корпуса аппарата, что теплоизолируется блоками $D = 2,5$ м ($R = 1,25$ м).

3. ТОЛЩИНА ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕГО БЛОКА И РАСЧЕТ СИЛЫ ПЛАВУЧЕСТИ

3.1 В ПОА в качестве основных элементов плавучести используется легкий заполнитель массой 558 кг с плотностью 500 кг/м^3 . Предложено уменьшить массу легкого заполнителя на 30% (до 400 кг) за счет использования дополнительных теплоизоляционных блоков из СДП. Следовательно, необходимая толщина теплоизолирующего блока плавучести из СДП с учетом беспрепятственного погружения ПОА рассчитывается по формуле (7):

$$\delta < \frac{m_{\text{тех. ср}} - V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} - (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}) \frac{M_{\text{б}}}{\rho_{\text{б}}}}{(\rho_{\text{в}} - \rho_0) \cdot S_{\text{пов}}},$$

где $\rho_{\text{б}} = 500 \text{ кг/м}^3$ – плотность основных элементов плавучести;
 $M_{\text{б}} = 400 \text{ кг}$ – масса основных элементов плавучести;
 $\rho_{\text{СДП}} = 450 \text{ кг/м}^3$ – плотность теплоизолирующего блока из СДП;
 $\rho_{\text{в}} = 1025 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды в Черном море;
 Объем прочного корпуса аппарата (сферическая форма):

$$V_{\text{ап}} = 4/3\pi R^3$$

$$V_{\text{ап}} = 4/3\pi \cdot 1,25^3$$

$$V_{\text{ап}} = 8,17 \text{ м}^3$$

Площадь поверхности прочного корпуса аппарата:

$$S_{\text{пов}} = 4\pi R^2$$

$$S_{\text{пов}} = 4\pi \cdot 1,25^2$$

$$S_{\text{пов}} = 19,63 \text{ м}^2$$

Таким образом, в результате расчетов толщина блока СДП для изоляции прочного корпуса не должна превышать $\delta < 0,2$ м.

3.2 Определение времени охлаждения внутреннего пространства аппарата с начальной температуры $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до критической $T_{кр} = 10^\circ\text{C}$ при изоляции прочного корпуса боками из СДП различной толщины δ : 0,1 м; 0,12 м; 0,15 м; 0,18 м.

Результаты расчетов приведены в табл. 1

Таблица 1 – Время достижения критической температуры $T_{кр} = 10^\circ\text{C}$ внутри аппарата при различных толщинах δ теплоизолирующих блоков СДП

Толщина блока з СДП δ , м	0,1	0,12	0,15	0,18	0,2
Время, час	8	13	15	17	18

Принято толщину теплоизолирующих блоков плавучести из СДП $\delta=0,15$ м из условия сохранения температуры внутри прочного корпуса ПОА не ниже критической в течении 12–15 часов.

3.3 Определение силы плавучести, что придают блоки из СДП прочному корпусу ПОА при толщине $\delta = 0,15$ м по (6):

$$F_{\text{СДП}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{СДП}}) \cdot S_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot g,$$

$$F_{\text{СДП}} = (1025 - 450) \cdot 19,63 \cdot 0,15 \cdot 9,8$$

$$F_{\text{СДП}} = 16,3 \text{ кН.}$$

Блоки СДП в составе прочного корпуса ПОА создают силу плавучести в 16,3 кН.

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ БЛОКОВ

Средняя повреждаемость блоков из СДП с толщиной $\delta = 0,15$ м в составе аппарата при нагружении гидростатическим давлением $P = 15, 16, 17, 18, 19, 20$ МПа за время $\tau = 1000$ часов, определяется по физической модели накопления повреждений по формуле (9):

$$\bar{P}_d(\tau; P) = P_{\Pi} - (P_{\Pi} - P_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\mu_n} \right)^2 \cdot \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{\delta^2} \tau \right],$$

где P_{Π} – верхний уровень повреждаемости СДП, что рассчитывается по формуле (10):

$$\Pi_{\Pi}(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[a + bP + \frac{c-a}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]},$$

Π_0 – нижний уровень повреждаемости СДП, что рассчитывается по формуле (11):

$$\Pi_0(P) = \frac{1}{1 + \exp \left[c + bP_{кр} - \frac{c-a}{2P_{кр}} \cdot \sqrt{(P - P_{кр})^2} \right]},$$

где $a = 5,675$; $b = -0,196$ 1/МПа; $c = 8,362$ – эмпирические коэффициенты для блоков СДП плотностью $\rho = 450\text{--}500$ кг/м³;

$P_{кр} = 26$ МПа – уровень критического давления для блоков СДП;

μ_n – корни функции Бесселя ($\mu_1 = 2,405$; $\mu_2 = 5,52$ $\mu_3 = 8,654$; $\mu_4 = 11,792$);

$D = 2,27 \cdot 10^{-3}$ м²/с – коэффициент массопереноса для блоков из СДП плотностью

$\rho = 450\text{--}500$ кг/м³.

Результаты расчетов повреждаемости для всех уровней давления представлены в табл.2.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ БЛОКОВ И РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ПЛАВУЧЕСТИ (ПОДДЕРЖАНИЯ)

5.1 Определение плотности блоков из СДП с учетом накопленной повреждаемости $\bar{\Pi}_d$ осуществляется по формуле (12):

$$\bar{\rho}(\tau; P) = \rho_{\text{СДП}} + \bar{\Pi}_d \cdot \rho_{\epsilon} \cdot \left[(1 - \nu) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{МК}}}{\rho_{\text{СТ}}} \right) + \nu \right],$$

где $\rho_{\epsilon} = 1025$ кг/м³ – плотность воды в Черном море;

$\nu = 0,3$ – коэффициент пористости, который вводится в основу СДП при его изготовлении;

$\chi = 0,603$ – коэффициент заполнения объема микросферами;

$\rho_{\text{МК}} = 284$ кг/м³ – плотность микросфер марки МСО–119;

$\rho_{\text{СТ}} = 2500$ кг/м³ – плотность стекла, из которого изготовлены микросферы.

Результаты расчетов изменения плотности СДП представлены в табл.2.

Плотность СДП с учетом накопленной повреждаемости за N циклов климатического воздействия определяется по формуле (13):

$$\bar{\rho}(N;P) = \rho_{\text{СДП}} + 2 \cdot \bar{\Pi}_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \left[(1-\nu) \cdot \chi \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{МК}}}{\rho_{\text{ст}}}\right) + \nu \right].$$

Результаты расчетов изменения плотности СДП представлены в табл.2.

5.2. Сила плавучести $\bar{F}_{\text{СДП}}$, что создают блоки из СДП с учетом накопленной повреждаемости $\bar{\Pi}_{\text{д}}$, определяется по формуле (14).

5.3 Изменение силы плавучести ΔF , определяется по формуле (15). Результаты расчетов изменения силы плавучести представлено в табл.2.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЛОКОВ ИЗ СДП

Определение коэффициента теплопроводности блоков СДП с учетом накопленной повреждаемости $\bar{\Pi}_{\text{д}}$ производится по формуле (16):

$$\lambda(\tau;P) = \lambda_0 + 0,338 \cdot \bar{\Pi}_{\text{д}} - 0,04 \cdot \bar{\Pi}_{\text{д}}^2,$$

где $\lambda_0 = 0,085$ Вт/(м·°К) – начальный коэффициент теплопроводности СДП.

При климатическом воздействии коэффициент теплопроводности блоков СДП определяется по формуле (17).

Результаты расчетов изменения коэффициента теплопроводности блоков из СДП представлено в табл.2.

Таблица 2 – Результаты прогнозирования изменения плавучих и теплоизоляционных свойств блоков из СДП толщиной $\delta = 0,15$ м

Рабочее давление P , МПа	Повреждаемость, Π^*	Плотность* ρ , кг/м ³	Потери силы плавучести блоков, ΔF , кН	Коэф. тепло- проводности*, 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

Примечание: * длительные нагружения / климатические нагружения

7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ПОА

Сила плавучести аппарата при его эксплуатации на глубинах 1500...2000 м в течение 1000 часов, а также при 1000 циклов погружений всплытий в районах низких температур, меняется в рамках технического задания, балластная и крена-дифференциальная системы ПОА корректируются в соответствии с изменением свойств системы плавучести.

ДОДАТОК Л

Стандарт підприємства «Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі сферопластика з додатковою закритою поруватістю. Склад і властивості»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

СТАНДАРТ ПІДПРИЄМСТВА



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

докт. техн. наук професор

[Signature] Квасницький В.Ф.

2008 р.

БЛОКИ ПЛАВУЧОСТІ ПІДВОДНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
НА ОСНОВІ СФЕРОПЛАСТИКА З ДОДАТКОВОЮ ЗАКРИТОЮ
ПОРУВАТИСТЮ.
СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ.

Передмова

1. Розроблено Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова
Міністерства освіти і науки України

Внесено
Лабораторією «Композиційних матеріалів і конструкцій»

2. Затверджено і введено в дію з 01.12.2008 р.

3. Стандарт підприємства відповідає ДСТУ 1.5 – 2003. «Державний стандарт України. Загальні умови до побудови, викладу, оформлення та змісту стандартів»

4. Вводиться вперше

3. Цей стандарт підприємства не може бути цілком або частково відтворений, тиражований і розповсюджений без дозволу Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Зміст

Назва.....	4
1. Область застосування.....	4
2. Нормативні посилання.....	4
3. Визначення	5
4. Позначення і скорочення	5
5. Вимоги до блоків плавучості	5

СТАНДАРТ ПІДПРИЄМСТВА

Блоки плавучості підводних технічних засобів на основі сферопластика з додатковою закритою поруватістю. Склад і властивості.

Buoyancy blocks of underwater technical means on the basis of Syntactic foam with additional closed porosity. Composition and properties.

Дійсний від 2009.01.01

1. Область застосування

Стандарт підприємства встановлює вимоги до складу і властивостей блоків плавучості з теплоізолюючими властивостями на основі сферопластика з додатковою поруватістю, який виробляється в лабораторії композиційних матеріалів Національного університету кораблебудування (НУК) для підводних технічних засобів освоєння глибин Світового океану та підводних комунікацій.

Вимоги дійсного стандарту є обов'язковими для блоків плавучості на основі сферопластика з додатковою поруватістю виробленого в НУК.

Стандарт придатний для цілей сертифікації.

2. Нормативні посилання

У цьому стандарті підприємства є посилання на такі стандарти і методики:

1. ДСТУ 1.5 – 2003. Державна система стандартизації України. Загальні вимоги до побудови, викладу, оформлення та змісту стандартів.

ГОСТ 14192 – 96. Маркировка грузов.

ДСТУ 2093 – 92 (ГОСТ 10587 – 93) Смоли: ЭД-20, ЭД-16, ЭД-14, ЭД-10, ЭД-8.

ТУ 5951-171-05786904-2003. Микросферы стеклянные. Технические условия. – Введ. 17.01.2003. – М: НПК «ТЕМП», 2003. – 10 с.

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

Програма–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.

3. Визначення

Щільність позірна – відношення маси структурно неоднорідного закритопоруватого зразка матеріалу до його об'єму, який визначається геометрією зовнішньої поверхні зразка.

Пошкоджуваність – відношення об'єму води, яка просочилась у зразок матеріалу внаслідок руйнування повітряних пор та скляних мікросфер при гідростатичному стисканні до загального об'єму повітря у зразку.

4. Позначення і скорочення

Назва «блоки плавучості з додатковою функцією теплоізоляції підводних технічних засобів на основі сферопластика з закритою поруватістю» у дійсному стандарті замінена на «теплоізолюючі блоки плавучості».

5. Вимоги до блоків теплоізоляційного матеріалу

5.1 Технічні вимоги

5.1.1 Теплоізолюючі блоки плавучості повинні виготовлятися відповідно до вимог дійсного стандарту підприємства і технічної документації, затвердженій у встановленому порядку.

5.1.2. Матеріали, застосовані для виготовлення блоків теплоізоляційного матеріалу, зазначені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Склад поруватого сферопластика

Найменування		Співвідношення компонентів, %	
		по масі	по об'єму
Основа матеріалу	Полімерний Сполучник ДСТУ 2093 – 92 (ГОСТ 10587 – 93)	25...27	70...75
	Скляні мікросфери ТУ 5951-171-05786904-2003	73...75	
Повітряні пори		—	25...30

5.1.3 Заготовки для теплоізолюючих блоків виготовляються у формі прямокутних плит розміром 700×700 мм або дисків діаметром 700 мм товщиною до 250...300 мм щільністю 480...500 кг/м³ з подальшою механічною обробкою до потрібних розмірів.

5.1.4 Теплоізолюючі блоки плавучості мають колір від білого до ясно-коричневого залежно від кольору полімерного сполучника.

5.1.5 Теплоізолюючі блоки плавучості повинні відповідати вимогам до фізико-механічних властивостей і норм, зазначених у таблицях 2, 3.

Таблиця 2 – Вимоги до фізико-механічних властивостей теплоізолюючих блоків плавучості

Характеристика	Розмірність	Норма
Густина позірна, початкова	кг/м ³	450 ... 500
Коеф. теплопровідності початковий	Вт/(м·°К)	0,078 ... 0,082
Після 1000 год витримки при гідростатичному тиску 15 МПа:		
Пошкоджуваність	%	3,2 ... 3,5
Коеф. теплопровідності	Вт/(м·°К)	0,095 ... 0,1
Допустимий рівень пошкоджуваності	%	До 10
Допустимий коеф. теплопровідності	Вт/(м·°К)	До 0,12

Таблиця 3 – Обмеження на тривалість, глибину занурення та кількість циклів занурення-спливання

Глибина занурення, м	Тривалість занурення	Кількість циклів занурення-спливання
<1500	не обмежено	не обмежено
1800	1,5 року	250
2000	20 000 годин	180

5.2 Пакування. Теплоізолюючі блоки плавучості пакуються у тверді контейнери або дерев'яну ґратчасту тару.

5.3 Маркірування. Маркірування наноситься на пакувальну тару відповідно до ГОСТ 14192-96 з нанесенням наступних позначень:

- назва підприємства виготовлювача;
- назва продукту;
- номер партії;
- маса брутто і нетто;
- дата виготовлення;
- номер дійсного стандарту і підприємства.

5.4 Вимоги безпеки

5.4.1 Теплоізолюючі блоки плавучості в готовому вигляді нешкідливі для людини, у процесі експлуатації при температурі до 200 °С не виділяють шкідливих речовин, тому не вимагають захисту при роботі з ними.

5.4.2 У процесі механічної обробки необхідно захищати дихальні шляхи респіратором.

5.4.3 Теплоізолюючі блоки плавучості вибухобезпечні. Кисневий індекс KI=70.

5.5 Правила приймання

5.5.1 Теплоізолюючі блоки плавучості пред'являються до здачі партіями. Партія – блоки, виготовлені з однієї заготовки, або заготовок відформованих в однакових умовах згідно технологічного процесу (при однаковій кількості

компонентів сферопластика та однакових технологічних режимах) виготовлення. У партії допускається відхилення позірної щільності до $\pm 2 \%$.

5.5.2 Паспорт на теплоізолюючі блоки плавучості кожної партії повинен містити дані про якість блоків теплоізоляційного матеріалу (позірну щільність, коефіцієнт теплопровідності, припустимий рівень пошкоджуваності при експлуатації) і відповідність їх вимогам дійсного стандарту підприємства.

5.5.3 Для перевірки властивостей теплоізолюючих блоків плавучості використовуються зразки-свідки з кожної партії 6-8 штук.

5.5.4 При незадовільних результатах випробувань роблять повторне випробування (див.п.5.5.2), при цьому кількість зразків подвоюється. Результати повторних випробувань вважаються остаточними і поширюються на всю партію.

5.6 Методи випробувань.

Визначення густини, температуропроводності, пошкоджуваності сферопластика з додатковою поруватістю при дії тривалого гідростатичного тиску або циклічного навантаження гідростатичним тиском з послідовним заморожуванням-розморожування проводяться згідно з методиками: УКФА.360107.002 М. і УКФА.360107.003М. При цьому значення коефіцієнту теплопровідності визначається за формулою:

$$\lambda = a \cdot \rho \frac{m_0 (c_c \cdot \eta + c_m (1 - \eta)) + c_v \cdot \Delta m_v}{m_0 + \Delta m_v}$$

де a – експериментальне значення температуропроводності при випробуваннях, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – експериментальне значення густини при випробуваннях, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$c_c=670 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_m=1500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_v=4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – теплоємність скла, полімерного сполучника та води відповідно;

m_0 – початкова маса зразка при випробуваннях;

Δm_v – маса води поглинутої зразком при випробуваннях;

η – масова частка скляних мікросфер в складі сферопластика.

5.7 Транспортування та зберігання

5.7.1 Транспортування. Теплоізолюючі блоки плавучості транспортують у критих транспортних засобах усіма видами транспорту з дотриманням правил перевезення вантажів, що діють на даному виді транспорту.

5.7.2 При навантаженні і розвантаженні блоків не допускається їх скидати і кантувати.

5.7.3 Зберігання. Теплоізолюючі блоки плавучості в закритих приміщеннях з відносною вологістю не більше 70%, при температурі $-20...+40^\circ \text{C}$.

5.8 Вказівки до застосування.

5.8.1 Теплоізолюючі блоки плавучості працездатні в прісній і морській воді, а також у будь-яких нафтопродуктах без обмежень за кліматичним умовами.

5.9 Гарантії виробника

5.9.1 Виробник гарантує відповідність теплоізолюючих блоків плавучості вимогам дійсного стандарту підприємства при дотриманні споживачем правил транспортування і збереження.

ЛИСТОК ЗАТВЕРДЖЕННЯ

Начальник НДЧ
канд. техн. наук



В.Л Тимченко

Науковий керівник теми
канд.тех.наук,
професор НУК



Є.Т. Бурдун

Керівник БС і М



В.В. Мацкевич

Керівник служби
охорони праці



Л.В. Константинова

ДОДАТОК М

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ПАТ «Чорноморський
суднобудівний завод»


О.В. Остапенко
« 18 » 2016р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів кандидатської дисертації
Юреско Тетяни Анатоліївни**

**«Удосконалення конструкції підводних населених апаратів тепло
ізолюючими блоками плавучості»**

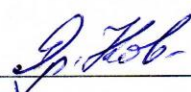
Комісія в складі:

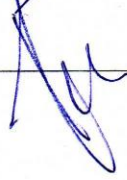
Голова - Коваленко Ярослав Валерійович, менеджер пр.58250
члени комісії - Родина Тетяна Володимирівна, головний технолог.

склала цей акт про те, що передані розрахункові методики по визначенню ресурсу роботи блоків плавучості на основі сферопластику з додатковою поруватістю та результати експериментальних досліджень по накопиченню пошкоджень у блоках при експлуатаційних навантаженнях, що складають кандидатську дисертацію Юреско Т.А., впроваджуються на ПАТ «ЧСЗ» при виконанні робіт з Державної цільової оборонної програми будівництва кораблів класу «корвет» за проектом 58250.

Розроблені нові методи розрахунку рівня пошкоджуваності блоків плавучості з сферопластику в залежності від тривалості та глибини занурення підводних апаратів та з урахуванням впливу кліматичних факторів, дозволяють визначити ресурс роботи блоків на стадії проектування підводного апарату. Це значно спрощує витрати на виконання конструкторських і дослідно-довідних робіт, у результаті чого одержується економічний ефект.

Даний акт не може бути підставою для отримання будь-яких коштів з фонду підприємства.

Голова комісії:  Я.В. Коваленко

член комісії  Т.В. Родина

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
ректор НУК
докт. техн. наук, професор
Рижков С.С.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Юреско Т.А. «Удосконалення конструкції підводних населених апаратів теплоізолюючими блоками плавучості»

Результати дисертаційної роботи Юреско Т.А. використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін на технологічному факультеті навчально-наукового інституту комп'ютерних та інженерно технологічних наук, студентам напряму 6.051101 "Авіа- і ракетобудування":

1. «Функціональні композиційні матеріали» при викладанні теми «Теплоізоляційні КМ»;
2. «Термодинаміка та теплообмін» при викладанні тем «Теплоізоляційні композиційні матеріали» та при проведенні лабораторних робіт за темою «Визначення теплофізичних властивостей композиційних матеріалів у воді»;
3. «Оптимізація складу та структури композиційних матеріалів» при викладанні теми «Композиційні матеріали з дисперсними наповнювачами, розрахунок оптимального складу матеріалу»;
4. «Експериментальні методи досліджень та прогнозування надійності» при викладанні тем «Напружено – часові аналогії», «Прогнозування надійності»;
5. «Проектування та конструювання виробів з КМ» при викладанні теми «Нормативна та конструкторська документація»;
6. «Проектування та виробництво тришарових конструкцій» при викладанні теми «Заповнювачі тришарових конструкцій», а також при виконанні лабораторних, курсових та дипломних робіт.

Директор навчально-наукового
інституту комп'ютерних та
інженерно-технологічних наук
д.т.н., професор

К.В.Кошкін

Заступник директора
навчально-наукового
інституту комп'ютерних та
інженерно-технологічних наук
к.т.н. доцент

Т.А.Фаріонова

ДОДАТОК Н

Список публікацій за темою дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати 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.

Дата проведення конференції 26.05.–30.05.2008. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 01.06.–05.06.2009. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 17.08.–21.08.2009. – форма участі доповідач.

12. Бурдун Е. Т., Юреско Т. А., Кочанов В. Ю. Метод прогнозирования

водопоглощення сферопластика на основі теорії масопереноса. *Композиционные материалы в промышленности*: матеріали 30 міжнарод. науч.-практ. конф. (Ялта, Крым, 7–11 июня 2010 г.). Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2010. С.425–426.

Дата проведення конференції 07.06–11.06.2010. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 22.10 – 24.10.2012. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 30.10 – 31.10.2012. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 27.05.– 31.05.2013. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 22.05.– 24.05.2013. форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 24.09 – 27.09.2015. – форма участі доповідач.

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.

Дата проведення конференції 12.10–14.10.2016. – форма участі доповідач.