

DOI 10.15589/jnn20180302
 УДК 629
 К68

THERMAL CONDUCTIVITY OF FOAM GLASS BUOYANCY BLOCKS WITH HIGH HEAT RESISTANCE

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ БЛОКІВ ПЛАВУЧОСТІ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕПЛОСТІЙКОСТІ НА БАЗІ ПІНОСКЛА

Viktoriya O. Korobeynikova
 somebody124@rambler.ru
 ORCID: —

Natalya S. Solomonyuk
 nata_solo@ukr.net
 ORCID: —

В. О. Коробейнікова,
 студентка

Н. С. Соломонюк,
 канд. техн. наук, асист.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Currently, areas of the ocean with elevated temperatures are being actively studied. Therefore, underwater technical equipment needs protection from overheating. Consequently, the analysis of the thermal conductivity for the foam glass buoyancy block is an important issue. It's proposed to use closed-cell foam glass with a density of 450...700 kg/m³ for buoyancy blocks with temperature protection. According to the research this foam glass can work at a depth of 2000 m for a long time. The thermal conductivity coefficient of foam glass buoyancy blocks, depending on the material properties and its operating conditions was considered and analyzed in the article. As a result of the calculations, it was concluded that the thermal conductivity of blocks depends on their density, interconnected porosity and the level of damage by the hydrostatic pressure. The article also provides recommendations regarding the buoyancy blocks operation. Further, it is planned to reinforce the calculations by experiment.

Keywords: buoyancy blocks; foam glass; heat conductivity; hydrostatical pressure of water; underwater equipment.

Анотація. Розглянуто і проаналізовано коефіцієнт теплопровідності блоків плавучості з піноскла залежно від властивостей матеріалу та умов його експлуатації. Установлено, що теплопровідність блоків залежить від густини блока, відкритої пористості й рівня його пошкоджуваності гідростатичним тиском води. Наведено рекомендації щодо експлуатації блоків плавучості. Планується подальше підкріплення розрахунків експериментом.

Ключові слова: блоки плавучості; піноскло; теплопровідність; гідростатичний тиск води; підводні технічні засоби.

Аннотация. Рассмотрено и проанализировано коэффициент теплопроводности блоков плавучести из пеностекла в зависимости от свойств материала и условий его эксплуатации. Установлено, что теплопроводность блоков зависит от плотности блока, открытой пористости и уровня его повреждаемости гидростатическим давлением воды. Приведены рекомендации касательно эксплуатации блоков плавучести. Планируется дальнейшее подкрепление расчетов экспериментом.

Ключевые слова: блоки плавучести; пеностекло; теплопроводность; гидростатическое давление воды; подводные технические средства.

REFERENCES

- [1] Bolshakova N. V., Borisanova K. S., Burtsev V. I. *Materialy dlya elektrotekhnicheskikh ustanovok* [Materials for electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 255 p.
- [2] Burdun Ye. T., Yuresko T. A., Kochanov V. Yu. *Modelirovaniye povrezhdayemosti i izmeneniya teploprovodnosti blokov plavuchesti na osnove sintaktika v usloviyakh ekspluatatsii* [Modeling of damability and changes in the thermal conductivity of buoyancy blocks based on syntactics under operating conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2008, no. 3 (420), pp. 46-51.
- [3] Burdun Ye. T., Radomyslskiy M. I. *Puti sovershenstvovaniya sferoplastikov* [Ways to improve spheroplastics]. *Kompozitsionnyye materialy v konstruktsiyakh glubokovodnykh tekhnicheskikh sred: tezis dokladov*

- mezhvuzovskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Composite materials in the construction of deep-water technical environments: Proc. of the Inter-university Scientific and Technical Conference]. Nikolaev, NUK Publ., 1989, pp. 8-10.
- [4] Butt L. M. Spravochnik po proizvodstvu teplozvukoizolyatsionnykh materialov [Guide on the production of thermal-insulating and sound-proofing materials]. Stroyizdat Publ., Moscow, 1995. 432 p.
- [5] Vasilev L. L., Tanaeva S. A. Teplofizicheskiye svoystva poristyykh materialov [Thermophysical properties of porous materials]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1971. 265 p.
- [6] Vukalovich M. P., Rivkin S. L., Aleksandrov A. A. Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para [Tables of thermophysical properties of water and steam]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1969. 689 p.
- [7] Gidrotermalnyye obrazovaniya v okeanakh [Hydrothermal formations in the oceans]. Available at: www.wiki.web.ru
- [8] Demidovich B. K. Proizvodstvo i primeneniye penostekla [Production and application of foam glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 230 p.
- [9] Kazimirenko Yu. A. Perspektivy primeneniya v sudostroyenii kompozitsionnogo materiala mnogootraslevogo naznacheniya – sintakticheskogo penostekla [Prospects for the application of a composite material for a diversified application in the shipbuilding syntactic foam glass]. Zbirnyk naukovykh prats UDMTU [Collection of Scientific Publications of USMTU], 2001, no. 2 (374), pp. 132-139.
- [10] Kitaygorodskiy I. I. Tekhnologiya stekla [Technology of glass]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 354 p.
- [11] Solomonyuk N. S. Povrezhdayemost blokov plavuchesti iz penostekla dlya podvodnykh apparatov [Damage to the foamed glass buoyancy blocks for underwater vehicles]. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2011, no. 4 (52), pp. 43-47.
- [12] Solomoniuk N. S. Udoshkonalennia konstruktsii pidvodnoho aparatu blokamy plavuchosti pidvyshchenoi teplostiikosti. Kand, Diss. [Improving the design of the underwater vehicle by buoyancy blocks with high heat resistance: Diss. Cand.]. Mykolaiv, 2012. 226 p.
- [13] Shill F. Penosteklo (proizvodstvo i primeneniye) [Foamglass (production and use)]. Moscow, Mir Publ, 1985. 307 p.
- [14] CRP. Subsea Buoyancy Products [Trelleborg offshore]. Available at : www.crpgroup.com.
- [15] Temperatura plavlennya skla [Glass melting point] [Trelleborg offshore]. 2019. Available at : www.thermalinfo.ru.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Блоки плавучості з піноскла (пористого матеріалу із закритопористою структурою) є перспективними для підводних технічних засобів освоєння океану. Їх теплостійкість сягає 400 °С, що вище за теплостійкість блоків плавучості із синтактичних піп на епоксидному сполучному. Блоки з піноскла розширюють можливості дослідження океанічного дна в зоні підвищених температур (зокрема, в районі «чорних курильників», де активно ведеться дослідження знайденого життя та можливих корисних копалин [6]). Також можливе їх використання як теплоізоляції для підводних продуктовозів, що перекачують рідину при високих температурах. Отже, необхідно знати їх коефіцієнт теплопровідності залежно від властивостей піноскла в блоці для оптимального проектування розмірів блоків для заданої глибини експлуатації підводного апарата. Ставиться задача розрахувати теплопровідність піноскла залежно від його властивостей та умов експлуатації блоків плавучості з нього.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зазвичай піноскло використовується як будівельний тепло- і звукоізоляційний матеріал. Шилл Ф. [13], Бутт Л. М. [12], Демідович Б. К. [8] пропонують застосування піноскла тільки як будівельного матеріалу. Останні патенти і публікації також пропонують удосконалення піноскла тільки як будівельного матеріалу. Отже, критерієм поліпшення властивостей матеріалу є збільшення його міцності при стисканні й вигині. Китайгородський І. І. представляє його як перспективний будівельний, теплоізоляційний і технічний матеріал та говорить про використання його як матеріалу плавучості для рятувальних пристосувань і понтонних мостів [10]. Детально досліджено теплові властивості піноскла низької густини в діапазоні 150...300 кг/м³. Густина блоків плавучості з піноскла складає 450...700 кг/м³. Досліджень теплопровідності при такій густині не знайдено. Існують й інші теплопровідні матеріали, такі, як сферопластик [2, 15] та синтактне піноскло [9], які можна розглядати як мате-

ріали плавучості. Однак сферопластик, маючи епоксидну матрицю, працює тільки до 100 °С [14], тоді як у районах тектонічних розломів температура сягає 400 °С, температура початку розм'якшення скла більше 600 °С (в'язкість скла — менше 1011 Па·с) [15], а у синтактного піноскла низька міцність та відносно велика відкрита пористість. Отже, для цього доцільно застосовувати блоки плавучості із закритопористого піноскла, яке і в будівництві використовується в діапазоні температур — 180...300 °С (а безлужне — до 600 °С) [4].

МЕТА СТАТТІ — дослідження коефіцієнта теплопровідності блоків плавучості з піноскла залежно від властивостей піноскла та умов експлуатації блоків.

Об'єктом дослідження є пошкодження блоків плавучості з піноскла для підводних апаратів. **Предмет дослідження** — залежність теплопровідності блоків плавучості від структури піноскла і його пошкоджуваності.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Дослідження властивостей піноскла [11, 12] показали, що найліпшим матеріалом для блоків плавучості є закритопористе піноскло густиною 450...700 кг/м³, властивості якого наведені в табл. 1.

Для розрахунку теплопровідності піноскла λ_1 використано методику Васильєва Л.Л. узагальненої провідності пористого матеріалу [1, 5].

За методикою коефіцієнт теплопровідності піноскла буде

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{тв}} \frac{K(1 - \Pi) + \Pi v_{\text{пор}}}{K(1 - \Pi) + \Pi}, \quad (1)$$

де Π — пористість піноскла; K — складений функціонал; $v_{\text{пор}}$ — відносна теплопровідність пор; $\lambda_{\text{тв}} = 0,74$ Вт/м·К — теплопровідність твердої фази матеріалу (скла).

У формулі (1) пористість матеріалу

$$\Pi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{тв}}},$$

де ρ — уявна густина піноскла; $\rho_{\text{тв}}$ — густина твердої фази в піносклі, тобто самого скла ($\rho_{\text{тв}} = 2500$ кг/м³ [10]). Пористість піноскла змінюється від 0,82 до 0,72.

Функціонал, що враховує променеву складову теплопровідності, розраховується наступним чином:

$$K = \frac{K_0^{1-1/n}}{(0,5 - K_0)^{1/n}} \frac{K_0^{1/n} + v_{\text{пор}} (1 - K_0^{1/n})}{(0,5 - K_0)^{-1/n} + v_{\text{пор}} (1 - K_0^{1/n})},$$

де K_0 — коефіцієнт зв'язності кістяка, який залежить від відношення товщини стінки пори до її внутрішнього діаметра в піносклі; n — допоміжний параметр, що розраховується за формулою

$$n = \frac{K_0^{1/n} - (0,5 - K_0)^{-1/n}}{3(1 - K_0^{1/n})^2};$$

відносна теплопровідність пор

$$v_{\text{пор}} = \frac{\lambda_{\text{г}} + \lambda_{\text{р}}}{\lambda_{\text{тв}}}, \quad (2)$$

де $\lambda_{\text{г}} = 0,03$ Вт/м·К — теплопровідність газової фази; $\lambda_{\text{р}} = 2,078 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К — радіаційна теплопровідність у порах.

Залежність теплопровідності сухого блока плавучості від густини матеріалу й температури експлуатації наведена на графіку (рис. 1).

Однак у процесі експлуатації блоки плавучості пошкоджуються гідростатичним тиском води. Для синтактичних пін, що використовуються як матеріал плавучості для підводної техніки, характерним є лавиноподібний процес руйнування мікросфер при досягненні критичного значення гідростатичного тиску води, що дозволяє ввести поняття границі гідростатичної міцності [3].

Механізм руйнування незахищеного піноскла відрізняється від механізму руйнування сферопластика. Для нього є характерним безперервний процес накопичення пошкоджень у пористій структурі, що не дозволяє знайти подібну границю міцності для нього при гідростатичному стисканні. Отже, введено поняття пошкоджуваності піноскла при певному рівні гідростатичного тиску. Пошкоджуваність ξ — це відношення об'єму зруйнованих пор до первинного об'єму пор у відсотках у результаті дії гідростатичного тиску на матеріал. Зруйновані пори заповнюються водою і теплопровідність піноскла змінюється.

Таблиця 1. Властивості піноскла для блоків плавучості

Номер зразка	Середня густина ρ , кг/м ³	Середній діаметр пори d , см	Технологічна відкрита пористість ζ_0 , %	Пористість піноскла	Короткочасне поверхневе водопоглинання при гідростатичному тиску w , кг/м ²	
					10 МПа	20 МПа
1	450	0,42	2,60	0,82	0,51...0,45	0,70...0,65
2	550	0,31	1,38	0,78	0,40...0,35	0,68...0,63
3	650	0,25	1,01	0,74	0,30...0,27	0,60...0,56

Для піноскла, пори якого повністю заповнені водою, можна розрахувати коефіцієнт теплопровідності, якщо у вищенаведеній методиці у формулі (2) замінити коефіцієнт теплопровідності газу λ_g на коефіцієнт теплопровідності води λ_w при відповідній температурі експлуатації підводного апарата. Згідно із [6] коефіцієнт теплопровідності води від 0 до 350 °C з точністю до $\pm 2\%$ складає

$$\lambda_w = -922,47 + 2839,5\theta - 1800,7\theta^2 + 525,77\theta^3 - 73,44\theta^4 + (p - p_s)(-0,9473 + 2,5186\theta - 2,0012\theta^2 + 0,51536\theta^3) + (p - p_s)^2(1,656 + 3,8929\theta + 2,9323\theta^2 - 0,7169\theta^3) \cdot 10^{-3}, \text{ мВт/м}\cdot\text{К}, \quad (3)$$

де $\theta = T/273,2$ — відносна температура води; T — абсолютна температура води, К; p_s — тиск води на лінії насичення, бар; p — робочий тиск, бар.

Розглянуто теплопровідність при максимальному допустимому тиску експлуатації піноскла

$p = 20 \text{ МПа} = 200 \text{ бар}$. Отже, коефіцієнт теплопровідності піноскла, повністю заповненого водою λ_2 , розраховується за формулою

$$\lambda_2 = \frac{\rho}{\rho_{\text{ТВ}}} \lambda_{\text{ТВ}} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ТВ}}}\right) \lambda_w$$

та відображено на рис. 2 залежно від густини й температури експлуатації.

Коефіцієнт теплопровідності води біля гідротермальної трубки «чорного курильника» не буде залежати від гідростатичного тиску води (лінія 5 на рис. 2), оскільки температура води в районі гідротермальної трубки знаходиться близько до лінії насичення. І рівняння (3) матиме вигляд

$$\lambda_w = -922,47 + 2839,5\theta - 1800,7\theta^2 + 525,77\theta^3 - 73,44\theta^4, \text{ мВт/м}\cdot\text{К}.$$

Згідно із дослідженнями, виконаними в [12], при експлуатації блоків плавучості з піноскла в прив'язаному ненаселеному підводному апараті

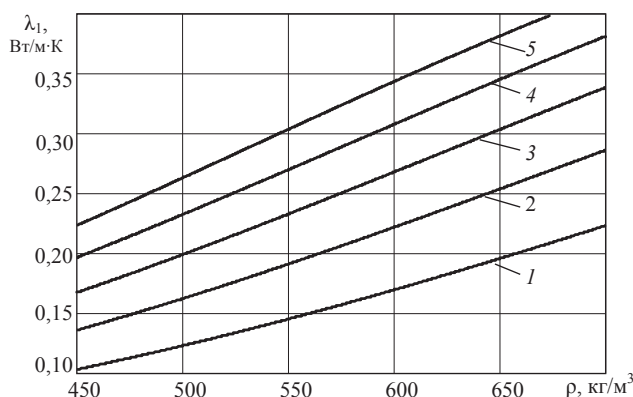


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності сухого блока плавучості від густини піноскла за різних температур експлуатації:

1 — $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 — $350\text{ }^{\circ}\text{C}$

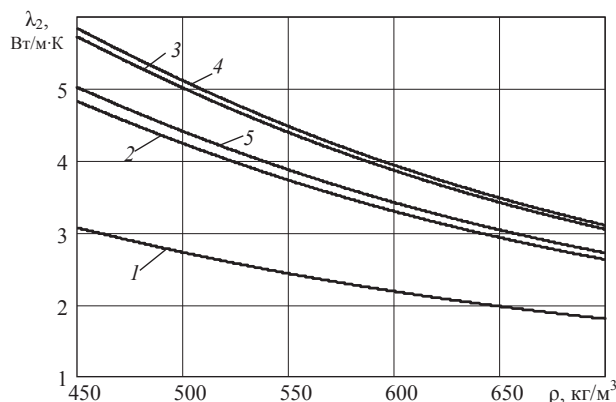


Рис. 2. Залежність коефіцієнта теплопровідності блока плавучості, заповненого водою, від густини піноскла за різних температур експлуатації підводного апарата ($p = 20 \text{ МПа}$):

1 — $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 — $350\text{ }^{\circ}\text{C}$

глибиною експлуатації до 2000 м допустима пошкоджуваність піноскла лежить у межах $\xi = 3 \dots 12\%$ від об'єму блока. Тому, враховуючи це, можна знайти за правилом сумішей передбачуваний коефіцієнт теплопровідності пошкодженого блока

$$\lambda = (1 - \xi)\lambda_1 + \xi\lambda_2,$$

де λ_2 — коефіцієнт теплопровідності блока плавучості, заповненого водою.

Результати розрахунку для граничних рівнів пошкодження блока подані на рис. 3.

З рисунка видно, що наявність води в порах значно збільшує не тільки питому вагу блока, а і його теплопровідність настільки, що при 12 % пошкоджуваності вона досягає теплопровідності скла ($\lambda_{\text{тв}} = 0,74 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$). Причому цей максимум приходить на температуру $T = 200^\circ\text{C}$. З подальшим підвищенням температури λ зменшується за рахунок зменшення теплопровідності води.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проаналізовано коефіцієнт теплопровідності блоків плавучості з піноскла залежно від властивостей матеріалу та умов його експлуатації. Числові дані наведені у висновках. Також зроблені висновки про залежність теплопровідності піноскла в блоці при пошкоджуваності блока 12 % за обсягом. Для наступного дослідження поставлено завдання підкріпити розрахунки експериментальними даними шляхом проведення експерименту з визначення температури- і теплопровідності піноскла при збільшеній температурі.

ВИСНОВКИ. 1. Розроблено математичну модель розрахунку коефіцієнта теплопровідності блока плавучості на основі піноскла залежно від густини матеріалу, температури його експлуатації та об'єму пошкоджуваності, яка, в свою чергу, залежить від глибини експлуатації підводного

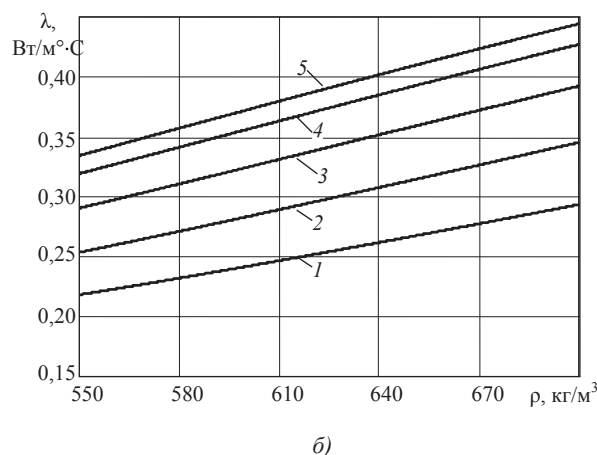
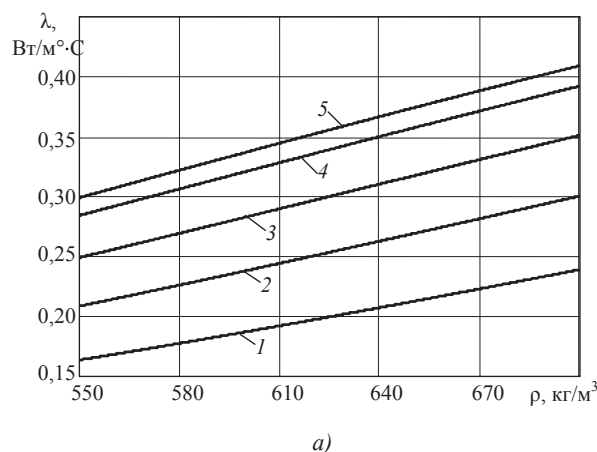


Рис. 3. Коефіцієнт теплопровідності блока плавучості з піноскла з урахуванням його об'ємної пошкоджуваності гідростатичним тиском води при пошкоджуваності 3 % (а) та 12 % (б): 1 — $T = 0^\circ\text{C}$; 2 — 100°C ; 3 — 200°C ; 4 — 300°C ; 5 — 350°C

апарата. 2. Розраховано початковий коефіцієнт теплопровідності блока плавучості з піноскла, який збільшується з 0,1 до 0,4 Вт/м·°C зі зміною температури в діапазоні 0...350 °C та густини піноскла — 450...700 кг/м³. 3. Визначено, що теплопровідність піноскла, пошкодженого до 12 % за об'ємом, підвищу-

ється до 0,45...0,72 Вт/м·°C, що сягає теплопровідності скла. 4. Коефіцієнт теплопровідності піноскла, пошкодженого гідростатичним тиском води, зменшується після підвищення температури вище 200 °C при рівні пошкоджуваності 12 % за об'ємом, що пов'язано з відповідною поведінкою коефіцієнта теплопровідності води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Большакова, Н. В.** Материалы для электротехнических установок [Текст] / Н. В. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 255 с.
- [2] **Бурдун, Е. Т.** Моделирование повреждаемости и изменения теплопроводности блоков плавучести на основе синтактика в условиях эксплуатации [Текст] / Е. Т. Бурдун, Т. А. Юреско, В. Ю. Кочанов // 36. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2008. – № 3 (420). – С. 46–51.
- [3] **Бурдун, Е. Т.** Пути совершенствования сферопластиков [Текст] / Е. Т. Бурдун, М. И. Радомысльский // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред : тезисы докладов межвуз. науч.-техн. конф. – Николаев : НКИ, 1989. – С. 8–10.
- [4] **Бутт, Л. М.** Справочник по производству теплозвукоизоляционных материалов [Текст] / Л. М. Бутт. – М. : Стройиздат, 1995. – 432 с.
- [5] **Васильев, Л. Л.** Теплофизические свойства пористых материалов [Текст] / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1971. – 265 с.
- [6] **Вукалович, М. П.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст] / М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – М. : Издательство стандартов, 1969. – 689 с.
- [7] Гидротермальные образования в океанах [Электронный ресурс]. // Геовикипедия. – 2012. – 2 с. – Режим доступа : www.wiki.web.ru.
- [8] **Демидович, Б. К.** Производство и применение пеностекла [Текст] / Б. К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1982. – 230 с.
- [9] **Казимиренко, Ю. А.** Перспективы применения в судостроении композиционного материала многоотраслевого назначения – синтактического пеностекла [Текст] / Ю. А. Казимиренко // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2001. – № 2 (374). – С. 132–139.
- [10] **Китайгородский, И. И.** Технология стекла [Текст] / И. И. Китайгородский. – М. : Химия, 1967. – 354 с.
- [11] **Соломонюк, Н. С.** Повреждаемость блоков плавучести из пеностекла для подводных аппаратов [Текст] / Н. С. Соломонюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4 (52). – С. 43–47.
- [12] **Соломонюк, Н. С.** Удосконалення конструкції підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості [Текст] : дис. канд. техн. наук: 05.08.03 / Соломонюк Наталя Сергіївна. – Миколаїв, 2012. – 226 с. – С. 216–226.
- [13] **Шилл, Ф.** Пеностекло (производство и применение) [Текст] / Ф. Шилл. – М. : Мир, 1985. – 307 с.
- [14] CRP. Subsea Buoyancy Products [Electronic resource] // Trelleborg offshore. – 2011. – 2 p. – Available at : www.crpgroup.com.
- [15] Температура плавления стекла [Electronic resource] // Trelleborg offshore. – 2019. – Available at : www.thermalinfo.ru.

© В. О. Коробейнікова, Н. С. Соломонюк

Надійшла до редколегії 07.09.2018

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
канд. техн. наук, проф. *Є. Т. Бурдун*