

# СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-7-12  
УДК 504.5:621.56

## ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА МОРЕ И РЕКАХ ПРИ ДОБЫЧЕ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

*М. Ф. Руденко, Ю. В. Шипулина, А. М. Руденко*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматриваются химически опасные объекты морской и речной инфраструктуры (морские буровые и нефтедобывающие платформы; трубопроводы, по которым перегоняют жидкие и газообразные углеводородные топлива по дну моря и над землей; морские танкеры, транспортирующие нефть, мазут, газообразный и жидкий аммиак; береговые терминалы, принимающие и отгружающие углеводородное сырье, продукты перегонки; газодобывающие и нефтеперерабатывающие заводы; объекты хранения аварийно химически опасных веществ и др.). Предлагаются новые технологии борьбы с выбросами нефти при глубоководном бурении, безопасные способы транспортировки углеводородного сырья по подводным трубопроводам и на нефтеналивных танкерах. В основе этих технологий лежат способы применения низкотемпературных хладагентов и криогенных жидкостей. Рассматриваются способы применения машинного охлаждения с помощью каскадных холодильных установок на различных хладагентах; применения твердого диоксида углерода и жидкого азота. Жидкий азот с температурой кипения (минус 196 °С) имеет большую скорость замораживания морской воды и образует прочные ледяные слои на плоских и цилиндрических поверхностях. Приводятся примеры, основанные на экспериментальных данных, по определению скорости роста льда в воде при охлаждении жидким азотом различных конструкций. Представлена схема конструкции подводной криокуветы, состоящей из металлической панели с гнездами, теплоизолированных стаканов, резервуара для хранения жидкого азота, патрубка для залива криоагента, регулировочных рым-болтов, объекта для замораживания и транспортировки, предохранительного клапана. Подводная криокувета предназначена для работы с объектами бочкообразной конструкции. Экологическая безопасность транспортировки и добычи природного углеводородного сырья значительно улучшится при внедрении рассматриваемых новых технологий.

**Ключевые слова:** морские буровые установки, нефтеналивные танкеры, выбросы и утечки, жидкий азот, способ криозахвата.

**Для цитирования:** Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В., Руденко А. М. Применение низкотемпературных технологий для предотвращения аварийных ситуаций на море и реках при добыче, эксплуатации и транспортировке углеводородного сырья // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 7–12. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-7-12.

### **Введение**

На химически опасных объектах (ХОО) морской и речной инфраструктуры безопасность и безаварийность работы стоят на первом месте. Это связано не только с гибелью людей при возникновении взрывов и пожаров, но и с загрязнением окружающей среды химически опасными веществами. К ХОО относятся морские буровые и нефтедобывающие платформы; трубопроводы, транспортирующие жидкие и газообразные углеводородные топлива, как по дну моря, так и над землей; морские танкеры, перевозящие нефть, мазут, газообразный и жидкий аммиак; бе-

реговые терминалы, способные принимать и отгружать углеводородное сырье и продукты перегонки; нефтеперерабатывающие и газодобывающие заводы; объекты хранения аварийно химически опасных веществ и другие объекты.

Современные средства защиты способны эффективно снижать риски возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС). Однако временной фактор является решающим в вопросах ликвидации пожаров, разрывов трубопроводов, прекращения прорывов и утечек аварийно химически опасных веществ, резкого снижения температурного градиента поверхности конструктивной оболочки и т. д.

*Целью данного исследования* является разработка и рекомендации нового способа предупреждения и ликвидации последствий аварий и ЧС с помощью низкотемпературных и криогенных технологий на морях и реках [1–4].

Вышеуказанная цель достигается за счет решения следующих задач:

- изучение температурных и теплотехнических характеристик основных способов и рабочих веществ, используемых для внедрения криотехнологий при ликвидации разрывов подводных трубопроводов, прекращения утечек аварийно химически опасных веществ в море, ликвидации пожаров на морских объектах;
- исследование отдельных компонентов и приспособлений для предупреждения и осуществления работы в экстремальных условиях;
- создание и применение новых установок интеллектуальной собственности для работы на ХОО.

### **Материалы исследования**

Сущность низкотемпературных технологических способов борьбы с предупреждением и ликвидацией последствий аварий и ЧС на ХОО и транспорте заключается в создании таких отрицательных параметров (температур), при которых происходит резкое охлаждение и замораживание твердых и жидких веществ, превращение последних в твердое состояние с увеличением объема, в том, чтобы, формируя пробки, ледяные панцири, скорлупы, пластыри, захваты, создавать условия прекращения утечек, выбросов, разрушений основных конструкций работающих объектов.

В первую очередь следует рассмотреть машинное охлаждение. Современные каскадные и двухступенчатые схемы холодильных установок с винтовыми компрессорами и разными хладагентами (например, в нижней ступени – или пропан, или этилен, или синтетический фреон R22/R14, а в верхней ступени – или фреон R-404A/R507, или аммиак, или углекислый газ) способны создавать температуры до минус 75 °С. Скорость охлаждения и нарастание льда довольно низкие, однако время работы практически неограниченное. Системы имеют полную заводскую готовность, могут устанавливаться на различные стационарные и мобильные платформы, полностью автоматизированы, могут снабжаться аварийными датчиками включения и выключения. Такие установки с промежуточным теплоносителем, имеющие специальные приспособления, могут использоваться для быстрого замораживания жидких углеводородов, поддержания заданных режимов хранения горючих и взрывчатых веществ, создания низкотемпературных пенных завес и фонтанов. Особый интерес представляет использование таких систем на мелководье глубиной до 50 м [5].

Вторым способом осуществления снижения температур на ХОО можно рекомендовать применение твердой субстанции углекислоты (CO<sub>2</sub>). Температура сублимации из твердого состояния в газообразное – минус 79 °С при атмосферном давлении. Скрытая теплота сублимации примерно в три раза выше, чем у криогенных жидкостей. Более низкие температурные параметры, по сравнению с машинным охлаждением, позволяют увеличить скорость замораживания объектов охлаждения. Изготавливать твердую субстанцию углекислоты можно непосредственно машинным способом на объекте использования и хранения в накопительной емкости с хорошей изоляцией. Это приводит к некоторым неудобствам, зато применение возможно практически моментальное [6].

Третьим способом борьбы с авариями на воде и суше является использование криогенных жидкостей и, в первую очередь, жидкого азота. Сжиженный азот является криопродуктом инертным, имеющим температуру кипения при атмосферном давлении – минус 196 °С. Тоннажное производство жидкого азота осуществляется на воздухоразделительных установках с усиленным холодильным циклом с помощью центробежных турбодетандеров. Хранение жидкого азота осуществляется в специальных теплоизолированных танках [7].

Внедрение криотехнологий в водной среде связано, прежде всего, с требованиями прочности намораживаемого льда из морской воды. Из литературных источников известно, что прочность образования льда зависит от температуры его образования и может быть достигнута порядка 7–10 МПа. Если проводить армирование конструкций за счет металлических стержней, прутков, труб, крепежей, то прочность льда существенно увеличивается. Скорость перемещения замороженных масс воды значительно сказывается на толщине образования льда.

Техника криовоздействия зависит от формы замораживаемого объекта и от конструкции очага разрушения. Принципиально можно выделить два типичных случая: выброс с плоской поверхности, например при повреждении борта судна или стенки танкера, и выброс в объем, когда происходит разрыв трубы, по которой движется углеводородное сырье. В первом случае криовоздействие осуществляют на вытекающую в море жидкость снаружи, в воде в месте прорыва, используя криопластырь. Во втором случае на место прорыва заводится муфта, состоящая из разрезной царги, выполненной из медного листа, которая охватывает очаг выхода жидкости из трубы, ее крепление осуществляется поясными струбцинами, и охлаждение ведут по встроенным каналам путем подачи криопродукта.

Темп роста и время образования льда на металлической поверхности представлены на рис. 1.

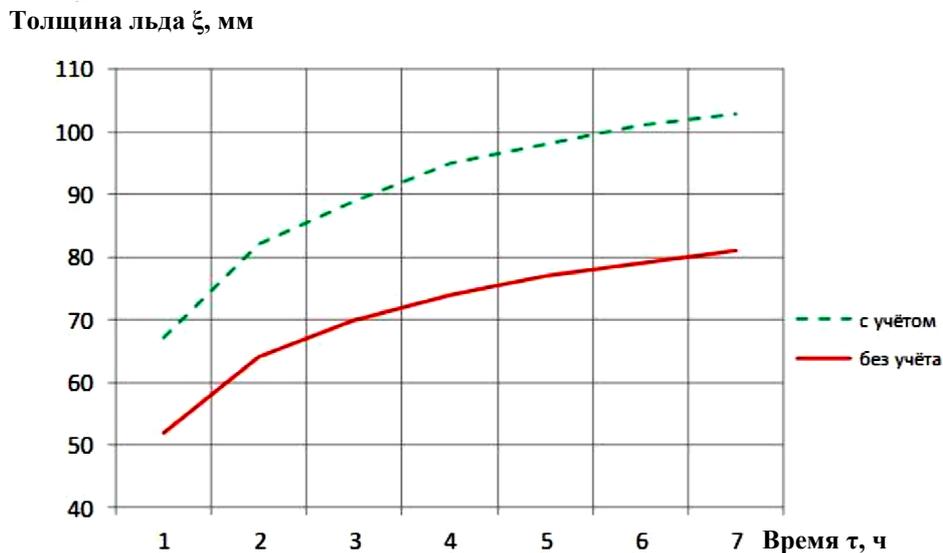


Рис. 1. График темпа роста толщины льда в воде при замораживании жидким азотом: с учетом и без учета изменения его теплофизических свойств от температуры

Для расчета времени образования льда необходимой прочности можно рекомендовать следующую расчетную формулу (без учета зависимости теплопроводности льда от температуры):

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

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

где  $T'$  – температурная производная профиля температур по координате толщины намораживаемого льда;  $T_w$  – температура воды;  $T_c$  – температура поверхности стенки;  $T_\phi$  – температура фазового перехода воды в лед;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности водного льда при температуре фазового перехода воды в лед;  $L$  – теплота фазового перехода воды в лед;  $\rho$  – плотность льда;  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи от воды;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – текущее время;  $r_0$  – параметр объекта.

Для расчета толщины слоя намораживаемого льда с учетом зависимости его теплопроводности от температуры используем уравнение вида

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

Толщина слоя льда в обоих случаях определяется по соотношению

$$\xi = \beta\sqrt{\tau}.$$

Для проведения подводных работ с жидким азотом профессором Б. Т. Маринюк и др. [3] были разработаны схемы конструкций различных подводных аппаратов, одна из которых (криокювета) представлена на рис. 2.

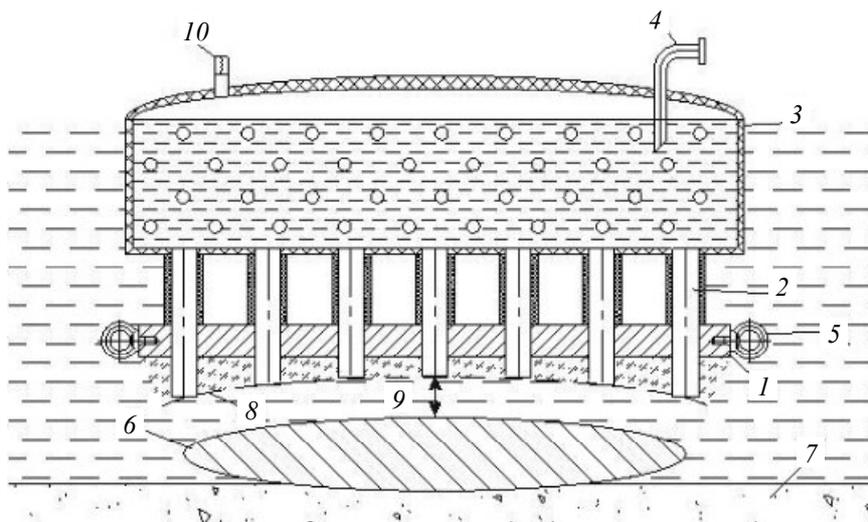


Рис. 2. Схема аппарата для проведения подводных работ – криокюветы:  
 1 – металлическая панель с гнездами; 2 – теплоизолированные стаканы;  
 3 – резервуар для хранения жидкого азота; 4 – патрубок для залива криоагента;  
 5 – регулировочные рым-болты; 6 – объект для замораживания и транспортировки;  
 7 – дно водоема; 8 – линия границы фронта фазового изменения;  
 9 – зазор для роста и намораживания льда; 10 – клапан предохранительный

Аппарат представляет собой теплоизоляционный резервуар-хранилище, заполненный жидким азотом и соединенный через цилиндрические стаканы и запорное устройство с металлической конструкцией матрицы, через которые осуществляется подача криоагента на объект замораживания. Давление в аппарате может регулироваться частичной газификацией жидкого азота. Попадая через технологический зазор, жидкий азот создает вокруг объекта замораживания скорлупообразную прочную ледяную стенку, которая примораживается к металлу. Криозахват настолько сильный, что теперь объект отделяется от дна вместе с криокюветой, может транспортироваться с глубины на поверхность водоема. Если есть утечки в трубопроводе, то криокювета может служить временным криопластырем, замораживая щели с вытекающим жидким углеводородным сырьем. Проводить подводные работы с криокюветой возможно, используя телерадиоуправляющие системы, в чистой воде можно рассмотреть и обследовать при освещении объект замораживания. Подводные автономные аппараты для проведения в море различного вида работ (обследование затонувших судов, резка конструкций, подъем малых объектов) в мировой практике существуют и совершенствуются, но использование для подъема криозахвата происходит впервые. Особенно это актуально в случаях, когда объект ржавый, способный при механической деформации развалиться, а внутри него – опасные химические вещества.

### Заключение

Таким образом, рассмотренные выше направления работ требуют исследования многих задач и вопросов, связанных с усовершенствованием применяемого оборудования, простотой управления и надежностью эксплуатации, мобильностью подводных работ, удобствами снабже-

ния, подачи и хранения криопродуктов и т. д. Однако первые шаги в этом направлении свидетельствуют о перспективности развития новых технологий в области решения экологических задач и сохранения мониторинга окружающей среды на воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринюк Б. Т., Руденко М. Ф., Угольников 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: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Астрахань, 22 сентября 1916 г.). М.: 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 // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2011. № 2. С. 39–42.
4. *Руденко М. Ф., Маринюк Б. Т., Угольников 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. М.: Машиностроение, 2015. 272 с.
6. *Бараненко А. В., Бухарицын Н. Н., Пекарев В. И., Сақун И. А., Тимофеевский Л. С.* Холодильные машины / под ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 1997. 992 с.
7. *Маринюк Б. Т., Руденко М. Ф., Бажин 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.

Статья поступила в редакцию 10.09.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Руденко Михаил Федорович* – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии; mf.rudenko@mail.ru.

*Шипулина Юлия Викторовна* – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии; aleera78@mail.ru.

*Руденко Александра Михайловна* – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; студент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; rudenko@astu.org.



USING LOW-TEMPERATURE TECHNOLOGIES  
TO PREVENT EMERGENCY SITUATIONS AT SEA  
AND RIVERS DURING EXTRACTION, PRODUCTION  
AND TRANSPORTATION OF HYDROCARBON RAW MATERIALS

*M. F. Rudenko, Yu. V. Shipulina, A. M. Rudenko*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The paper highlights the chemically hazardous objects of marine and river infrastructure: offshore drilling platforms and oil production platforms; pipelines transporting liquid and gaseous hydrocarbon fuels along the sea bottom and above the ground; marine tankers transporting oil, fuel oil, gaseous and liquid ammonia; coastal terminals handling and shipping hydrocarbon raw materials, distillation products; gas producing plants and oil refineries; storage facilities for chemically hazardous substances, etc. There are proposed new technologies for combating oil emissions during deep-water drilling, as well as for safe ways of transporting hydrocarbons through subsea

pipelines and by oil tankers. These technologies are based on the methods of using low-temperature freons and cryogenic liquids. There are considered the methods of using machine cooling technologies, where the cascade refrigeration units work on various refrigerants, as well as using solid carbon dioxide and liquid nitrogen. Liquid nitrogen having a low boiling point (about minus 196°C) has a higher rate of seawater freezing and forms stable ice layers on flat and cylindrical surfaces. There are given the examples of the experimental data to determine the growth rate of ice in the water frozen by liquid nitrogen. There has been given the chart of an underwater cryo-cuvette consisting of a metal panel with sockets, heat-insulated barrels, a tank for storing liquid nitrogen, a nozzle for filling the cryoagent, adjusting eyebolts, an object for freezing and transportation, and a safety valve. The underwater cryo-cuvette is designed to work with barrel-shaped objects. Environmental safety of transportation and production of natural hydrocarbon raw materials is significantly improved in the course of operation of the new technologies.

**Key words:** offshore rigs, oil tankers, emissions and leakages, liquid nitrogen, cryo-capture method.

**For citation:** Rudenko M. F., Shipulina Yu. V., Rudenko A. M. Using low-temperature technologies to prevent emergency situations at sea and rivers during extraction, production and transportation of hydrocarbon raw materials. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:7-12. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-7-12.

#### REFERENCES

1. Marinyuk B. T., Rudenko M. F., Ugol'nikova M. A. Sooruzhenie i zashchita morskikh burovyyh platform metodami nizkotemperaturnykh tekhnologiy [Construction and protection of offshore drilling platforms using low-temperature technologies]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4-4 (42), pp. 236-241.
2. Rudenko M. F., Marinyuk B. T. Kriogennyye tekhnologii dlya predotvrashcheniya riska vozniknoveniya chrezvychajnykh situatsiy na akvatorii bassejna Kaspijskogo morya. Global'nye tendentsii riskov i priority mezhdunarodnogo sotrudnichestva [Cryogenic technologies preventing risk of emergencies in the Caspian Sea basin. Global risk trends and international cooperation priorities]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Astrahan', 22 sentyabrya 1916 g.)*. Moscow, Izd-vo FGBU VNII GOCHS (FC), 2016. Pp. 19-26.
3. Marinyuk B. T., Rudenko M. F., Shipulina Yu. V. Sposob pod"ema metallicheskih obolochkovykh ob"ektov so dna morya [Method of lifting metal shell objects from sea bottom]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 2, pp. 39-42.
4. Rudenko M. F., Marinyuk B. T., Ugol'nikova M. V. Kriogennyye tekhnologii v dobyche i transportirovke uglevodorodnogo syr'ya [Cryogenic technologies in extraction and transportation of hydrocarbons]. *Neft' i gaz*, 2015, no. 5 (89), pp. 91-100.
5. Marinyuk B. T. *Raschety teploobmena v apparatah i sistemah nizkotemperaturnoy tekhniki* [Heat transfer calculations in apparatus and systems of low-temperature technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015. 272 p.
6. Baranenko A. V., Buharicyn N. N., Pekarev V. I., Sakun I. A., Timofeevskij L. S. *Holodil'nye mashiny* [Refrigerating machines]. Pod redakciej L. S. Timofeevskogo. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 1997. 992 p.
7. Marinyuk B. T., Rudenko M. F., Bazhinov S. I. Nizkotemperaturnyye tekhnologii predotvrashcheniya avarijnykh vybrosov nefi i gaza pri podvodnoj dobyche syr'ya na shel'fe [Low-temperature technologies for prevention of accidental oil and gas emissions during underwater extraction of raw materials]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2011, no. 3, pp. 16-17.

The article submitted to the editors 10.09.2019

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Rudenko Mikhail Fedorovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Vital Security and Engineering Ecology; mf.rudenko@mail.ru.

**Shipulina Yulia Victorovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Vital Security and Engineering Ecology; aleera78@mail.ru.

**Rudenko Alexandra Mikhailovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Student of the Department of Automated Systems of Data Processing and Management; rudenko@astu.org.

