

УДК 629.129.22

НОВІ ЗАСОБИ ПІДЙМАННЯ ЗАТОНУЛИХ ОБ'ЄКТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІДКОГО АЗОТУ

С.В. Терлич¹

¹к.т.н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонська філія
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6044-3087

Анотація

Представлені інженерні рішення використання рідкого азоту для заморожування води у відсіках і цистернах затонулих об'єктів, а також інженерних споруд, які були штучно затоплені для їх підйому на поверхню. Технологія може бути частково застосована для докування великих суден або повністю використана для підйому і докування середньотонажних і малотоннажних плавучих споруд. Представлені конструктивні схеми пропонованих установок, а так само функціональні і графічні залежності параметрів льоду в затоплених відсіках від характеристик зовнішнього середовища і потужності холодильної установки.

Для підігріву рідкого азоту при переході його в газоподібний стан розроблені рекомендації розрахунку криогенного газифікатора, який частково використовує внутрішню енергію переходу води з рідкого до твердого фазового стану. Під час комп'ютерного моделювання доведена можливість використання до 47% теплоти фазового перетворення води за відсутності обмерзання тепло передавальних елементів газифікатора.

У процесі дослідження розроблено комп'ютерну модель прогнозування маси льоду при безпосередній подачі рідкого азоту морської води і з'ясовано, що рідкий азот можна подавати у воду об'єкта, який продувається, і якщо виконувати відповідні технічні умови, лід на елементах газифікатора не створюватиме.

Рідкий азот є ефективним, нешкідливим, інертним легко газифікується і одним із найдешевших засобів створення позитивної плавучості для затонулих об'єктів. Можуть бути різні типи установок використання рідкого азоту для суднопідіймальних робіт залежно від конкретних поставлених завдань. Лід, яка утворюється на трубопроводі-газифікаторі, загалом не впливає на хід суднопідіймальної операції. Як ефективний засіб підігріву рідкого азоту в криогенному газифікаторі можна використовувати забортну воду, використовуючи для цих цілей до 47% теплоти фазового переходу води з рідкого у твердий стан.

У відповідних умовах можна безпосередньо подавати рідкий азот у воду об'єкта, який продувається, нехтуючи замерзанням води і створенням на виході трубопроводу пробок із льоду.

Ключові слова: рідкий азот, підйом затонулих об'єктів, криогенні технології.

NEW METHODS OF LIFTING SUBSCRIBED OBJECTS AND STRUCTURES
WITH THE USING OF LIQUID NITROGEN

S.V. Terlych¹

¹Ph.D. in Technology, Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair,
Kherson Branch
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6044-3087

Summary

Engineering solutions for the use of liquid nitrogen for freezing water in compartments and tanks of sunken objects, as well as engineering structures that were artificially flooded to rise to the surface, are presented. The technology can be partially applied for docking of large ships or fully used for lifting and docking of medium and low-tonnage floating structures. Structural diagrams of the proposed installations, as well as functional and graphic dependences of ice parameters in flooded compartments on the characteristics of the external environment and the capacity of the refrigeration unit are presented. It was found that liquid nitrogen is safer, more efficient and economical compared to similar substances such as hydrazine, air, gunpowder and various fuels. The technologies of using liquid nitrogen using the heat of the environment and gasifying it in the pipeline are considered.

To heat liquid nitrogen during its transition to the gaseous state, recommendations for the calculation of a cryogenic gasifier have been developed, which partially uses the internal energy of the transition of water from the liquid to the solid phase state. Computer simulation has proven the possibility of using up to 47% of the heat of the phase conversion of water in the absence of icing of the heat transfer elements of the gasifier. The study developed a computer model for predicting the mass of ice during the direct supply of liquid nitrogen to seawater and found that liquid nitrogen can be fed into the water of the object being blown and if the appropriate technical conditions, the ice on the gasifier elements is not will be created. Liquid nitrogen is an effective, harmless, inert, easy to gasify and one of the cheapest means of creating positive buoyancy for sunken objects.

There are various types of installations for the use of liquid nitrogen for ship lifting, depending on the specific tasks. Ice, which is formed on the gas pipeline, does not affect the course of the lifting operation. As an effective means of heating liquid nitrogen in a cryogenic gasifier, seawater can be used, using for this purpose up to 47% of the heat of the phase transition of water from liquid to solid state. Under appropriate conditions, liquid nitrogen can be fed directly into the water of the facility, which is purged by ignoring the freezing of water and the creation of ice plugs at the outlet of the pipeline.

Key words: liquid nitrogen, lifting of sunken objects, cryogenic technologies.

Вступ. Висока аварійність суден та технічних засобів освоєння океану висуває актуальні задачі пошуку нових ефективних засобів створення позитивної плавучості на великих глибинах. На дні морів і природних водойм знаходиться велика кількість затонулих і штучно затоплених об'єктів, питання підйому яких дедалі

частіше розглядаються в наші дні. Для України найбільш проблематичними є прибережні ділянки Чорного і меншою мірою Азовського морів, але ще більшою мірою – це водосховища Дніпра та Південного Бугу. *Рідкий азот* є кріопродуктом, тонажне виробництво якого організоване на спеціалізованих установках із розділення повітря та посиленням хладовиробничим циклом на основі відцентрових турбодетандерів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних технічних засобів створення позитивної плавучості підводних об'єктів довів, що передує їм вони зорієнтовані на використання стислого повітря. Із метою заміни стислого повітря в різні часи були досліджені та частково рекомендовані до використання порох, рідкі ракетні палива, гідразин та інші газовиділяючі речовини та суміші. При цьому розглянуто праці Б.Т. Маринюка, М.Ф. Руденко, С.І. Бажинова, Ю.В. Шипулиної, О.В. Бараненко, М.В. Угольникової, І.А Скакун та інших авторів. Загалом питання створення сил позитивної плавучості на великих глибинах залишається проблематичним та остаточно не вирішеним [1–3].

Як один із можливих заходів створення позитивної плавучості автор розглядає можливість використання рідкого азоту для підняття суден, інших затонулих (затоплених) інженерних споруд та в судноремонтній промисловості під час докування суден.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є порівняння техніко-економічних властивостей газовиділяючих речовин (альтернативних стислому повітрю), як матеріалів для створення позитивної плавучості; розроблення установки та технології суднопідймальних робіт на прикладі використання рідкого азоту, а також удосконалення технологій суднопідймання із використанням рідкоазотних технологій.

Виклад основного матеріалу. Як варіант засобів створення позитивної плавучості можливе використання в суднопідйманні рідкого азоту. З 1 м³ азоту густиною 808 кг/м³, який знаходиться при температурі мінус 196 °С та барометричному тиску (0,101 МПа), можна отримати 646 м³ газу. Промислова коштовність 1 м³ рідкого азоту становить 6–8 грн. Позитивні та негативні властивості азоту наведено в таблиці.

Із таблиці 1 очевидно, що рідкий азот вигідно відрізняється від інших засобів створення позитивної плавучості тим, що він нешкідливий та не є вибухонебезпечним.

Для вирішення поставлених задач дослідження було проведено порівняльний аналіз мас-габаритних, часових та економічних характеристик можливих установок із використанням повітря, одно- та двокомпонентних ракетних палив, порохів твердопаливних газогенераторів, гідразину та рідкого азоту в процесі продування умовного понтону об'ємом 250 м³ на глибині 500 м.

Із таблиці 2 видно, що установки, які використовують рідкий азот, будуть мати масові показники в 1,5–3,0 раза більше, ніж ті, в яких використовується ракетне паливо, але дешевше їх у 15–30 разів. За рівних характеристик повітряних та азотних установок час продування затонулих (затоплених) об'єктів рідким азотом приблизно у 5 разів менше.

Таблиця 1

Характеристики речовин для створення позитивної плавучості

Речовина	Позитивні якості	Негативні якості
Повітря	– нешкідливе та безпечне; – відносно невелика ціна 1 м ³ об'єму, який продувається;	– наявність шлангів для продування; – великі мас-габаритні показники системи при використанні балонів; – час продування об'єкта пропорційний кінцевому тиску повітря в балонах та продуктивності компресорів судна-рятувальника
Двокомпонентні ракетні палива, порох	– можливість створення автономних газогенераторів високої продуктивності; – відсутність шлангів для продування; – висока газовиділяюча можливість (1 м ³ продукту виділяє 1000–1200 м ³ газу)	– продукти згоряння токсичні; – неможливе широке регулювання часу продувки об'єкта; – висока коштовність 1 м ³ об'єму продування
Гідразин	– можливість створення автономних газогенераторів високої продуктивності; – невеликі габарити та висока газогенерація (1 м ³ гідразину – 1800 м ³ газу)	– продукти розпаду вибухонебезпечні (до 54% Н ₂); – швидкість хімічної реакції нерівномірна; – токсичний; – необхідний каталізатор; – висока коштовність 1 м ³ об'єму продування
Рідкий азот	– нешкідливий, безпечний та інертний; – невисока коштовність 1 м ³ об'єму продування; – можливість регулювання швидкості підйому, крену, диференту об'єкта; – можливість створення автономного газогенератора в зануреному судні Д'юара	– можливість зледеніння обладнання; – непродуктивні витрати криогену при заходженні та перезарядці обладнання; – відсутність високонапірних криогенних насосів високої продуктивності

Для створення установок продування затонулих (затоплених) об'єктів із використанням рідкого азоту були проаналізовані створені промисловістю засоби отримання, зберігання, транспортування, перекачування та газифікації рідкого азоту:

- отримання – установка Кж-Аж-Арж-6 виробничістю 72 кг/год рідкого азоту, яка може перероблювати 22 000 м³ повітря;
- зберігання отриманого продукту – резервуари-сховища РС-1400/5, місткістю 1500 м³, при втратах 0,035% продукту за добу;
- транспортування: залізницею – РЦГ-100/5, місткістю 230 м³, при цьому маса рідкого азоту – 1600 кг, а втрати – 0,12% продукту за добу;
- РЦГ-100/5, місткістю 100 м³, при втратах 0,12 продукту за добу;
- газифікації ГХК-25/16-200 місткістю 180 кг за рідким азотом із робочим тиском на виході газу 0,1–1,6 МПа.

Таблиця 2

**Порівняння характеристик речовин для продування понтону об'ємом
250 м³ на глибині 500 м**

Речовина	Наведена виробничість 1 м ³ речовини, м ³	Необхідна маса речовини, кг	Ціна 1 м ³ об'єму продування, грн	Коштовність продування понтону, грн	Час продування, год	
Повітря (балони рятувального судна)	Залежно від кількості балонів	246/141* без маси трубопроводів	2,80	1400	17	
Компресор ЭК30А-2	8,64	246/37* без маси трубопроводів	1,40	700	33	
Пальне	Т-2	19,70	142/300*	35,0	17500	0,2
	Т-1	25,0	112/240*	76,0	38000	0,2
Порохові твердопаливні газогенератори	13,40	150/160*	167,0	83500	Залежно від типу устаткування	
Гідразин	30,0	96,8	170,0	85000	-	
Рідкий азот	10,60	235/450* без маси трубопроводів	5,40	2700	2,65	

*У чисельнику – маса речовини, в знаменнику – маса устаткування

На рисунках 1 та 2 показано, відповідно, залежності газовиділяючі можливості рідкого азоту для діапазону глибин 100–1200 м та 2000–10 000 м.

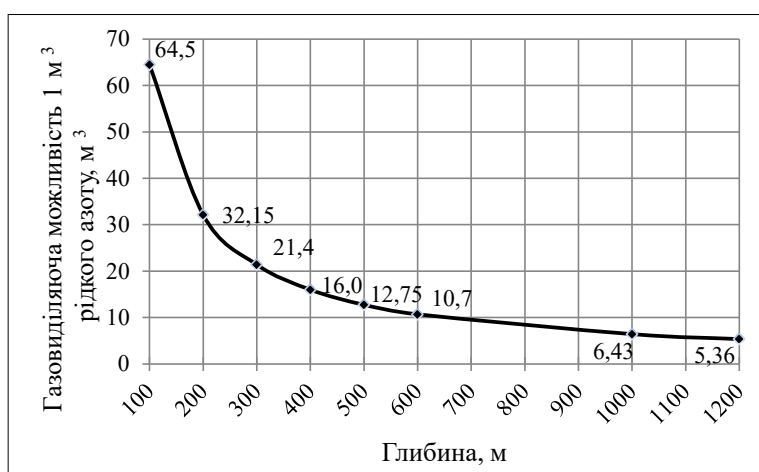


Рис. 1. Газовиділяюча здатність 1 м³ рідкого азоту залежно від глибини його газифікації (100–1200 м)

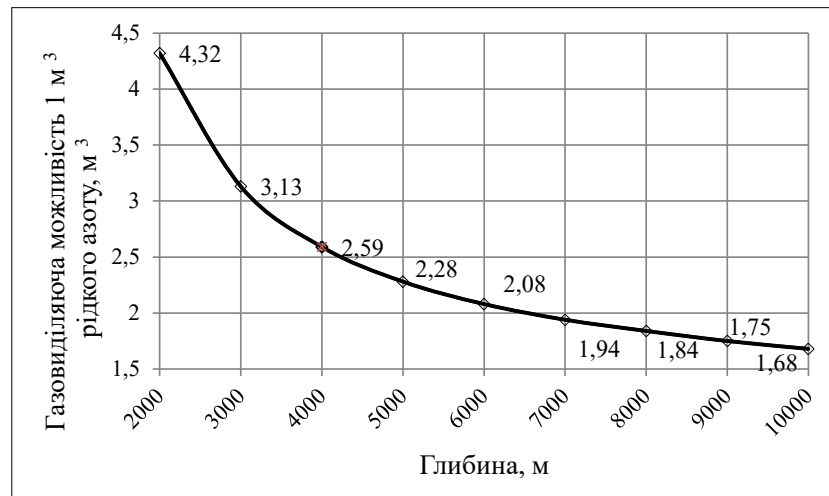


Рис. 2. Газовиділяюча здатність 1 м³ рідкого азоту залежно від глибини його газифікації (2000–10 000 м)

За наведеними даними видно, що вже існують засоби отримання, зберігання та транспортування рідкого азоту. Водночас засоби та пристрої перекачування та газифікації не відповідають науковому завданню: у разі великої масової подачі вони мають малий напір або навпаки [4–5].

У дослідженні розглянуто три можливих варіанти установок для газифікації рідкого азоту з метою судноремонту:

- перший варіант (рис. 3, а) – газифікація рідкого азоту проходить у трубопроводі-газифікаторі за шляхом слідування, теплотою оточуючої води;
- другий варіант (рис. 3, б) – рідкий азот газифікується у спеціальному водяному газифікаторі теплоутриманням води, яка перекачується по газифікатору до трубопроводу в газоподібному стані;
- третій варіант – рідкий азот у посуді Д'юара занурюється до місця ведення робіт та газифікується у продувальному об'ємі теплоутриманням води, яка видаляється.

Робота установок за першим та другим варіантами. Із транспортного посуду (наприклад, РЦГ-100/5) рідкий азот за допомогою криогенного насоса (наприклад, ВК-110-65) або самопливом при піддуванні транспортного посуду подається в теплоізольовану підпиточну ємність 2, при цьому клапан вентиляції відкритий. Процес заохолодження та заповнювання підпиточної ємності контролюється тепловимірними приладами. Після заповнення підпиточної ємності насос зупиняється або підпитування з транспортного посуду припиняється. Криоген до затопленого об'єкта подається по трубопроводу-газифікатору 4 шляхом продукту підпиточної ємності 2 повітрям, яке подається балонами з повітрям високого тиску (ПВТ) 1.

Для виключення утворення в трубопроводі крижаних пробок трубопровод-газифікатор перед подачею до нього криогену продувається повітрям. У точці виходу трубопроводу-газифікатора 4 до об'єму, який продувається, на трубопроводі встановлюється безповоротним клапан 6, який запобігає потраплянню води до трубопроводу.

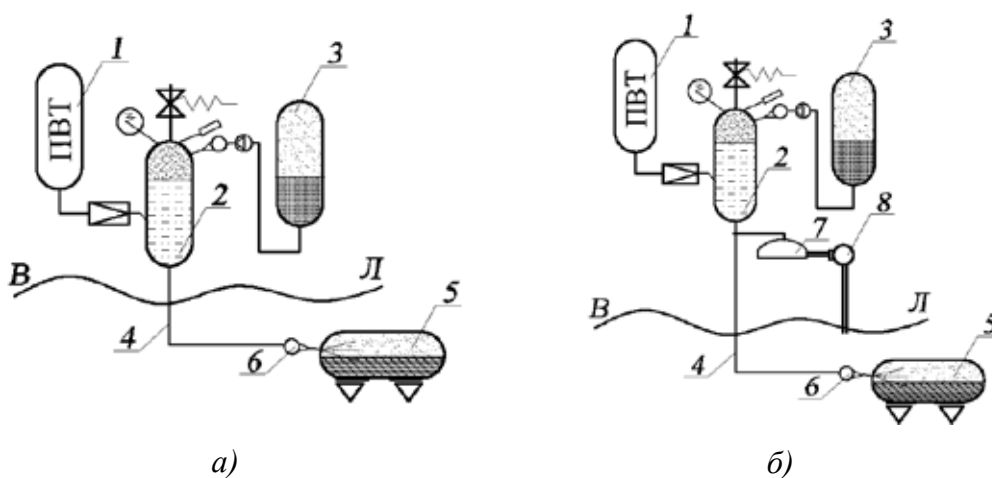


Рис. 3. Установка газифікації рідкого азоту
за першим а) та другим б) варіантами газифікації

1 – балон ТВП; 2 – підпита вальна ємність; 3 – транспортна цистерна; 4 – трубопровід-газифікатор; 5 – понтон; 6 – клапан; 7 – газифікатор; 8 – циркуляційний насос.

Відмінною особливістю установки (рис. 2, б) від установки (рис 2, а) є те, що в ній є криогенний газифікатор 7. У трубопроводах газифікатора криоген підігрівається теплом та частково переохолоджений водою, яка прокачується в міжтрубному просторі циркуляційним насосом 8.

Робота установки за третім варіантом. Для цього випадку використовується ізоляційна система з м'якими стінками та урівноваженням тиску газонаповнення. На глибині криоген із сосуда Д'юара насосом або самотоком (за рахунок підвищення тиску внаслідок його нагрівання) або іншим побудником подається до об'єму, який продувається [6].

Під час розглядання можливих установок газифікаторів **невирішеними проблемами** залишились:

- за першим варіантом – прогнозування маси криги, яка створюється в трубопроводі-газифікаторі 4;
- за другим варіантом – відсутність методики розрахунку криогенно-водяного газифікатора та факт того, що не визначено раціональне значення тепловідбору від води, яка прокачується по газифікатору 7;
- за третім варіантом не визначена методика прогнозування криги, яка утворюється під час безпосередньої подачі рідкого азоту до води об'єму, який продувається залежно від глибини затопленого об'єкта та параметрів азотної установки.

Ці **задачі розв'язані** аналітично та апробовані шляхом комп'ютерного моделювання. Визначено, що крига, яка утворюється на трубопроводі-газифікаторі 4 (рис. 4), не створює істотного впливу на результат суднопідіймальної операції загалом. Так, наприклад, у вибраних параметрах можливої натурної установки з подачею 10 м³/год через 20 годин у морській воді (щільність 1,025 т/м³) із температурою 4^oС створюється 413 кг криги. Позитивна плавучість її становитиме 51 кг. Зусилля, яке необхідне для розриву заданого трубопровода-газифікатора, становитиме 129–247 кН.

Взаємозв'язок температури забортної води та параметрів криги досліджено за залежністю [6]

$$T_c = 273 - T'\beta - T' \left(\frac{\beta}{2a} + \frac{\sqrt{\tau}}{\beta\sqrt{\tau} + r_0} \right) \frac{\beta^2}{2}, \quad (1)$$

$$T' = \frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha_w \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_w - T_\Phi),$$

де T_c – температура стінки трубопроводу, °С;

T' – похідна профілю температур за координатою товщини криги, яка наморозується на трубопровід, °С;

T_w – температура забортної води, °С;

T_Φ – температура фазового переходу води у кригу, °С;

λ – коефіцієнт теплопровідності водяної криги при температурі фазового переходу в кригу, Вт / (м·°С);

ρ – густина криги, кг/м³;

L – теплота фазового переходу води в кригу, Дж;

α_w – коефіцієнт тепловіддачі від води, Вт / (м·°С);

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

τ – момент часу, сек;

r_0 – лінійний параметр, м.

Для розрахунку товщини шару криги, яка намерзне з урахуванням залежності температуропровідності від температури, була використана залежність [7]

$$T_c = 273 - T'\beta + \left[\frac{(T')^2}{273} - \frac{T'\sqrt{\tau}}{\beta\sqrt{\tau} + r_0} + 273\rho \frac{C}{2k} T'\beta \right] \frac{\beta^2}{2}, \quad (2)$$

Графічно залежності (1) та (2) наведено на рис. 4.

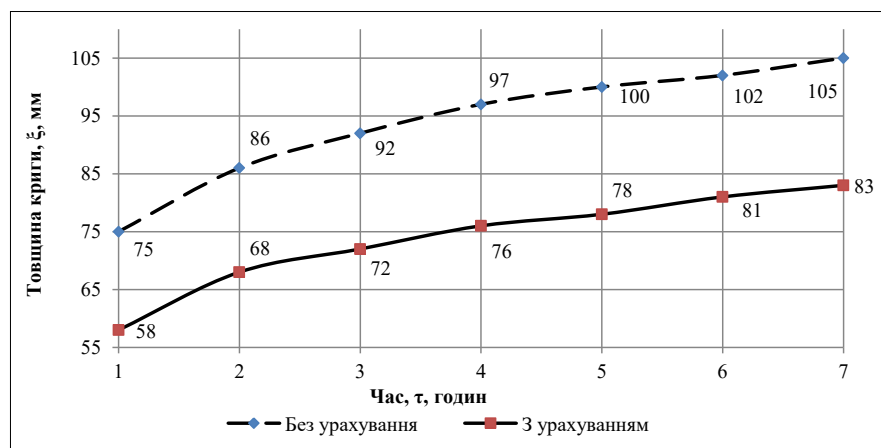


Рис. 4. Залежність заморожування криги на трубопровод-газифікатор із часом з урахуванням та без урахування залежності температуропровідності від температури

Аналіз отриманих результатів. Для підігрівання рідкого азоту в переході його в газоподібний стан розроблено рекомендації розрахунку криогенного газифікатора, який частково використовує внутрішню енергію переходу води з рідкого до твердого фазового стану. Під час комп'ютерного моделювання доведено можливість використання до 47% теплоти фазового перетворення води за відсутності зледеніння тепло передаючих елементів газифікатора.

У процесі дослідження розроблено комп'ютерну модель прогнозування маси криги під час безпосередньої подачі рідкого азоту до морської води та з'ясовано, що рідкий азот можна подавати у воду об'єкту, який продувається, та, якщо виконувати відповідні технічні умови, крига на елементах газифікатора не створюватиметься.

Висновки. Рідкий азот є ефективним, нешкідливим, інертним, легко газифікується та одним із найдешевших засобів створення позитивної плавучості для затонуваних об'єктів. Можливі різноманітні типи установок використання рідкого азоту для суднопідймання залежно від конкретних поставлених задач. Крига, яка утворюється на трубопроводі-газифікаторі, загалом не впливає на хід суднопідймальної операції. Як ефективний засіб підігрівання рідкого азоту в криогенному газифікаторі можна використовувати забортну воду, використовуючи для поставлених цілей до 47% теплоти фазового переходу води з рідкого у твердий стан. За відповідних умов можна безпосередньо подавати рідкий азот у воду об'єкту, який продувається, нехтуючи змерзненням води та створенням на виході трубопроводу пробок із криги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маринюк Б.Т., Руденко М.Ф., Угольникова М.А. Сооружение и защита морских буровых платформ методами низкотемпературных технологий. *Мор. интеллектуал. технологии*. 2018. № 4-4 (42). С. 236–241.
2. Руденко М.Ф., Маринюк Б.Т. Криогенные технологии для предотвращения риска возникновения чрезвычайных ситуаций на акватории бассейна Каспийского моря. *Глобальные тенденции рисков и приоритеты международного сотрудничества* : сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 22 сентября 2016 г. Москва : Изд-во ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. С. 19–26.
3. Маринюк Б.Т., Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Способ подъема металлических оболочковых объектов со дна моря. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2011. № 2. С. 39–42.
4. Руденко М.Ф., Маринюк Б.Т., Угольникова М.В. Криогенные технологии в добыче и транспортировке углеводородного сырья. *Нефть и газ*. 2015. № 5 (89). С. 91–100.
5. Маринюк Б.Т. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. Москва : Машиностроение 2015. 272 с.
6. Бараненко А.В., Бухарицын Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С. Холодильные машин. Санкт-Петербург : Политехника, 1997. 992 с.
7. Маринюк Б.Т., Руденко М.Ф., Бажинов С.И. Низкотемпературные технологии предотвращения аварийных выбросов нефти и газа при подводной добыче сырья на шельфе. *Хим. и нефтегазовое машиностроение*. 2011. № 3. С. 16–17.

REFERENCES

1. Marinyuk B.T., Rudenko M.F., Ugol'nikova M.A. (2018) “Sooruzhenie i zashchita morskikh burovyyh platform metodami nizkotemperaturnyyh tekhnologiy”, *Mor. intellektual. tekhnologii*. Vol. 4-4 (42), p. 236–241.
2. Rudenko M.F., Marinyuk B.T. (2016) “Kriogennyye tekhnologii dlya predotvrashcheniya riska vozniknoveniya chrezvychajnyh situatsiy na akvatorii bassejna Kaspijskogo moray”. *Globalnye tendentsii riskov i priority mezhdunarodnogo sotrudnichestva*. IFGBU VNII GOCHS (FC), p. 19–26.
3. Marinyuk B.T., Rudenko M.F., SHipulina YU.V. (2011) “Sposob pod`ema metallicheskih obolochkovyyh ob`ektov so dna moray”. *Vestn. Astrahan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. Vol. 2, p. 39–42.
4. Rudenko M.F., Marinyuk B.T., Ugolnikova M.V. (2015) “Kriogennyye tekhnologii v dobyche i transportirovke uglevodorodnogo syr'ya”. *Neft i gaz*. Vol. 5 (89), p. 91–100.
5. Marinyuk B.T. (2015) “Raschety teploobmena v apparatah i sistemah nizkotemperaturnoy tekhniki”. M.: Mashinostroenie, 272 p.
6. Baranenko A.V., Buharicyn N.N., Pekarev V.I., Sakun I.A., Timofeevskij L.S. (1997) *Holodilnye mashiny*. SPb.: Politekhnik, 992 p.
7. Marinyuk B.T., Rudenko M.F., Bazhinov S.I. (2011) “Nizkotemperaturnyye tekhnologii predotvrashcheniya avariynyh vybrosov nefti i gaza pri podvodnoy dobyche syr'ya na shel'fe”. *Him. i neftegazovoe mashinostroenie*. Vol. № 3. P. 16–17.