



УДК 621.56

## ПРИМЕНЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РИСКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА РЕКАХ И МОРЯХ

### APPLICATION OF CRYOGENIC TECHNOLOGIES FOR PREVENTING THE RISK OF ENVIRONMENTAL POLLUTION ON RIVERS AND SEAS

**Руденко М.Ф.**Астраханский государственный технический университет  
id.yug2016@gmail.com**Маринюк Б.Т.**

Московский государственный политехнический университет

**Rudenko M.F.**Astrakhan State Technical University  
id.yug2016@gmail.com**Marinyuk B.T.**

Moscow State Polytechnic University

**Аннотация.** Рассмотрены новые перспективные технологии по способам борьбы с выбросами нефти при глубинном бурении на шельфах морей и океанов, безопасной транспортировки нефти по подводным трубопроводам и надводным транспортом, безопасные способы подъема бочкообразных контейнеров с химически опасными для экологии акватории окружающей водной среды веществами. В основе этих технологий лежат рекомендации по применению в качестве рабочих веществ известные способы и криогенные рабочие вещества. Рассматривается применение машинного способа с помощью холодильных установок на рабочих веществах: фреонах, углекислоты; непосредственное применение диоксида углерода и жидкого азота. Последний способ имеет ряд преимуществ. Имея низкую температуру кипения (минус 196 °С), жидкий азот обладает большой скоростью замораживания морской воды и образованием прочных ледяных слоев, как на плоских поверхностях, так и на цилиндрических. Приводятся рекомендации по хранению и использованию криоагентов на плавучих морских и речных производственных и транспортных установках. Приводятся рассуждения, основанные на собственных полученных экспериментальных данных и аналитических зависимостях по определению темпов роста толщины льда в воде при непосредственном охлаждении жидким азотом определенных металлических конструкций. Приводится схема конструкции криозахвата, для работы с объектами под водой бочкообразной конструкции. Разработка и внедрение рассматриваемых новых технологий позволит улучшить экологическую безопасность добычи и транспортировки природного углеводородного энергетического сырья.

**Ключевые слова:** морские буровые установки, выброс нефти, жидкий азот, толщина льда, бочкообразные контейнеры, метод криозахвата.

**Annotation.** New promising technology of oil leakage precluding during under water deep drilling on sea shelf, safe oil transportation by bottom laid pipelines, and on water supply of oil by tankers as well as safe lifting techniques barrel-shaped containers with chemicals ecology dangerous for aqua environment substances were considered. The basic conception of these technologies laid in application as a working fluids low temperature substances. Machine methods of water freezing with the help of refrigerating and cryogenic plants, operating with freons, carbon dioxide as refrigerants and direct cooling media such as liquid nitrogen and solid carbon dioxide were analyzed. The latter method has several advantages. Having a low boiling point (–196 °C), liquid nitrogen has a large rate of freezing of seawater forming of a stable ice layers on a solid surfaces (flat, cylindrical, spherical). The recommendations for the storage and use of cooling media on offshore sea platforms and floating tankers is laid. The paper presents the research conducted at the pilot plants as well as analytical equations giving of ice growth rate with time in water exposure, being freezed on a low temperature surface with direct cooling by liquid nitrogen. Development and implementation of new technologies under consideration would improve the safety of extraction and transportation of natural hydrocarbon raw energy fluids.

**Keywords:** sea drilling plants, oil leakage, liquid nitrogen, carbon dioxide, freons, ice growth rate, barrel-shaped containers, cryasticking method.

Учеными Астраханского государственного технического университета и Московского государственного политехнического университета разрабатываются новые технологии и способы, снижающие глобальные экологические риски возникновения чрезвычайных ситуаций и катастроф связанных с утечками и выбросами нефти при глубинном бурении на шельфах, транспортировки энергоносителей и попадании вредных ядовитых веществ в акватории морей и рек.

Развитие современных технологий добычи нефти и газа на шельфе морей и океанов позволяет вести бурение на глубине до 1500 метров с морских буровых платформ имеющих высокую степень автономности.

Как показала практика их эксплуатации, необходимым является комплекс мероприятий, обеспечивающих защиту водной среды от техногенных аварий, связанных с нарушением цельности нефтяного ствола буровой платформы и произвольным вытеканием сырья в водную среду. Прорыв



сырой нефти в водную среду может произойти из-за разрушения самой платформы (пожар, взрыв, возникновение высокой приливной волны во время сильного ветра или землетрясений) [1].

В любом случае последствие таких катастроф неизбежно приводит к тяжелым экологическим потрясениям, что наблюдалось в Мексиканском заливе (2013 год). Проблема быстрой ликвидации выбросов нефти в море на добывающих платформах актуальна и в бассейне Каспийского моря, где идет масштабная добыча этого энергоносителя. Разлив нефти в таких местах может иметь не менее катастрофические последствия для природы с учетом закрытости Каспия и нахождения по близости устья рек Волги и Урала с орнитологическими заповедниками и зонами нереста ценных пород промысловых рыб.

Новым способом борьбы с выбросами нефти и газа из глубинных подводных скважин морей может являться внедрение низкотемпературной технологии (криотехнологий) замораживания скважины в точке выброса нефти.

При транспортировке жидких углеводородов морским транспортом или в трубах по дну моря могут возникнуть повреждения судна или трубопровода с последующим проникновением содержимого танков и нефти в водную среду. В обоих случаях важнейшим является временный фактор ликвидации аварийной ситуации.

Современная техника низких температур позволяет в кратчайший временной интервал перекрыть канал выброса жидкого сырья и сохранить водную среду от загрязнений, равно как и осуществить быстрое и эффективное тушение пожаров на объектах добычи или транспортировки углеводородов.

Авторами рассмотрены теплофизические аспекты проблемы, предложены уравнения, решение которых позволяет оценить темп образования криоосадка из льда на охлаждаемой поверхности плоской и цилиндрической стенки, в том числе с учетом зависимости коэффициента теплопроводности льда от температуры, который необходим при высоких градиентах температур [2].

Выполнение технических операций в водной среде с применением криотехнологий выдвигает требование прочности намораживаемого водного льда. Из отечественных и зарубежных литературных источников известно, что при снижении температуры образование льда, его прочность увеличивается и может достигать 7–10 МПа. Армирование массива водного льда может существенно повысить его прочность. В качестве арматуры можно использовать элементы конструкций, ребра, прутки, крепежные устройства.

Заметим, что массивы льда большой толщины получаются при меньшей скорости перемещения масс замораживаемой воды. Поэтому при ведении процесса следует принять меры к подавлению местных течений и циркуляции в области очага выброса сырья.

Техника осуществления криовоздействия зависит от вида объекта, на котором произошла авария и конструкции очага разрушения.

Принципиально можно рассматривать два случая: когда выброс осуществляется в результате повреждения борта судна и стенки танка и когда произошел прорыв трубы по которой происходит подача сырья в накопитель (например, на буровой платформе).

В первом случае целесообразно осуществлять криовоздействие на вытекающую в море жидкость изнутри в воде в месте прорыва используя криопластырь.

Во втором случае, в зависимости от конкретной ситуации, на место прорыва заводится муфта, представляющая разрезную царгу, выполненную из медного листа, которая охватывает очаг выхода жидкости из трубы, крепление устройства осуществляют поясными струбцинами. Охлаждение ведут путем подачи криопродукта по встроенным каналам.

В качестве жидкого криопродукта для ведения процесса замораживания целесообразно использовать жидкий азот с температурой кипения при атмосферном давлении 77 К.

Наиболее сложным в техническом плане является доставка криопродукта на объект, как правило, расположенный вдали от источников его производства, которое сосредоточено в основном на металлургических производствах при помощи воздухоразделительных установок ВРУ большой производительности. Доставка жидкого азота, например, из Волгограда на шельф Каспийского моря займет много времени и станет высокочрезвычайно затратным делом. Поэтому предлагается вести производство, накопление и хранение жидкого азота на платформах добычи жидких углеводородов [3].

Существующий парк криогенного оборудования позволяет вести получение жидкого азота на месте его потребления с помощью криогенно-газовых машин (КГМ), работающих по обратимому циклу Стирлинга и используемых газообразный гелий в качестве рабочего вещества. Для получения жидкого азота криогенно-газовая машина должна быть снабжена колонкой для разделения воздуха. Такой агрегат компактен и его производительность может достигнуть 100–500 л/час жидкого азота. Наибольшей по производительности является установка модели «Д», выпускаемая мощность электродвигателя составляет 280 кВт, общая масса КГМ без колонны разделения 7000 кг.

Для начала производства жидкого азота требуется силовая электроэнергия и вода для охлаждения рубашки компрессора.

Понятно, что помимо КГМ для работы системы защиты от выброса жидких углеводородов требуется резервуар-накопитель жидкого азота, вместимостью 5–8 куб.м. Содержащийся в резервуаре азот может



быть использован и для тушения локальных пожаров на платформе или на борту танкера. По мере расхода жидкого азота из резервуара он должен пополняться жидкостью за счет работы КГМ.

Соотношение производительности КГМ по жидкому азоту и вместимостью резервуара таково, что чем больше вместимость резервуара, тем меньше производительность КГМ, однако в условиях работы платформы на морском шельфе минимальная производительность должна составлять 50 л/час.

Другой задачей, которую можно решать с помощью криогенных технологий, является подъем и транспортировка металлических бочкообразных объектов с нефтехимической продукцией со дна водоемов.

На дне морей и природных водоемов могут находиться оболочковые объекты (бочки, цистерны, ресивера, элементы аппаратов, затонувшие корпуса танкеров, больших и малых емкостей и т.д.), содержащих нефтяную продукцию и химические реагенты различного состава.

Степень коррозионного износа таких предметов различна, однако для стандартных стальных бочек с толщиной стенки около трех миллиметров предел пребывания в морской воде малой солёности 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 с опасностями загрязнения ее. 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. В связи с сильной изношенности стенки оболочки не представляется возможным механический захват, подъем и перевалку их для утилизации. Авторам статьи представляется возможным вместо механического захвата применить криозахват объекта или попросту примораживание объекта с последующим подъемом и удалением со дна водоема. Ключевым вопросом здесь может явиться выбор источника холода для осуществления процесса примораживания.

В качестве такого опять 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. На крупных воздухо-разделительных установках (ВРУ) низкого давления, предназначенных для получения технологического кислорода можно осуществлять отбор ограниченного количества жидкого азота (до двух тонн в сутки) без ущерба для работы технологического процесса. Сжиженный азот является инертной средой с весьма низкой температурой кипения при атмосферном давлении ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), он является не токсичным и не горючим, поэтому может рассматриваться как перспективный криоисточник для применения 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 противодействие 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.

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

В этой связи, интересным представляется рассмотреть применение твердой углекислоты, 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  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$  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 с сжиженным азотом, однако меньшая стоимость и более высокая доступность углекислоты ( $\text{CO}_2$ ) позволяют рассматривать его как конкурентно способным сжиженному азоту.

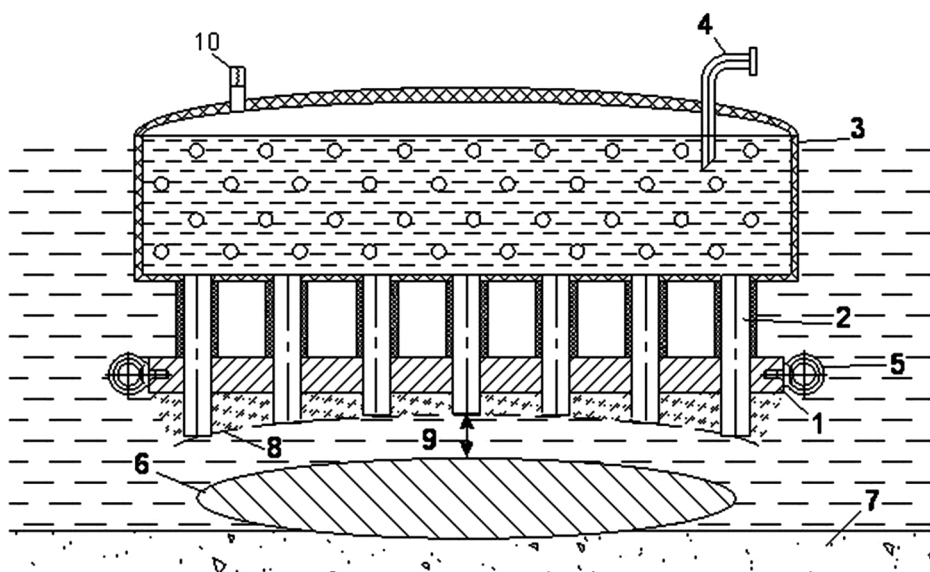
Системы пароконденсационных источников холода могут представлять интерес для ведения работ на мелководном шельфе с глубиной до 50 метров. В холодильных установках пароконденсационного типа можно рассчитывать на температуру кипения хладагента  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так как более низкие температуры 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 по объектам с массой в сотни килограмм затопленным на мелководье [4].



Водный лед является строительным материалом, который хорошо работает на сжатие. 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.

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 погружение их на требуемую глубину.

Для выполнения подводных работ по установке и испытанию платформ на шельфе, связанных с извлечением со дна металлических оболочковых объектов, механический захват которых, часто не представляется возможным по ряду причин, разработано устройство, способное вести криозахват предметов разнообразных форм, от плоской и трубчатой до сферической и волновой. Конструктивная схема криокуветы показана на рисунке.



**Рисунок** – Конструктивная схема криокуветы:

1 – металлическая матрица с перфорированными гнездами; 2 – цилиндрические стаканы с теплоизолированными стенками; 3 – резервуар-хранилище низкотемпературного энергоносителя; 4 – заправочный патрубок; 5 – рым-болты; 6 – корпус объекта; 7 – дно водного бассейна; 8 – раница фронта фазового превращения; 9 – технический зазор, подлежащий заполнению льдом; 10 – предохранительный клапан

Криокувета представляет собой металлическую матрицу, выполненную из теплопроводного материала и имеющую перфорированные гнезда по всей поверхности поля матрицы. В гнезда вставляются цилиндрические стаканы, верхняя часть которых теплоизолирована и переходит в сборник с низкотемпературной жидкостью и теплоизолированными стенками. Изменяя степень выдвигания стаканов 2 из матрицы 1 можно осуществить профилирование любой формы объекта, что необходимо для связывания всей его поверхности по средствам ледяного моста с криокуветой.

Использование такого устройства позволит вести работы дистанционно, без участия водолазных бригад, что существенно сокращает стоимость выполняемых работ.

Рассмотренные выше направления работ требуют проработки многих задач и вопросов, связанных с усовершенствованием, простотой эксплуатации, надежностью, мобильностью, удобством снабжения, обеспечения и хранения криопродукта и т.п.

Решение этих задач требует объединения совместных усилий ученых различных направлений, думаем, не безразличен вопрос об экологической защите бассейнов морей и рек. Вместе мы сделаем наши моря и реки самыми чистыми и безопасными.

#### Литература:

1. Маринюк Б.Т. Низкотемпературные технологии предотвращения аварийных выбросов нефти и газа при подводной добыче сырья на шельфе водоемов / Б.Т. Маринюк, С.И. Бажинов, М.Ф. Руденко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 16–17.
2. Руденко М.Ф. Способ подъема металлических оболочковых объектов со дна моря / М.Ф. Руденко, Б.Т. Маринюк, Ю.В. Шипулина // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2011. – № 2. – С. 39–42.
3. Руденко М.Ф. Криогенные технологии в нефтегазовые комплексы / М.Ф. Руденко, Б.Т. Маринюк, М.И. Угольникова // Казахстан. Нефть и газ. – 2015. – № 5(89). – С. 91–100.



4. Руденко М.Ф. Криогенные технологии для предотвращения риска возникновения чрезвычайных ситуаций на акватории бассейна Каспийского моря / М.Ф. Руденко, Б.Т. Маринюк // Междунар. науч.-практ. конф. «Глобальные тенденции рисков и приоритеты международного сотрудничества». 22 сентября 2016 года, Астрахань, Россия. – С. 19–26.

#### References:

1. Marinyuk B.T. Low-temperature technologies of prevention of emergency emissions of oil and gas at underwater extraction of raw materials on the shelf of reservoirs / B.T. Marinyuk, S.I. Bazhinov, M.F. Rudenko // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2011. – № 3. – P. 16–17.
2. Rudenko M.F. A way of raising of metal shell objects from a sea bottom / M.F. Rudenko, B.T. Marinyuk, Yu.V. Shipulina // Messenger of AGTU. Series: Marine facilities and technology. – 2011. – № 2. – P. 39–42.
3. Rudenko M.F. Cryogenic technologies in oil and gas complexes / M.F. Rudenko, B.T. Marinyuk, M.I. Ugolnikova // Kazakhstan. Oil and gas. – 2015. – № 5(89). – P. 91–100.
4. Rudenko M.F. Cryogenic technologies for prevention of risk of emergence of emergency situations on the water area of the basin of the Caspian Sea / M.F. Rudenko, B.T. Marinyuk // International scientific and practical conference «Global Tendencies of Risks and Priorities of the International Cooperation». On September 22, 2016, Astrakhan, Russia. – P. 19–26.