



**Yuliia O.
Kazymyrenko**
Казимиренко
Юлія
Олексіївна

УДК 629.56

DESIGNING INSULATION STRUCTURES FOR VESSELS TO TRANSPORT CARGOES WITH SPECIAL TEMPERATURE REQUIREMENTS

**ПРОЄКТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ СУДЕН
ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАНТАЖІВ ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМИ
ТЕМПЕРАТУРНИМИ УМОВАМИ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).06](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).06)

Yuliia O. Kazymyrenko Казимиренко Юлія Олексіївна,
докт. техн. наук, доц.
yuliia.kazymyrenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7120-8226



**Vira V.
Savochkina**
Савочкіна
Віра
Володимирівна

Vira V. Savochkina Савочкіна Віра Володимирівна,
викладач
vira.savochkina@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7700-4921

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. The relevance of the research is determined by the necessity to implement flexible cargo handling solutions for perishable and chilled food products, fertilizers, live plants and seedlings, medicines, biological materials, heated synthetic substances such as fats, bitumen, asphalt, and sulfur. Developing the capabilities of transporting these goods on inland waterways will require the modernization of existing small-tonnage vessels and shipping equipment. This study proposes, theoretically substantiates, and investigates an important scientific and technical problem of isolating chilled, frozen, and heated cargoes on ships, with the focus on creating stationary or removable modules equipped with thermal insulation to address this issue. The objective of the research is to enhance the operational efficiency of vessels designed for cargoes with specific temperature requirements through the design of insulation structures using composite materials. The research methodology is based on studying the properties, storage conditions, and transportation of cargoes, as well as the theoretical and technological prerequisites for the formation of insulation structures and the selection of materials for their production. Requirements for thermal and sound insulation materials are formulated, emphasizing their properties for reliable cargo preservation over extended periods. The characteristics of the structure, physical-mechanical properties, and operational features of modern fibrous materials, polymer composites with cellular structures, loose insulation, and various types of foam glass are analyzed. The need to introduce new composite materials and coatings in insulation technologies is established, driven by the reduction in weight and material intensity of thermal and sound insulation structures, maintaining specific temperature requirements. Technological recommendations for manufacturing structures are developed. As an example of implementation, the partial retrofitting of a tanker-product carrier for heated cargoes is considered. The obtained results serve as a scientific and technical basis for the retrofitting and modernization of existing vessel and shipping equipment designs, contributing to the expansion of the range of cargoes.

Key words: vessel modernization and retrofitting; perishable cargoes; heated cargoes; thermal insulation; composite materials; operational efficiency of vessels.

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження гнучких форм вантажообігу швидкопсувних та охолоджених продовольчих товарів, добрив, живих рослин та саджанців, ліків, біологічних матеріалів, розігрітих синтетичних речовин, таких як жири, бітум, асфальт, сірка. Розвиток можливостей їх транспортування на внутрішніх водних шляхах вимагатиме модернізації наявних малотоннажних суден та судноплавних засобів. Запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено важливу науково-технічну проблему ізолювання на судах охолоджених, заморожених і розігрітих вантажів, в основу вирішення якої покладено створення стаціонарних або знімних модулів, улаштованих тепловою ізоляцією. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності експлуатації суден, призначених для вантажів зі спеціальними температурними умовами, за рахунок проектування ізоляційних конструкцій з композиційних матеріалів. Методологія дослідження ґрунтується на вивченні властивостей, умов зберігання і транспортування вантажів, теоретичних і технологічних передумов формування ізоляційних конструкцій, виборі матеріалів для їх виготовлення. Сформульовано вимоги до тепло- і звукоізоляційних матеріалів, властивості яких забезпечують надійне збереження вантажів на максимально тривалий термін. Проаналізовано особливості структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей сучасних волокнистих матеріалів, полімерних композитів з комірчастою структурою, насипної ізоляції, різновидів піноскла. Доведена необхідність впровадження нових композиційних матеріалів і покриттів у ізоляційні технології, що зумовлено зменшенням масогабаритних показників та матеріалоємності тепло- і звукоізоляційних конструкцій, підтримкою певних температурних вимог. Розроблено технологічні рекомендації щодо виготовлення конструкцій. Як приклад реалізації розглянуто часткове переобладнання танкера-продуктовозу під розігріті вантажі. Одержані результати являють собою науково-технічне підґрунтя для переобладнання та модернізації наявних проєктів суден та судноплавних засобів, що сприятиме розширенню асортименту вантажів.

Ключові слова: модернізація і переобладнання суден; швидкопсувні вантажі; розігріті вантажі; теплова ізоляція; композиційні матеріали; ефективність експлуатації суден.

References

- [1] Bohomolova N.I. (2020). Orhanizatsiyno-ekonomichni umovy upravlinnya systemoyu dostavky shvydkopsuvnoyi produktsiyi [Organizational and economic conditions for managing the perishable goods delivery system]. Elektronne fakhove vydannya «Efektyvna ekonomika», No. 2. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.2.10> [in Ukrainian].
- [2] Ishchenko V.M., Braykovska N.S., Osmak V.Ye. (2017). Doslidzhennya zminy temperatury vantazhu pry transportuvanni v izotermichnomu vagoni z vykorystannyam matematychnoho modelyuvannya [Research temperature change of cargo during transportation in refrigerator car using mathematical modelling]. Visnyk Skhidnoukrayinskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalya, 3 (223), pp. 80–84. Retrieved from: <https://journals.snu.edu.ua/> [in Ukrainian].
- [3] Vorkut T., Volynets L., Bilonog O., Sopotsko O., & Levchenko I. (2019). The model to optimize deliveries of perishable food products in supply chains. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(3), 43–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.17790/.
- [4] Lomotko D.V. (Red.). (2022). Naukovo-tekhnichni doslidzhennya u haluzi transport [Scientific and technical research in the field of transport]: kolektyvna monohrafiya (Tom 2). Akademiya tekhnichnykh nauk Ukrainy. Retrieved from: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/transport2.pdf> [in Ukrainian].
- [5] Kazymyrenko Y., Drozd O., Yeholnikov O., & Morozova H. (2020). System and analytical of the development of transport and technological systems of railway ferries. Technology audit and production reserves, 2(2), 40–42. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200626 [in Ukrainian].
- [6] Savchenko L.V., & Gritsenko S.I. (2020). Analysis and Classification of Possible Schemes for Consolidated Delivery of LTL Cargo. Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy, 2(39), 139–144. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2\(39\).139-144](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2(39).139-144) [in Ukrainian].

- [7] Melnyk O.M. (2019). Vplyv navantazhennya nehabaritnoho ta velykovahovoho vantazhu na posadku ta ostiynist sudna [The impact of the load of oversized and heavy cargo on landing and stability of the vessel]. The scientific heritage journal, 42(1), pp. 42–47 [in Ukrainian].
- [8] Melnyk O.M. (2019). Pytannya zabezpechennya bezpeky protsesu morskoho perevezennya nehabaritnykh vantazhiv [Safety issues of oversized cargoes transportation by sea]. Komunalne hospodarstvo mist KHNUMH im. Beketova, 152(6), pp. 204–208. DOI: 10.33042/2522-1809-2019-6-152-204-208.
- [9] Shyryn L.N., Denyshchenko O.V., Bartashevskyy V.Ye., Korovyaka Ye.A., & Ratsv'yetaiev V.O. (2019). Transportuvannya nafty, naftoproduktiv i hazu [Transportation of oil, oil products and gas]: navchalnyy posibnyk. Dnipro: NTU «DP». Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/154565/CD1142.pdf> [in Ukrainian].
- [10] Kruhlyy D.H. (2021). Innovatsiyni tekhnolohiyi sudnobuduvannya yak zaporuka tsilisnoyi ekosystemy Ukrayiny [Innovative shipbuilding technologies as a guarantee of the integrity of the ecosystem of Ukraine]. Vcheni zapysky NTU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky, 32(71), ch. 2, pp. 107–112. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.1-2/18 [in Ukrainian].
- [11] Bergilevich O.M., & Kasyanchuk V.V. (2018). Teoretychne ta eksperymentalne obgruntuvannya otsinky mikrobiolohichnoho ryzyku Cronobacter spp. (Enterobacter sakazakii) [Theoretical and experimental justification of Cronobacter microbiological risk assessment]: monohrafiya. Sumy: Sumskyy derzhavnyy universytet [in Ukrainian].
- [12] Ovcharenko Yu.S. (2019). Istoriya kriofizyky v Ukrayini: monohrafiya [History of cryophysics in Ukraine]. Kharkiv: NAAN, NNSHB [in Ukrainian].
- [13] Shabanova H.M., Pushkarova K.K., Dvorkin L.Y., Gradoboyev O.V., Zaychenko M.M., Kahanovskyy O.S., ... Pluhin A.A. (2014). Enerhoosorozberezhuyuchi mineralni vyazhuchi rechovyny ta kompozytsiyni budivelni materialy na yikh osnovi [Energy-saving mineral binders and composite building materials based on them]. Kyiv: Zadruga [in Ukrainian].
- [14] Topilnytskyy P.I., Romachuk V.V., Yarmola T.V., & Zinchenko D.V. (2019). Fizyko-khimichni vlasty-vosti vazhkykh naft Yablunivskoho rodovyshcha z vysokym vmistom sirky [Investigation of oil properties from Ukraine Precarpathian oil and gas region]. Chemistry, Technology and Application of Substances, 2(2), pp. 102–109. DOI:10.23939/ctas2019.02.102 [in Ukrainian].
- [15] Romashko I.S., Drachuk U.R., & Bessarab I.M. (2017). Vykorystannya baranyachoho zhyru u vyrobnytstvi kosmetychnykh zasobiv [Use of sheep fat in the production of cosmetics]. Naukovyy visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoyi medytsyny, 19(75), pp. 140–143. DOI: 10.15421/nvlvet7528 [in Ukrainian].
- [16] Shutuk V.V., Bessarab O.S., Dushchak O.V., & Yemtsev V.I. (2022). Kholodilni tekhnolohiyi: navchalnyy posibnyk [Refrigeration technologies]. Kyiv NUHT: FOP Yamchynskyy O., 172 s. Retrieved from <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/38741> [in Ukrainian].
- [17] Shedrolosiev O.V. (2021). Shlyakhy vdoskonalennya enerhovykorystannya sudnovykh enerhetychnykh ustanovok dyzelnykh suden [Ways of improving the energy use of ship power plants of diesel ships]. Materialy 12-yi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohiyi ta obladnannya dlya yikh obsluhovuvannya», Kherson, s. 113 [in Ukrainian].
- [18] Horobets V.H. (2014). Spryazheny teploobmin vertikalnykh poverkhon z ploskoparalelnym neperervnym orebrennyam v umovakh pryrodnoyi konvektsiyi [Conjugated heat exchange of vertical surfaces with plane-parallel continuous fins under conditions of natural convection]. Tekhnika i enerhetyka, № 194, pp. 149–160 [in Ukrainian].
- [19] Tatsiy R.M., Pazen O.Yu., & Berezhans'kyy T.H. (2019). Modelyuvannya protsesu teploobminu v bahatosharoviy porozhnistiy sferychniy konstruktsiyi z urakhuvannyam vnutrishnikh dzherel tepla [Modeling of the heat transfer process in a multi-layer spherical construction taking into account of internal heat sources]. Pozhezhna bezpeka, № 35, pp. 84–89. DOI: 10.32447/20786662.35.2019.13 [in Ukrainian].
- [20] Korobeinikova V.O., & Solomon'yuk N.S. (2018). Teploprovidnist' blokiv plavuchosti pidvishchenoyi teplostiykosti na bazi pinoskla [Thermal conductivity of foam glass buoyancy blocks with high heat resistance]. Zbirnyk naukovykh prats' NUK, № 3–4, pp. 13–18. DOI: 10.15589/jnn20180302 [in Ukrainian].
- [21] Ratushnyak H.S., Biks Yu.S., & Lyamok A.O. (2022). Eksperymental'ni doslidzhennya teploprovidnosti teploizolyatsiynykh materialiv iz mineral'noyi vati [Experimental research of thermal conductivity of thermal

insulation materials made of mineral cotton]. Naukovo-tehnichnyy zhurnal «Suchasni tekhnologiyi, materiali i konstruktsiyi v budivnitstvi», 1, pp. 43–48. DOI: 10.31649/2311121429-2022-1-43-48 [in Ukrainian].

[22] Belyanovskaya E., Sukhyi K., Serhiienko Y., Sukhyi M., Pustovoy G., & Sukha I. (2022). Eksperimentnyi analiz adsorbtsiynoho teploakumulyuyuchoho modulya vidkrytoho typu na osnovi kompozytnoho adsorbentu «silikahel – krystalohidrat» [Storage unit based on composite adsorbent “silica gel – crystalline hydrate”]. Scientific Works, 86 (1), pp. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2403> [in Ukrainian].

[23] Kazymyrenko Yu.O. (2003). Sposib rekonstruktsiyi sudna [The method of ship reconstruction]. Patent Ukrainy 58071: Kyiv. Derzhavne patentne vidavnistvo Ukrainy.

[24] Kazymyrenko Yu.O. (2002). Sposib sektsiynoho vyhotovlennya korpusu sudna [The method of sectional production of the ship's hull]. Patent Ukrainy 52426A: Kyiv. Derzhavne patentne vidavnistvo Ukrainy.

Постановка задачі. Виробничий потенціал підприємств хімічної, харчової, фармацевтичної, парфумерно-косметичної, будівельної промисловості пов'язаний з безперервними надійними поставками сировинних матеріалів і вихідної продукції. Вибір логістичних шляхів, транспортних засобів, організація складського господарства у пунктах перевантаження вимагатиме якісного збереження швидкопсувних вантажів, таких як продукти харчування, садівництва, ліки, біологічні матеріали, добрива, для чого застосовуються спеціальні контейнери, холодильне обладнання, системи мікроклімату. Транспортування багатьох видів синтезованих продуктів, штучних жирів, сірки, бітуму, асфальту здійснюється у розігрітому стані, для чого на транспортних засобах встановлюється нагрівальне обладнання, потужність якого залежить від об'єму та маси вантажів. Розробка технічних заходів щодо дотримання строгих температурних умов, вологості, мікробіологічної стабільності складу цих вантажів є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Особливості систем управління доставкою швидкопсувної продукції розглянуто в роботі [1], де автор підкреслює важливість заходів з прискорення доставки та дотримання температурного режиму перевезень, що зумовлює формування цінової політики зі зростанням транспортних і страхових витрат. Складність обслуговування рефрижераторного рухомого складу в роботі [2, с. 80–84] розглянуто на прикладі ізотермічного вагона. Показано, що надійна експлуатація критичних

вагонів залежить від збереження теплового балансу теплотехнічної системи «навколишнє середовище – вантажне приміщення вагона – вантаж», що підтримується за допомогою улаштування огороження кузова вагона ефективною тепловою ізоляцією.

Управлінські заходи з постачань швидкопсувних продуктів [3, с. 43–50] розроблені на основі ланцюжкових схем впровадження змішаних транспортних технологій. Висунуті гіпотези та пропозиції підтверджуються результатами досліджень мультимодальних транспортних систем [4, с. 6–41, с. 143–179] з використанням укрупнених вантажних одиниць (вантажних пакетів, тара-обладнання, контейнерів, контрейлерів тощо), які за допомогою засобів механізації та іншого транспортного обладнання перевантажуються з одного виду транспорту на інший. У роботі [5, р. 40–42] розкриті можливості щодо уникнення додаткового перевантаження за рахунок координованої роботи залізниці і порту з ефективною експлуатацією паромних систем, ліхтеровозів, ролкерів. Проблемним питанням перевезення негабаритних вантажів водними видами транспорту присвячено роботи [6–10], де проаналізовано соціально-економічні ризики [6, р. 139–144], розв'язано задачі міцності з урахуванням погодних сценаріїв та залежно від маршрутів рейсів [7, с. 42–47; 8, с. 204–208]. Специфіку водних перевезень хімічних вантажів і нафтопродуктів розглянуто в роботі [9, с. 65–72], де також визначено конструктивні особливості суден. Автором статті [10, с. 107–112] підкреслено, що більшість суден і судноплавних засобів є

Таблиця 1. Теоретично-методологічні передумови постановки дослідження

Складові частини об'єкта дослідження	Теоретичне та методологічне підґрунтя
Дослідження властивостей вантажів	Основи теорії мікробіологічних ризиків харчових продуктів [11, с. 137–187] та кріофізики [12, с. 83–113], фізико-хімічні уявлення про процеси розм'якшення і твердіння мінеральних в'язучих матеріалів [13], реологічні властивості сірчановмісних нафтопродуктів [14, с. 75–82] і тваринних жирів [15, с. 140–143]
Технічне забезпечення підтримки температурних умов вантажів на судні	Методологічні основи охолодження, заморожування, отеплення і холодильного зберігання харчових продуктів [16] та науково-технічні напрацювання щодо енергетичного устаткування для розігрівання наливних вантажів на судні [17, с. 113–114]
Моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні судна	Моделі теплообміну у конструкціях різної геометричної форми в умовах природної конвекції [18, с. 149–160] та з урахуванням внутрішніх джерел тепла [19, с. 83–103]
Вибір матеріалів для формування ізоляційних конструкцій	Досвід впровадження сучасних ізоляційних матеріалів у суднобудівні технології [20, с. 13–18; 21, с. 43–48; 22, с. 51–56]
Переобладнання та модернізація суден	Авторські науково-практичні напрацювання [23; 24]

морально застарілими та потребують оновлення, їх модернізація і переобладнання можливе в результаті впровадження інноваційних суднобудівних технологій.

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У роботах [1–10] повною мірою розкрито складність процесів збереження вантажів, які потребують під час транспортування спеціальних температурних умов. Для перевезення охолоджених, заморожених, розігрітих речовин застосовуються спеціалізовані судна, такі як рефрижератори, соковози, виновози, «гарячі» танкери, улаштовані ізоляційними конструкціями задля підтримки необхідних параметрів мікроклімату. Сучасні технології обробки некорегованих обсягів вантажів вимагатимуть вирішення задач раціонального функціонування суден, що пов'язано з їх частковим переобладнанням або розміщенням знімних ізоляційних конструкцій. Проте у науковій літературі останнього десятиріччя не висвітлюються питання проектування ізоляційних конструкцій суден та вибору для них нових тепло- і звукоізоляційних матеріалів, що являє собою важливе науково-технічне завдання.

Мета роботи – підвищення ефективності експлуатації суден, призначених для вантажів зі спеціальними температурними умовами, за рахунок проектування ізоляційних конструкцій з композиційних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно вирішити **завдання**, що пов'язані: з аналізом проблемних питань

щодо перевезення охолоджених, заморожених і розігрітих вантажів водним транспортом; обґрунтованим вибором ізоляційних матеріалів; вибором конструкції та розробкою технологічних рекомендацій щодо її виготовлення; визначенням можливостей часткового переобладнання наявних суден за допомогою улаштування теплоізоляційною конструкцією.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження становлять процеси проектування теплоізоляційних конструкцій суден, які призначені для транспортування вантажів зі спеціальними температурними умовами.

Предмет дослідження – закономірності впливу температурних умов транспортування вантажів на вибір матеріалів для теплоізоляційних конструкцій.

Методологія дослідження наведена в таблиці 1.

Для наочного сприйняття інформації у статті використовуються світлини, зроблені авторами за допомогою цифрової камери Olympus. Всі результати експериментальних досліджень, які наведено у статті, отримані авторами або за їхньою безпосередньою участю.

Основний матеріал.

Споживчі властивості та умови транспортування вантажів, що потребують спеціальних температурних умов. Швидкопсувні продукти (м'ясо, риба, овочі, фрукти) перевозяться на рефрижераторних суднах, на яких температурно-вологісні ре-

жими забезпечуються системами охолодження (СО) вантажних приміщень. Залежно від типу СО на судно завантажуються ті або інші вантажі, які перед транспортуванням зазнали додаткової обробки. У практиці міжнародних перевезень для м'яса застосовуються три основні температурні діапазони, це: від $-0,5$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$ – охолоджене (найбільш цінне); від -12 до -13°C – заморожене; від -18 до -30°C – сильно заморожене. Під час транспортування м'ясо повинне охолоджуватися на глибину до $1...2$ см, а коливання температури не повинні перевищувати $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ за відносної вологості $80...85\%$. Заморожене м'ясо можна зберігати протягом півтора року, а охолоджене зберігається без помітного погіршення $15...17$ діб; термін зберігання охолодженої риби становить $10...12$ діб. Визначені режими забезпечуються за допомогою батарейної системи охолодження, що зводить до мінімуму або повністю виключає вентиляцію вантажу, яка призводить до його усушки.

Транспортування плодоовочевої продукції відбувається в умовах, максимально наближених до природних, для чого застосовується повітряна система охолодження. Температура їх завантаження становить не нижче $+25^{\circ}\text{C}$, яка далі знижується до $+8...15^{\circ}\text{C}$ для тропічних плодів та $+2...11^{\circ}\text{C}$ для субтропічних. Задля запобігання виділення надлишкової вологи більшість овочів і фруктів зазнають додаткового покривання полімерними природними речовинами (зокрема хітіном, хітозаном, альгінатами тощо) з додатковою радіаційною обробкою. Їх транспортування відбувається у теплоізольованих ізотермічних контейнерах, проектування яких набуло розвитку також задля транспортування продуктів садівництва: саджанців, свіжозрізаних квітів, насіння тощо. За умовами конвективного теплообміну та дотримання вологості на рівні $65...75\%$ рослини можуть зберігатися протягом 20 днів за температури $+1...+8^{\circ}\text{C}$.

Продукти виноградарства та плодово-овочеві рідини, їх концентрати в охолодженому стані перевозяться на спеціалізованих наливних судах: виновозах та соковозах, для зручності процесів розвантаження і де-

зінфекції застосовуються вантажні танки зі скошеним дном. Підтримка температурних умов на рівні -10°C для вина і -1°C для соків здійснюється за допомогою теплоізолювання їх поверхні, для чого простір між танками може бути заповнений насипною тепловою ізоляцією, а на їхню внутрішню та зовнішню поверхню напилується шар термозахисного покриття.

Термоізольовані термоконтейнери застосовуються для транспортування хімічних реагентів і лікарських засобів, які за температури $+2...8^{\circ}\text{C}$ можуть зберігатися не більше ніж 48 годин. Для точного контролю температур біоматеріалів, вакцин, бактерійних препаратів у контейнери об'ємом $5...80$ л вбудовані термоіндикатори задля оповіщення про порушення температурних режимів. Застосування спеціального обладнання з мікропроцесорною системою контролю температури з цифровим дисплеєм та системою сигналізації різних рівнів дає змогу заморожувати плазму крові для подальшого її тривалого транспортування на судні. Плазма крові та стовбурові клітини за допомогою устаткування з шоким заморозувачем зазнають заморожування зі швидкістю $1^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ за температури $-70...80^{\circ}\text{C}$, після чого переносяться у сосуди Д'юара, у якому за температури -196°C у атмосфері рідкого азоту можуть зберігатися певний час і не втрачати свої властивості після розморожування. Під час транспортування сосуди Д'юара розташовуються усередині термоконтейнерів, хладагент не повинен містити фреону.

Тваринні та синтетичні жири медичного і косметологічного призначення транспортуються у розігрітому до $+40...60^{\circ}\text{C}$ стані. Для підтримки температурних режимів на судні розташовується нагрівальне устаткування, а ємкості з речовинами надійно теплоізолювані. Деякі речовини, які застосовуються у хімічному виробництві та будівництві, транспортуються наливом і розігріваються до більш високих температур: сірка – до $+135...150^{\circ}\text{C}$, асфальт і бітум – до $+150...200^{\circ}\text{C}$, синтетичні смоли – до $+250^{\circ}\text{C}$.

Огляд властивостей цих вантажів і аналіз умов їх транспортування довів необхідність застосування теплової ізоляції. З часом роз-

ширення асортименту вантажів вимагатиме від суднобудівних технологій впровадження нових конструктивних рішень.

Вибір матеріалів та технологічні рекомендації формування ізоляційних конструкцій. Підтримка необхідної температури розігрітого (охолодженого) вантажу забезпечується структурою і фізико-механічними властивостями матеріалу ізоляції, яка під час тривалої експлуатації в умовах судна може зазнавати механічних або вібраційних руйнувань, пошкодження гризунами, димовиділення та термодиструкції. Через стискання, насичення вологою, запотівання більшість матеріалів втрачатимуть теплоізоляційних властивостей, що частково компенсується шляхом формування конструкцій, які у загальному випадку складаються з ізоляційного матеріалу, зашивки ізоляції, каркасу для кріплення зашивки, кріплення та захисного шару.

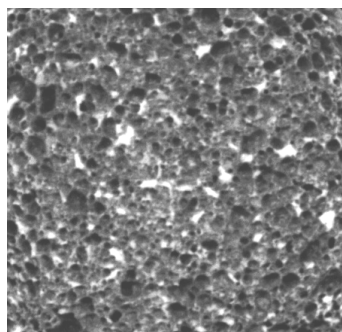
Світлини сучасних ізоляційних матеріалів наведено на рис. 1. У табл. 2 наведено їх основні фізико-механічні та спеціальні властивості.

Волокниста ізоляція Rockwool – найбільш перспективний тепло- і звукоізоля-

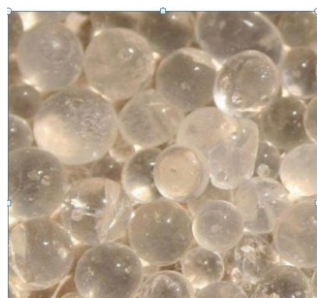
ційний матеріал, поставляється у вигляді плит, рулонів або матів, застосовується для ізоляції розігрітих поверхонь, зокрема ізоляції на «гарячих» танкерах. Завдяки хімічному складу волокна (мас., %: 34...45 SiO_2 , 15...24 Al_2O_3 , 2...11 % Fe_2O_3 , 20...35 (CaO+MgO), 1...7 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), який містить аморфні силікати, матеріал може витримувати, не плавлячись, понад 1000°C та забезпечувати захист від вогню. Його структура (рис. 1, а) являє собою перехрещені штучні вертикальні і горизонтальні мінеральні волокна (95,5...99,5% об'ємн.) діаметром 3...6 мм, просочені водною емульсією фенолоформальдегідної смоли (0,5...4,5% об'ємн.), яка випаровується за температури 250°C. Проте суттєвим недоліком ізоляції Rockwool, як і всіх волокнистих матеріалів, є високе водопоглинання, стисливість та втрачання теплоізоляційних властивостей під час експлуатації. Суттєве збільшення коефіцієнта тепловіддачі у разі підвищення температури призводить до збільшення товщини теплоізоляційного шару конструкції. Пакети ізоляції із волокнистих матеріалів встановлюються на шпильках та закрі-



а



б



в



г

Рис. 1. Світлини ізоляційних матеріалів: а) волокниста ізоляція Rockwool; б) піноскло; в) силікагель; г) водостійкий гравій

Таблиця 2. Властивості ізоляційних матеріалів

Матеріал	Фізико-механічні властивості			Спеціальні властивості
	Щільність, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Максимальна температура використання, °	
Rockwool	130...150	0,035...0,05	750...1000	Гідрофобність Вогнетривкість
Піноскло	230...300	0,053...0,112	600	Капілярно-пориста структура і сорбційні властивості
Силікагель ($xSiO_2 \cdot nH_2O$)	400...511	0,63	300	Акумуляція теплової енергії
Водостійкий гравій	300	0,085	900	Хімічна стійкість і морозостійкість

Джерело: складено авторами за аналізом робіт [20–22] та результатами досліджень авторів

плюються шайбами або ковпачками; у разі застосування волокнистої ізоляції здебільшого застосовується алюмінієва фольга.

Піноскло являє собою легкий комірчастий матеріал (рис. 1, б), застосовується в технологіях ізолювання рефрижераторів, ізоtermічних контейнерів, наливних суден для транспортування охолоджених соків і вин. За своєю хімічною структурою піноскло є аморфним матеріалом з температурним порогом деформації 450°C, являє собою розплав оксидів кремнію, натрію, алюмінію, магнію, які є особо стійкими до біологічних та хімічно активних середовищ, що робить його стійким до бактеріальних ушкоджень, непрохідним для гризунів. Реальний температурний діапазон, у якому піноскло може ефективно застосовуватись без втрати фізико-механічних властивостей і міцності, становить від -260°C до +230°C. Піноскло не підтримує горіння, не виділяє токсичні речовини та вважається екологічно чистим матеріалом, який одержується методом порошкової металургії переважно спіканням порошоків із здрібненого скляного бою. Порівняно з волокнистим та полімерним видами ізоляції піноскло не зазнаватиме пошкодження гризунами.

Силікагель ($xSiO_2 \cdot nH_2O$) являє собою висушений гель кремнієвої кислоти пористої будови з розвинутою поверхнею (рис. 1, в). За зовнішнім виглядом це є склоподібні прозорі або матові зерна овальної, сферичної або неправильної форми. Дрібнозернистий силікагель містить домішки окису алюмінію ($xSiO_2 \cdot yAl_2O_3 \cdot nH_2O$). Двоокис кремнію SiO_2 має аморфну ультрамікропористу структуру

з розмірами відкритих пор приблизно 3...60 нм. Композиційні адсорбенти на основі силікагельних матриць, які просочені гігроскопічними солями, застосовуються у адсорбційних холодильниках, у яких робочим тілом є вода; вони також використовуються для обладнання кріобіологічних контейнерів. Переваги їх застосування полягатимуть у невисокій температурі регенерації, при цьому значна частка (80...90%) адсорбованої води може бути видалена шляхом нагрівання до 70...80°C, що дає змогу використовувати для регенерації сорбентів теплові джерела з невисоким температурним потенціалом, наприклад, теплоту, яка виділяється за певних технологічних процесів.

Насипна тепла ізоляція з водостійкого гравію (рис. 1, г) засипається у простір навколо конструкції, яку потрібно ізолювати, наприклад, вкладений танк на судні, призначений для охолоджених соків. Незважаючи на важкий доступ до трубопроводів та приладів вантажних систем, розташованих навколо танків, застосування насипної ізоляції сприятиме вирішенню проблем, пов'язаних з остійністю.

Підвищенню ефективності експлуатації суден сприятиме не тільки надійне ізолювання та підтримка температурних умов розігрітих або охолоджених вантажів, а й збільшення їх провозоспроможності та розширення логістичних маршрутів. Тому у проектуванні ізоляційних конструкцій важливо враховувати їх масогабаритні показники і технологічність виготовлення. У сучасній практиці перевага надається полегшеним композиційним матеріалам,

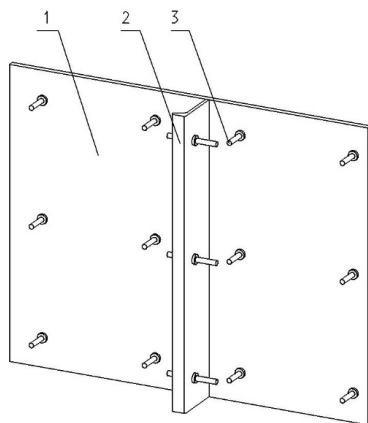
зокрема спіненим пластичним масам, синтактикам, полімерним покриттям. За їх участю можна формувати окремі ізоляційні модулі, які встановлюються у вантажній зоні судна або розташовуються на судноплавному засобі. Як приклад на рис. 2 схематично наведено процес формування теплоізоляційної конструкції з використанням плиточної ізоляції типу «синтактик» (рис. 2, в), монтаж якої на стінку танка або ємкості для вантажу (рис. 2, а) здійснюється за допомогою механічних кріплень (рис. 2, г).

Теплоізоляційні властивості типу «синтактик» пояснюються особливостями їх структури, яка складається зі спечених порожніх скляних мікросфер (рис. 3, а). Альтернативу плиточній ізоляції становлять напилени склополімерні покриття (рис. 3, б), для формування яких застосовано екологічно чистий порошкоподібний полімер

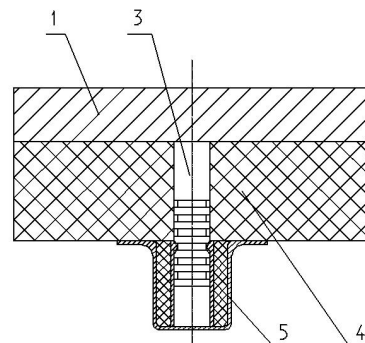
ПЕП-219 (ТУ 6-10-1597-77), які застосовуються у холодильній техніці для нанесення на внутрішню поверхню холодильних та морозильних камер.

Коефіцієнт теплопровідності цих матеріалів приблизно однаковий і становитиме $\approx 0,035$ Вт/(м·К). Проте через низький температурний діапазон розм'якшення полімерного складника у разі температур $+150 \dots 180^\circ\text{C}$ склополімерні покриття зазнаватимуть деструкційних пошкоджень, що робить їх непридатними для нанесення на гарячі поверхні. Для ізолювання поверхонь танків суден, призначених для розігрітих вантажів, рекомендується використовувати неорганічні композиційні матеріали з механічним кріпленням, що сприятиме уникненню температурних напружень.

На рис. 4 наведено схематичне зображення поздовжнього перетину танкера-продуктовозу,



а



б

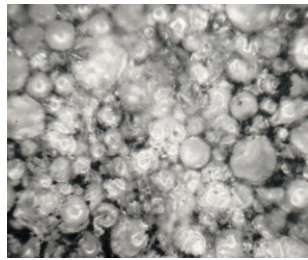


в

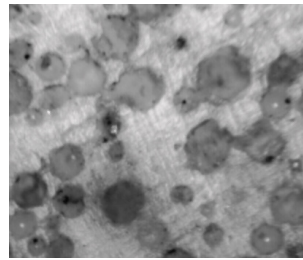


г

Рис. 2. Формування теплоізоляційної конструкції: а) монтаж ізоляції; б) схематичне кріплення теплоізоляційних плиток; в) світлина теплоізоляційної плитки із синтактичного піноскла із самоклеючим полімерним покриттям Fibrotech; г) ковпачок для кріплення теплової ізоляції; 1 – стінка танка або ємкості; 2 – ребро жорсткості; 3 – шпилька; 4 – теплова ізоляція; 5 – ковпачок



а



б

Рис. 3. Оптичні мікрофотографії ($\times 270$) матеріалів типу «синтактик» (мікрофотографії зроблено автором за допомогою оптичного мікроскопа ММР-2Р): а) «синтактичного піноскла»; б) полімерне покриття композиції ПЕП-219 – скляні мікросфери

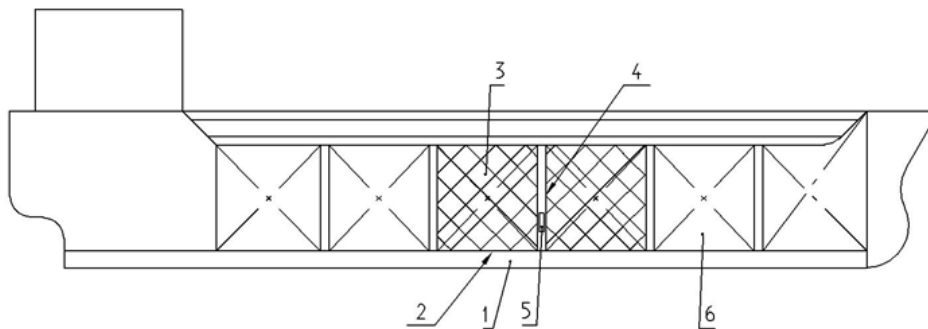


Рис. 4. Поздовжній перетин продуктового, частково переобладнаного під розігріті вантажі [25, авторська розробка]: 1 – подвійне дно; 2 – вантажні танки, що модернізовані під розігріті вантажі; 3 – теплова ізоляція; 4 – подвійна переборка; 5 – нагрівальне обладнання; 6 – танки для інших вантажів

який пропонується частково переобладнати під транспортування гарячих наливних вантажів. Для цього на поверхню вантажних танків 2, які розташовані проміж інших танків 6, наноситься теплова ізоляція 3. У подвійній переборці 4 встановлюється нагрівальне обладнання. Теплова ізоляція наноситься лише по периметру вантажних танків 2, при цьому поверхні сусідніх танків не зазнаватимуть ізолювання.

Обговорення отриманих результатів.

Одержані результати являють собою науково-технічне підґрунтя для переобладнання та модернізації наявних проєктів суден та судноплавних засобів, що сприятиме розширенню асортименту вантажів. Це робить доставку товарів першої необхідності у населені пункти прибережної зони внутрішніх водних шляхів, що є актуальним в умовах призупинення діяльності портів Чорноморсько-Азовського басейну під час широкомасштабного вторгнення російських військ на територію України.

Аналіз властивостей і умов транспортування вантажів, які потребують спеціальних температурних умов, показав необхідність застосування теплової ізоляції, яка забезпечує надійне збереження вантажів на максимально тривалий термін. Проведений ґрунтовний огляд сучасних матеріалів, які використовуються у технологіях суднобудування та судноремонту, показав доцільність, переваги і недоліки застосування волокнистих матеріалів, полімерних композитів з комірчастою структурою, насипної ізоляції, різновидів піноскла. Доведена необхідність впровадження нових композиційних матеріалів і покриттів у ізоляційні технології, що зумовлено зменшенням масогабаритних показників та матеріалоемності тепло- і звукоізоляційних конструкцій, підтримкою певних температурних вимог.

Розглянуті перспективи застосування плітчастої теплової ізоляції типу «синтактик» і склополімерного покриття, наповненого

скляними мікросферами, показали можливість розширення теплоізоляційних технологій, які можуть бути застосовані для переобладнання суден та улаштування судноплавних засобів модульними теплоізоляційними конструкціями. Запропоноване технічне рішення щодо часткового переобладнання танкера-продуктовозу під транспортування розігрітих вантажів сприятиме економії енерговитрат на підігрівання вантажів та дасть змогу розширити вантажні перевезення за рахунок одночасного транспортування декількох вантажів.

Подальші дослідження авторів пов'язані з визначенням товщини теплоізоляційного шару та прогнозуванням у ньому температурних напружень в умовах термічних навантажень.

Висновки. Запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено важливу науково-

технічну проблему ізолювання на суднах охолоджених, заморожених і розігрітих вантажів, в основу вирішення якої покладено створення стаціонарних або знімних модулів, улаштованих тепловою ізоляцією. Для цього:

1) проаналізовано споживчі характеристики, температурно-вологісні режими та умови транспортування продовольчих продуктів, живих рослин та саджанців, ліків, біологічних матеріалів, розігрітих синтетичних речовин, таких як жири, бітум, асфальт, сірка;

2) розроблено технологічні рекомендації щодо виготовлення теплоізоляційних конструкцій з використанням нових композиційних матеріалів;

3) як приклад реалізації розглянуто часткове переобладнання танкера-продуктовозу під розігріті вантажі.

Список літератури

- [1] Богомоллова, Н.І. (2020) Організаційно-економічні умови управління системою доставки швидкопсувної продукції. Електронне фахове видання «Ефективна економіка». № 2. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.2.10>.
- [2] Іщенко, В.М., Брайковська, Н.С., Осьмак, В.Є. (2017) Дослідження зміни температури вантажу при транспортуванні в ізотермічному вагоні з використанням математичного моделювання. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. № 3 (223). С. 80–84. URL: <https://journals.snu.edu.ua/>.
- [3] Vorkut, T., Volynets, L., Bilonog, O., Sopotsko, O., Levchenko, I. (2019) The model to optimize deliveries of perishable food products in supply chains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. № 3 (101). P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.17790>.
- [4] Науково-технічні дослідження у галузі транспорту : колективна монографія (2022) / за заг. ред. Д.В. Ломотька. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г.М. Т. 2. 216 с. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/transport2.pdf>.
- [5] Kazymyrenko, Y., Drozd, O., Yeholnikov, O. & Morozova, H. (2020) System and analytical of the development of transport and technological systems of railway ferries. *Technology audit and production reserves*. № 2/2 (52), pp. 40–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200626>.
- [6] Savchenko, L.V., Gritsenko, S.I. (2020) Analysis and Classification of Possible Schemes for Consolidated Delivery of LTL Cargo. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 2 (39), pp. 139–144. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2\(39\).139-144](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2(39).139-144).
- [7] Мельник, О.М. (2019) Вплив навантаження негабаритного та великовагового вантажу на посадку та остійність судна. *The scientific heritage journal*. № 42 (1), С. 42–47.
- [8] Мельник, О.М. (2019) Питання забезпечення безпеки процесу морського перевезення негабаритних вантажів. *Комунальне господарство міст ХНУМГ ім. Бекетова*. № 152 (6), С. 204–208. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-6-152-204-208>.
- [9] Ширін, Л.Н., Денищенко, О.В., Барташевський, В.Є., Коровяка, Є.А., Расцветаєв, В.О. (2019) Транспортування нафти, нафтопродуктів і газу : навчальний посібник. Дніпро : НТУ «ДП», 2019. 203 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/154565/CD1142.pdf>.
- [10] Круглий, Д.Г. (2021) Інноваційні технології суднобудування як запорука цілісної екосистеми України. *Вчені записки НТУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. Том 32 (71), ч. 2, № 1. С. 107–112. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/1_2021/part_2/20.pdf.

- [11] Бергілевич, О.М., Касянчук, В.В. (2018) Теоретичне та експериментальне обґрунтування оцінки мікробіологічного ризику *Cronobacter* spp. (*Enterobacter sakazakii*) : монографія. Суми : Сумський державний університет, 308 с.
- [12] Овчаренко, Ю.С. (2019) Історія кріофізики в Україні : монографія. НААН, ННСГБ. Харків : ФОП Панов А.М., 168 с.
- [13] Енергоресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі : монографія / Г.М. Шабанова, К.К. Пушкарьова, Л.Й. Дворкін та ін. Київ : Задруга, 2014. 272 с.
- [14] Топільницький, П.І., Ромагчук, В.В., Ярмола, Т.В., Зінченко, Д.В. (2019) Фізико-хімічні властивості важких нафт Яблунівського родовища з високим вмістом сірки. *Chemistry, technology and application of substances*. Vol. 2, № 2. С. 102–109. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/chtaps_2019_2_2_19.
- [15] Ромашко, І.С., Драчук, У.Р., Бессараб, І.М. (2017) Використання баранячого жиру у виробництві косметичних засобів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини*. Т. 19. № 75. С. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.15421/nvlvet7528>.
- [16] Шутюк, В.В., Бессараб, О.С., Душак, О.В. & Ємцев, В.І. (2022) Холодильні технології : навчальний посібник. Київ НУХТ : ФОП Ямчинський О., 172 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/38741>.
- [17] Щедролосєв, О.В. (2021) Шляхи вдосконалення енерговикористання суднових енергетичних установок дизельних суден. Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». Херсон. С. 113–114. URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021.pdf>.
- [18] Горобець, В.Г. (2014) Спряжений теплообмін вертикальних поверхонь з плоскопаралельним неперервним обрешенням в умовах природної конвекції. *Техніка і енергетика*. № 194. С. 149–160. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnika/article/view/1491>.
- [19] Тацій, Р.М., Пазен, О.Ю. & Бережанський, Т.Г. (2019) Моделювання процесу теплообміну в багатошаровій порожнистій сферичній конструкції з урахуванням внутрішніх джерел тепла. *Пожарна безпека*. № 35, с. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.13>.
- [20] Коробейнікова, В.О., Соломонюк, Н.С. (2018) Теплопровідність блоків плавучості підвищеної теплостійкості на базі піноскла. *Збірник наукових праць НУК*. № 3–4. С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15589/jnn20180302>.
- [21] Ратушняк, Г.С., Бікс, Ю.С., Лямок, А.О. (2022) Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Науково-технічний журнал «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві»*. № 1. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311121429-2022-1-43-48>.
- [22] Belyanovskaya, E., Sukhyu, K., Serhiienko, Y., Sukhyu, M., Pustovoy, G., & Sukha, I. (2022) Експериментальний аналіз адсорбційного теплоакумуючого модуля відкритого типу на основі композитного адсорбенту «силікагель – кристалогідрат». *Scientific Works*, № 86 (1), с. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2403>.
- [23] Казимиренко, Ю.О. (2003) Спосіб реконструкції судна. Патент України № 58071 : Київ. Державне патентне видавництво України. URL: <https://ukrpatent.org>.
- [24] Казимиренко, Ю.О. (2002) Спосіб секційного виготовлення корпусу судна. Патент України № 52426А : Київ. Державне патентне видавництво України. URL: <https://ukrpatent.org>.

© Казимиренко Ю.О., Савочкіна В.В.

Дата надходження статті до редакції: 31.05.2023

Дата затвердження статті до друку: 26.10.2023