

УДК 621.646.4:536.242.001.5

*В. Т. Маринюк, М. Ф. Руденко, Ю. В. Шипулина***СПОСОБ ПОДЪЕМА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ОБЪЕКТОВ СО ДНА МОРЯ***V. T. Marinyuk, M. F. Rudenko, Yu. V. Shipulina***METHOD OF METAL SHELL-TYPE OBJECTS LIFTING
FROM THE SEA BOTTOM**

Рассматривается применение низкотемпературных технологий для подъема оболочковых объектов со дна водоемов. Анализируются рабочие вещества, используемые для намораживания льда: криогенные жидкости, углекислота и циклы рассольных холодильных машин. Приводится соотношение, связывающее теплофизические параметры воды, температуры охлаждаемой среды и фазового перехода, толщину и время процесса намораживания льда. Приводится график расчетных зависимостей и экспериментальных данных по намораживанию водного льда на плоской поверхности азотом. Даны рекомендации по применению тех или иных рабочих веществ в рамках низкотемпературных технологий подъема металлических оболочковых объектов со дна водоемов.

Ключевые слова: низкотемпературные технологии, сжиженный азот, углекислота, холодильные машины, водный лед, скорость намораживания.

The application of low-temperature technologies for shell-type objects lifting from the bottom of reservoirs is considered in the paper. The working substances used for ice making, such as cryogenic liquids, carbonic acid and cycles of brine refrigerating systems are analyzed. The ratio, connecting thermal and physical characteristics of water, temperature of the cooled environment and phase transition, thickness and time of the ice making process, is resulted. The diagram of rated dependences and experimental data of water ice making on a flat surface by nitrogen is shown. Some recommendations for the application of working substances are given in the frame of low-temperature technologies for shell-type objects lifting from the bottom of reservoirs.

Key words: low-temperature technologies, liquefied nitrogen, carbonic acid, refrigerating systems, water ice, speed of ice making.

На дне морей и природных водоемов находится большое количество оболочковых объектов, содержащих химические реагенты различного состава. Для России наиболее проблематичными являются прибрежные участки Балтийского, Черного и, в меньшей степени, Каспийского морей.

Степень коррозионного износа названных предметов различна, однако для стандартных стальных бочек с толщиной стенки около трех миллиметров предел пребывания в морской воде малой солености не превышает 70–80 лет. Превышение времени пребывания оболочкового устройства сверх этого срока может привести к разрушению стенки оболочки и попаданию содержимого в прибрежную среду, следствием которого может явиться ее загрязнение. Подводные течения могут распространить загрязнение по обширной территории, усложняя и удорожая работы по очистке водоема, поэтому работы по очистке водоемов от донных загрязнений целесообразно вести на стадии сохранения герметичности оболочковых объектов. Однако, в связи с сильной изношенностью стенки оболочки, не представляются возможными механический захват, подъем и их перевалка для утилизации. Мы рассматриваем возможность вместо механического захвата применить криозахват объекта, т. е. примораживание объекта с последующим подъемом и удалением со дна водоема. Ключевым вопросом здесь может явиться выбор источника холода для осуществления процесса примораживания.

В качестве такового следует рассмотреть использование сжиженного азота, твердой углекислоты и машинного холода с системой промежуточного хладоснабжения.

Жидкий азот является криопродуктом, тоннажное производство которого организовано на специализированных установках по разделению воздуха с усиленным холодопроизводящим циклом на основе центробежных турбодетандеров [1]. На крупных воздуходелительных установках низкого давления, предназначенных для получения технологического кислорода,

можно осуществлять отбор ограниченного количества жидкого азота (до двух тонн в сутки) без ущерба для технологического процесса. Сжиженный азот является инертной средой с весьма низкой температурой кипения при атмосферном давлении ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), он является нетоксичным и негорючим [2] и поэтому может рассматриваться как перспективный криоисточник при ведении подводных работ, в том числе и на больших глубинах. Газифицируя малую долю жидкости из резервуара-хранилища, можно быстро повысить давление внутри его, тем самым обеспечив противодавление окружающей резервуар воды. Ограничений в подъеме давления практически не существует, соответственно, можно погружать резервуар на километровую глубину. Таким образом, система получает полную автономность от надводной инфраструктуры. Схемное решение конструкции аппарата представлено на рис. 1.

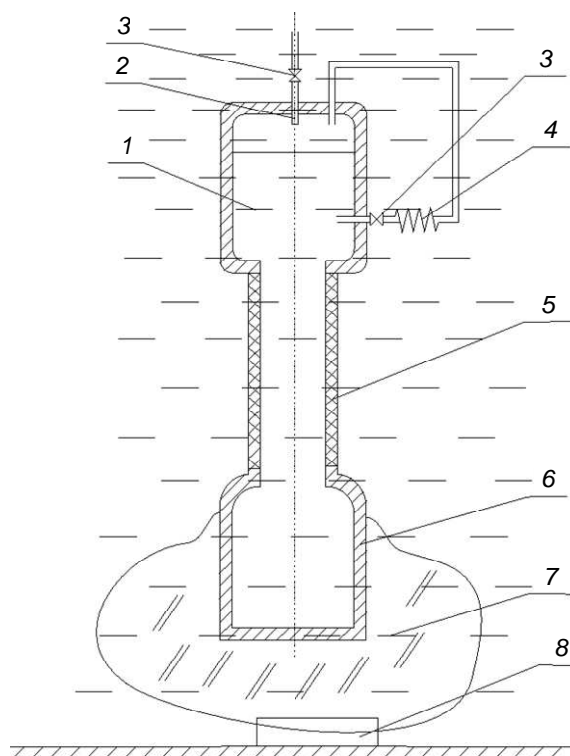


Рис. 1. Схема применения криозахвата: 1 – криорезервуар; 2 – труба сброса газа; 3 – вентиль сброса давления; 4 – испаритель подъема давления; 5 – теплоизоляция; 6 – криопакет; 7 – массив льда; 8 – объект криовоздействия

Современные системы хранения и транспортировки сжиженного азота позволяют вести доставку криопродукта в течение нескольких суток с минимальными потерями от испаряемости [3]. Тем не менее основным препятствием для применения данного вещества при криозахвате объектов со дна водоемов является высокий удельный расход на единицу массы поднимаемого груза (от 3 до 7 л) и высокая стоимость жидкого азота.

В этой связи интересно рассмотреть возможность применения *твердой углекислоты* (CO_2), стоимость которой существенно ниже. Твердая углекислота, как и сжиженный азот, является инертной средой, которая не оказывает вредного воздействия на окружающую среду. Температура сублимации диоксида из твердого состояния в газообразное составляет $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ при атмосферном давлении. Скрытая теплота сублимации при этом примерно в 3 раза выше, чем у сжиженного азота. Имея более высокую рабочую температуру, твердая углекислота обеспечит меньшие темпы намораживания водного льда по сравнению со сжиженным азотом, однако меньшая стоимость и более высокая доступность углекислоты позволяют считать её конкурентноспособной сжиженному азоту.

Системы парокомпрессионных источников холода могут представлять интерес для ведения работ на мелководном шельфе с глубиной до 50 метров. В холодильных установках парокомпрессионного типа можно рассчитывать на температуру кипения хладагента $-40\text{ }^\circ\text{C}$, т. к. более низкие значения температуры существенно усложняют схему, ее управление и регулирование подаваемой на объект холодильной мощности. Система охлаждения предполагает применение промежуточного хладоносителя и источников электроэнергии, расположенных на судне обеспечения. По сравнению с двумя предыдущими криоисточниками, машинное охлаждение уступает по темпу намораживания водного льда, является более затратным по стоимости самого оборудования и его обслуживания. Машинное охлаждение может быть целесообразным для работы с объектами массой в сотни килограммов, затопленными на мелководье.

Получены уравнения и зависимости по намораживанию льда с применением жидкого азота, которые демонстрируют целесообразность использования этого источника.

Известно, что водный лед является строительным материалом, который хорошо работает на сжатие. Предел прочности на сжатие у водного льда 1–7 МПа. Прочностные свойства льда зависят от температуры его образования и повышаются с понижением последней. Аналогичная зависимость прослеживается и для скорости роста толщины намораживаемого льда, которая увеличивается с понижением температуры стенки. Для плоской стенки, погруженной в пресную воду и охлаждаемой изнутри до криогенных температур, расчет толщины слоя намораживаемого льда ξ , с учетом переменности теплофизических свойств, может быть выполнен по соотношению [4]:

$$T_c = T_{\text{ф.п}} - T' \beta + \frac{(T')^2 \beta^2}{2 \cdot T_{\text{ф.п}}} - \frac{\rho \cdot 7,970 \cdot T_{\text{ф.п}}^2}{2 \cdot 615,34} \cdot \beta^3 \frac{T'}{2},$$

где $T' = \frac{\rho L \beta}{2 \lambda} + \frac{\alpha_w (T_w - T_{\text{ф.п}}) \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda}$; β – параметр роста толщины слоя льда ξ ; $\xi = \beta \cdot \sqrt{\tau}$ – плотность льда, кг/м^3 ; λ – теплопроводность льда, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; α_w – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности намораживаемого льда, для условий расчета $\alpha_w = 270 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; T_w , $T_{\text{ф.п}}$ – температура воды, омывающей лед, и температура фазового перехода воды при ее замерзании соответственно, $T_w = 285 \text{ К}$; $T_{\text{ф.п}} = 273 \text{ К}$; T_c – температура теплопередающей стенки, $T_c = 77 \text{ К}$. На рис. 2 представлена расчетная зависимость роста толщины слоя водного льда ξ от времени τ с учетом и без учета зависимости его теплофизических свойств от температуры.

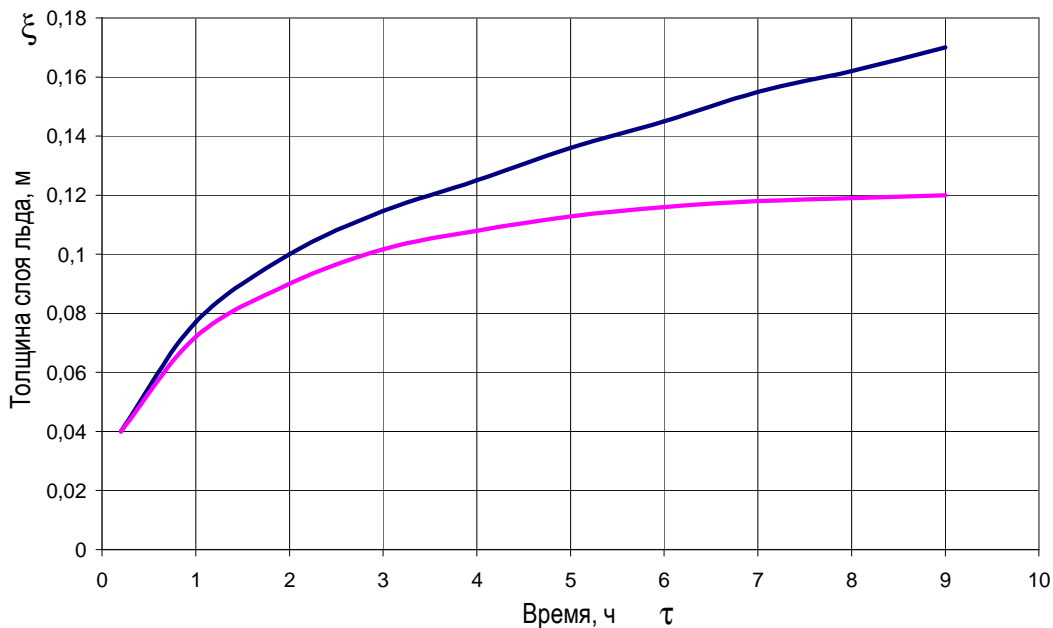


Рис. 2. Зависимость толщины слоя льда ξ от времени τ при охлаждении сниженным азотом

Как следует из графика, применение сжиженного азота позволяет наморозить массив из водного льда толщиной 150 мм за 5 часов [5].

Хранение сжиженного азота на судне можно осуществлять в танках-резервуарах с вакуумной теплоизоляцией с минимальными потерями от испарения. Резервуары с совершенной теплоизоляцией требуют минимальных переделок, обеспечивающих их погружение на требуемую глубину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криогенные системы* / А. М. Архаров, В. П. Беляков, Е. И. Микулин и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 536 с.
2. *Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ.* / С. Н. Богданов, С. И. Бурцев, О. П. Иванов, А. В. Куприянова / под ред. С. Н. Богданова. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1999. – 320 с.
3. *Маринюк Б. Т.* Теплообменные аппараты ТНТ. Конструктивные схемы и расчет. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 200 с.
4. *Маринюк Б. Т.* Вакуумно-холодильные испарительные установки, теплообменники и газификаторы техники низких температур. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 208 с.
5. *Маринюк Б. Т., Руденко М. Ф., Бажин С. И.* Низкотемпературные технологии предотвращения аварийных выбросов нефти и газа при подводной добыче сырья на шельфе водоемов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 16–17.

Статья поступила в редакцию 12.05.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринюк Борис Тимофеевич – Московский государственный университет инженерной экологии; д-р техн. наук, профессор кафедры «Криогенная техника»; тел.: 8 (499) 267-07-84.

Marinyuk Boris Timofeevich – Moscow State Technical University of Engineering Ecology; Doctor of Technical Science, Professor of the Department "Cryogenic Engineering"; tel. 8 (499) 267-07-84.

Руденко Михаил Фёдорович – Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и гидромеханика»; тел.: 8 (8512) 614-441, 614-226.

Rudenko Mikhail Fedorovich – Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Science, Professor; Head of the Department "Life Security and Hydromechanics"; tel. 8 (8512) 614-441, 614-226.

Шипулина Юлия Викторовна – Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и гидромеханика»; тел.: 8 (8512) 614-441.

Shipulina Yulia Victorovna – Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Science; Assistant Professor of the Department "Life Security and Hydromechanics"; tel. 8 (8512) 614-441.