

На правах рукописи



**СОНИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**ПОДВОДНЫЙ РЕЗЕРВУАР ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЖИДКИХ  
УГЛЕВОДОРОДОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АРКТИЧЕСКОГО  
ШЕЛЬФА**

25.00.18 – Технология освоения морских месторождений  
полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Мансуров Марат Набиевич**.

Официальные оппоненты:

**Иванцова Светлана Георгиевна**, доктор технических наук, профессор кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина» (г. Москва);

**Лягова Анастасия Андреевна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры транспорта и хранения нефти и газа ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «ГОРНЫЙ» (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация – ФГБОУ ВО **Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова** (г. Архангельск).

Защита состоится «15» июня 2016 года в \_\_\_\_\_ час.

на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе Общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 142717, Московская обл., Ленинский район, пос. Развилка.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [http:// www.vniigaz.gazprom.ru](http://www.vniigaz.gazprom.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.г.-м.н.

Соловьев Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время разведанные запасы на шельфе Северного Ледовитого океана составляют приблизительно 25% всех мировых резервов углеводородного сырья. На континентальном шельфе Российской Федерации открыты богатейшие месторождения, с которыми связаны перспективы дальнейшего развития нефтяной промышленности страны.

Добыча углеводородов постепенно переносится из мелководных незамерзающих морей на акватории с весьма суровыми условиями природной среды, нередко расположенные в отдалении от обустроенных объектов береговой инфраструктуры. Сложный рельеф дна и большие глубины вызывают технологические трудности при прокладке подводных трубопроводов, количество отказов которых по существующим статистическим данным все еще остается высоким. Поэтому, в цепочке добычи, транспорта и хранения углеводородного сырья на море возникает необходимость использовать подводные резервуары как средства для временного накопления и выполнения технологических операций по загрузке в танкеры в максимально сжатые сроки.

Начало резервуаростроения в Российской Империи было положено в 1878г. академиком В.Г. Шуховым, а уже в начале XX века появились и первые проекты подводных нефтехранилищ, которые нашли широкое применение в период Второй мировой войны с целью хранения стратегических запасов горючего. Известно более сотни различных конструкций подводных резервуаров, разработанных в нашей стране и за рубежом.

Подводные нефтехранилища являются неотъемлемым технологическим звеном в составе комплексов подводного обустройства, применяемых на более чем 130 месторождениях в мире. В замерзающих районах Арктики, где навигационный период ограничен 3 – 4 месяцами и ледовая нагрузка весьма высока, они позволяют осуществлять разработку как в комплексе с гравитационными и плавучими платформами, так и подо льдом при полностью подводной схеме, без использования надводных конструкций. Такой подход сводит к минимуму потребность в обслуживающем персонале и значительно снижает вероятность возникновения происшествий по причине человеческого фактора, таких как авария на буровой платформе Бритиш Петролеум (BP) в Мексиканском заливе.

Важную роль подводные нефтехранилища играют в реализации концепции арктической подводной транспортной системы для загрузки полностью погруженных подводных судов и последующей подледной транспортировки углеводородов в бассейне Северного Ледовитого океана.

Таким образом, учитывая огромные запасы нефти, перспективу освоения крупных шельфовых месторождений с применением подводных добычных комплексов, а также реализацию Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники», сооружение подводных стационарных

нефтехранилищ с высоким уровнем эксплуатационной надежности и экологической безопасности является в настоящее время чрезвычайно важной и актуальной задачей для нефтегазовой отрасли России.

**Целью диссертационной работы** является разработка новой конструкции подводного резервуара для хранения жидких углеводородов на месторождениях арктического шельфа, обеспечивающей высокую эксплуатационную надежность и экологическую безопасность в экстремальных условиях природной среды.

### **Основные задачи исследований**

1. Анализ и систематизация конструкций российских и зарубежных подводных нефтехранилищ по основным критериям, влияющим на надежность и экологическую безопасность;

2. Разработка новой конструкции подводного резервуара для хранения жидких углеводородов, которая наиболее полно соответствует современным требованиям к несущей способности и экологической безопасности морских нефтегазовых сооружений в Арктике;

3. Определение массо – габаритных параметров подводного резервуара заданной емкости;

4. Обоснование реализуемости предложенной конструкции в промышленности и возможности эксплуатации резервуара в природно – географических условиях арктического шельфа.

### **Научная новизна**

– Автором выполнен сравнительный технико-технологический анализ и систематизация существующих в мире морских нефтехранилищ, что позволило сформулировать требования к выбору конструкции, в соответствии с которыми разработан оригинальный подводный резервуар, позволяющий обеспечить высокий уровень надежности и экологической безопасности хранения жидких углеводородов на месторождениях арктического шельфа.

– В результате проведенных исследований обоснована промышленная применимость предложенного научно-технического решения и возможность безопасной эксплуатации резервуара в суровых природно – климатических условиях Арктики. Разработаны и представлены предложения по дальнейшей оптимизации созданной конструкции с точки зрения сокращения капитальных затрат на строительство при сохранении высокого уровня экологической безопасности.

### **Практическая ценность**

Автором решена задача, имеющая существенное значение для морской нефтедобычи. Исследования, представленные в диссертационной работе, обосновывают возможность экологически безопасного применения разработанной автором оригинальной конструкции подводного нефтехранилища в экстремальных условиях природной среды арктического шельфа.

Научно обоснованное техническое решение может быть эффективно использовано при обустройстве нефтяных и нефтегазовых месторождений, как, например, Победа в Карском море.

### **Методы исследований**

Патентный и нормативный анализ существующих конструкций, расчетные методы механики сплошной среды, строительной механики, сопротивления материалов, материаловедения, современные методы математического моделирования и использование программного обеспечения при решении задач в нелинейной постановке.

### **Защищаемые положения**

1. Обоснование исходных технических требований к конструкции резервуара для подводного хранения жидких углеводородов в Арктике;

2. Концептуальный проект нового технического и технологического решения, представляющего собой оригинальную конструкцию подводного резервуара для хранения жидких углеводородов на месторождениях арктического шельфа, позволяющую обеспечить высокую эксплуатационную надежность и экологическую безопасность в экстремальных условиях природной среды;

3. Предложения по оптимизации разработанной конструкции для снижения капитальных затрат при строительстве с сохранением высокого уровня экологической безопасности.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, среди которых:

1. VI Научно – практическая конференция «Экологические проблемы XXI века» // Академия ГПС МЧС России, г. Москва, 2014;

2. Конгресс Российского нефтегазового саммита «Переработка, Транспортировка, Хранение» // Бизнес Динамикс, г. Москва, 2014;

3. Международная научно – практическая конференция «Наука и инновационные разработки – Северу» // МПТИ (ф) СВФУ, г. Мирный, 2014;

4. 68–я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2014» // РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, г. Москва, 2014;

5. 10–й Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть,

энергетика) // РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, г. Москва, 2013;

б. Международная научно – практическая конференция «Интеллектуальное месторождение: инновационные технологии от скважины до магистральной трубы» // ООО «НПФ «Нитпо»», г. Анапа, 2013.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ, а также 1 патент.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов, списка использованной литературы (144 источника) и приложения. Работа изложена на 100 страницах, включая 40 рисунков и 1 таблицу.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко рассмотрены перспективы применения подводных нефтехранилищ для хранения жидких углеводородов на месторождениях Арктического шельфа, на основе которых сформулирована актуальность темы диссертационной работы и задачи исследований.

**В первой главе** представлены результаты сравнительного технико-технологического анализа и систематизации 97 конструкций стационарных подводных резервуаров, запатентованных за период с начала XX века до настоящего времени в России, СССР, США, Великобритании, Норвегии, Франции, Германии, Швеции, Японии и Сингапуре. Представленные данные явились исходной информацией для разработки новой конструкции, созданной с учетом возможности эксплуатации на арктическом шельфе России.

В соответствии с принятыми критериями, влияющими на надежность и экологическую безопасность этих ответственных инженерных сооружений, подводные нефтехранилища разделены на следующие группы:

1) *По материалу изготовления: стальные, железобетонные, а также резиноканевые и полимерные.*

Более половины конструкций, рассмотренных в данном исследовании (52 нефтехранилища), были изготовлены из стали.

Одно из первых морских нефтехранилищ было разработано в Российской империи. Инженер В.В. Кириллов в 1906г. получил патент на плавающий резервуар, выполненный из стали, который удерживался на поверхности воды при помощи понтонов, прикрепленных к корпусу. Резервуар не имел дна, продукт хранился непосредственно на водяной подушке. Позднее свой вклад в развитие подводного резервуаростроения внесли такие ученые и инженеры, как Л.Н. Айрапетян, В.А. Бунчук, Д.К. Алекси, В.С. Минаков и др.

Вторым по масштабам использования материалом для подводных нефтехранищ является железобетон – 23 резервуара.

В последнее время в практике зарубежного подводного резервуаростроения стали широко использоваться резинотканевые и полимерные материалы, армированные стекловолокном. На их долю приходится 22 из 97 рассмотренных конструкций.

2) *По способу закрепления в проектном положении: под действием собственного веса, с помощью анкеров, с дополнительными пригрузами и якорями.*

Резервуары, которые закрепляются на дне без дополнительных элементов и средств, как правило, имеют значительный вес и изготавливаются из железобетона. Таким способом крепятся 27 хранилищ. Большинство же из рассмотренных конструкций (41 резервуар) принадлежат к другой группе, которые закрепляются в проектном положении с помощью пригрузов и якорей. Они обладают переменной плавучестью и предназначены, в основном, для установки на небольших глубинах в местах, где отсутствуют сильные подводные течения.

Закрепление с помощью анкеров имеют 29 из проанализированных в главе нефтехранилищ.

3) *По проектному положению относительно дна моря: донные (устанавливаемые на дне) и плавучие (с переменной плавучестью).*

Среди рассмотренных конструкций, 60 из 97 резервуаров являются донными, т.е. сохраняют свое проектное положение в течение всего периода эксплуатации неизменным. Резервуары данной группы, как правило, могут быть установлены на значительной глубине (более 300 м) и пригодны для хранения больших объемов нефти.

4) *По геометрической форме оболочек корпуса: цилиндрические, сферические, смешанной формы.*

Геометрическая форма оболочки корпуса влияет на несущую способность хранилища в период эксплуатации, а также определяет технологию установки конструкции в проектное положение под водой. Большинство резервуаров, спроектированных до 1980г., имели цилиндрическую форму (58 хранилищ), что приводило к значительным величинам напряжений от гидростатического давления воды и подводных течений, по сравнению с резервуарами, имеющими форму, например, усеченного конуса. Более того, большая величина возникающего опрокидывающего момента создает дополнительные сложности при погружении конструкции для установки в проектное положение.

5) *По наличию мягкой оболочки в корпусе конструкции: допускающие или исключаящие контакт нефти с морской водой.*

Большое количество из рассмотренных конструкций хранилищ (83 из 97) являются потенциальными источниками высокой экологической опасности, т.к. не герметичны и допускают контакт нефти с водой.

В диссертационной работе приведены конкретные примеры нефтехранилищ каждой группы со схемами и описанием.

**Во второй главе** исследованы основные преимущества использования подводных нефтехранилищ, а также обоснованы исходные технические требования к конструкции резервуара для подводного хранения жидких углеводородов в Арктике с учетом действующих нагрузок и воздействий.

Хранилище в составе нефтедобывающей платформы во многих случаях используют для создания балласта, поэтому откачиваемая из него нефть обычно замещается морской водой и наоборот, что неизбежно приводит к образованию слоя водонефтяной эмульсии.

На ранних этапах разработки месторождений часто применяют плавучие системы хранения и отгрузки нефти (ПСНХО), а также плавучие нефтехранилища (ПНХ). Данные конструкции характеризуются коротким периодом, необходимым для их мобилизации и демобилизации, часто снабжены дополнительными установками для сепарации и обезвоживания нефти.

ПСНХО и ПНХ подвержены воздействию неблагоприятных погодных условий, а их эксплуатация в северных арктических широтах существенно осложнена высокой ледовой нагрузкой. При этом существуют повышенные риски столкновения с подходящими для загрузки челночными танкерами и необходимость в постоянном вертолетном трафике для обслуживания в отдалении от берега.

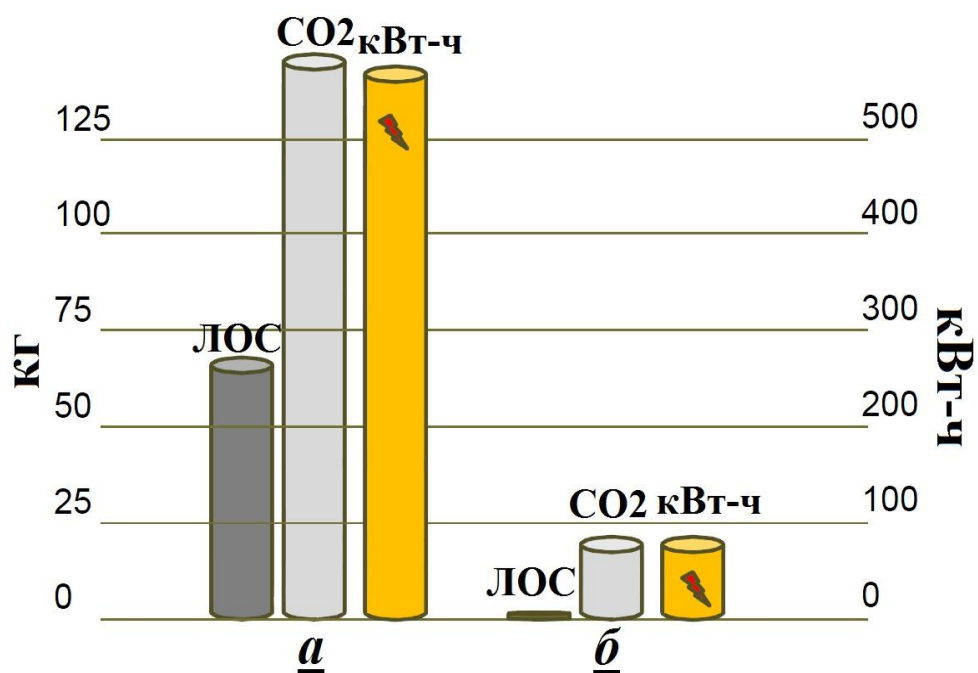
С экологической точки зрения эти конструкции значительно уступают полностью погруженным стационарным подводным нефтехранилищам ввиду загрязнения атмосферы. Так, для эксплуатации ПНХ в единицу времени требуется примерно в 5 раз больше энергии, чем для подводного резервуара аналогичной емкости, при этом, как следствие, прямо пропорционально возрастает и количество выбросов в атмосферу диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), а также летучих органических соединений (ЛОС) по сравнению с подводными нефтехранилищами, которые не сообщаются с атмосферой. На рисунке 1 представлены соотношения, полученные с учетом предположения, что среднее потребление дизеля 5000 литров в день, а при сжигании 1 литра генерируется 10 кВт – ч энергии, если КПД двигателя 25%.

Схема загрузки надводного танкера из нефтехранилища представлена на рисунке 2.

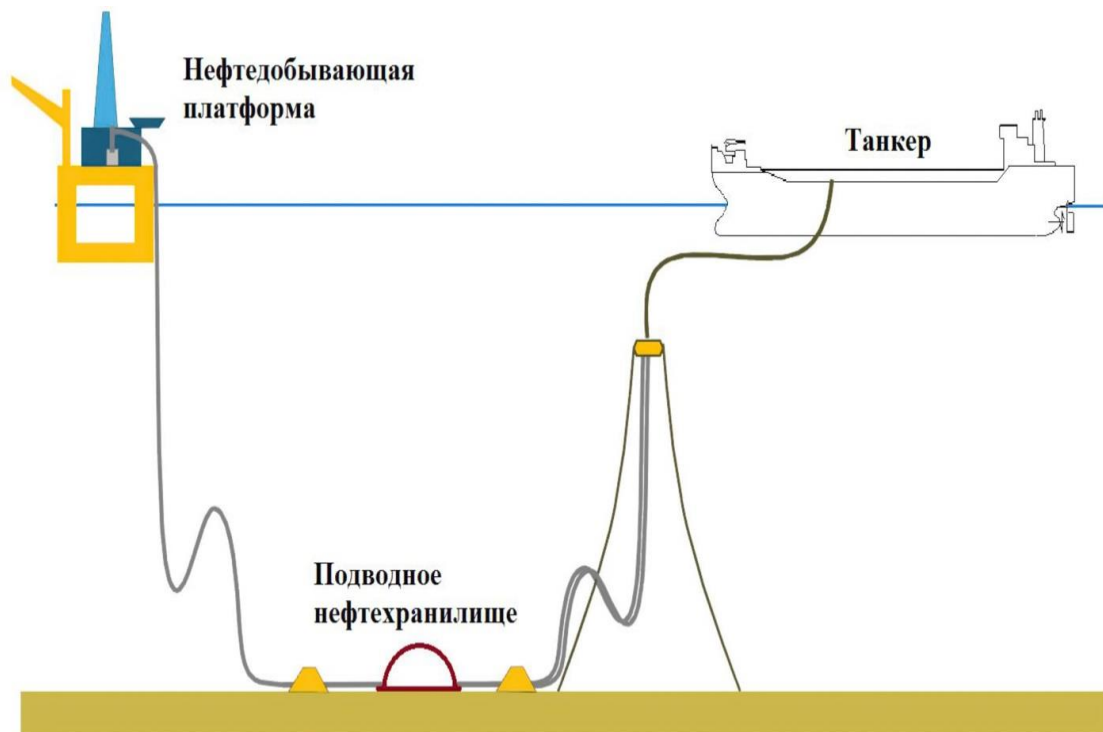
Проведенный анализ запатентованных конструкций подводных резервуаров для хранения жидких углеводородов (глава 1) позволил сформулировать следующие требования к конструкции для подводного хранения жидких углеводородов в Арктике:

- Конструкция резервуара должна исключать контакт продукта налива с морской водой. Вследствие контакта нефти с водой, внутри хранилища образуется нежелательный слой эмульсии, состоящий из нефти, воды и химикатов, имеющий тенденцию к увеличению толщины, что приводит к уменьшению полезной емкости хранилища. Это во многом позволит исключить потенциальный риск загрязнения морской среды нефтяными углеводородами;





*Рисунок 1. Сравнение выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub>, ЛОС и количества потребляемой энергии при эксплуатации ПНХ (а) и подводного резервуара (б)*



*Рисунок 2. Схема загрузки надводного танкера из стационарного подводного нефтехранилища*

- *В качестве материала оболочки хранилища может применяться сталь, железобетон или полиэфирный стеклопластик.* Сталь и железобетон традиционно используются в подобных сооружениях, методы и технология их производства хорошо изучены, и они доступны на внутреннем рынке. Полиэфирный стеклопластик еще не применялся для сооружений, имеющих значительные габариты, однако существующий опыт по производству конструкций из композитных материалов в России и мире говорит в пользу возможного применения таких материалов для нефтехранилищ;

- *Глубина моря для размещения стационарных нефтехранилищ* (как правило, более 60 м) должна исключать вероятность воздействия на оболочку потенциально возможных ледовых образований (айсбергов, торосов) и быть достаточной, чтобы конструкция не создавала помехи судоходству. Данное условие является очевидным преимуществом, т.к. позволяет избежать многих кратковременных и особых нагрузок, достигающих в некоторых случаях значительной величины;

- *Предпочтительные формы подводных резервуаров – сфера или полусфера.* Хотя оболочку резервуара можно изготовить практически любой геометрической формы, однако, при воздействии на конструкцию внешнего гидростатического давления морской воды, наиболее прочными и устойчивыми оказываются сферические формы. Сферическая оболочка, в сравнении с другими, например, с вертикальной цилиндрической, обладает низким коэффициентом лобового сопротивления при обтекании потоком жидкости, что позволяет минимизировать суммарную лобовую нагрузку в районах с подводными течениями значительной величины. Важно отметить, что конструкционная форма сооружения и его элементов может способствовать или препятствовать развитию опасных коррозионных процессов. Менее подвержены коррозии элементы простых конструктивных форм с наименьшей удельной поверхностью;

- *Технологии изготовления конструкции* должны обеспечить выполнение основных сборочных операций на берегу, чтобы минимизировать объем работ в открытом море со сложной ледовой обстановкой.

Выбор материала для изготовления подводного резервуара должен основываться на результатах проведенного технико – экономического анализа, учитывающего природно – климатические условия акватории, свойства продукта налива и уровень надежности конструкции. В этой связи можно отметить, что железобетон обеспечивает хорошую изоляцию, коррозионную защиту и имеет достаточную плотность, необходимую для обеспечения отрицательной плавучести. Недостатком этого материала является низкая трещиностойкость.

Оболочка из стали значительно легче железобетонной, поэтому резервуар будет иметь положительную плавучесть, что создает необходимость в применении надежных систем закрепления хранилища на дне в проектом положении. Сталь, обладая высокой прочностью, большей вязкостью, одинаково хорошо сопротивляется напряжениям всех видов, что делает

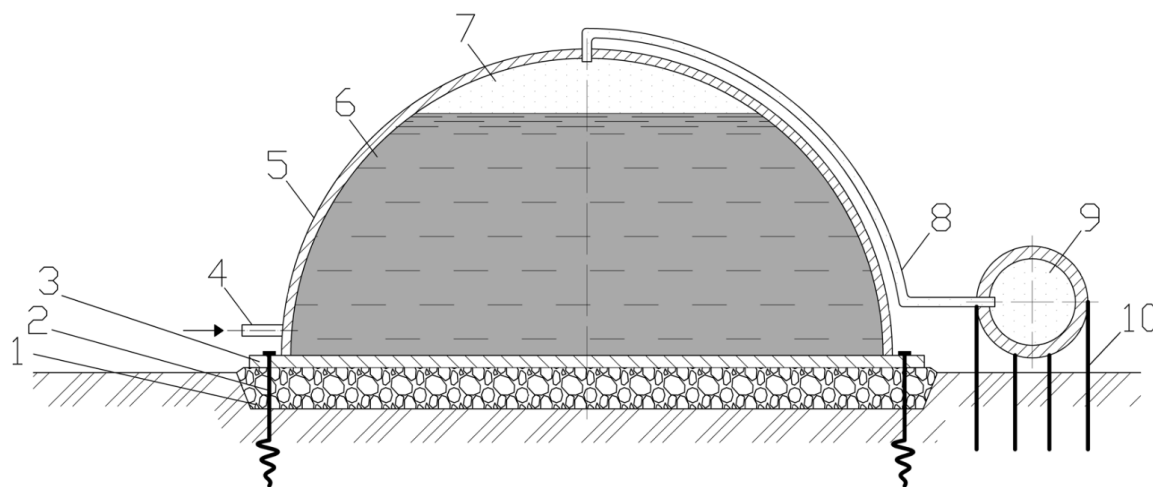
конструкции резервуаров из нее очень надежными. Такое хранилище требует хорошей термоизоляции и антикоррозийной защиты.

Оболочка из полиэфирного стеклопластика будет даже легче стальной, что потребует дополнительных средств для закрепления. Термоизоляционные свойства этого материала превосходят свойства стали, но уступают железобетону. Неоспоримым преимуществом являются хорошие прочностные характеристики и высокая стойкость к коррозионному разрушению.

Анализ особенностей эксплуатации подводных нефтехранилищ позволил автору разработать прочную и надежную конструкцию резервуара для установки на дне морского шельфа с учетом самого неблагоприятного сочетания существующих нагрузок и воздействий.

Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) был выдан патент на полезную модель «Подводное нефтехранилище» №133818 от 27.10.2013г., что подтверждает новизну и промышленную применимость разработанного и описанного в данном разделе технического решения. Общий вид резервуара представлен на рисунке 3.

Конструкция нового подводного нефтехранилища состоит из плоского стального днища 3 круглой формы и оболочки полусферического корпуса 5, жестко приваренной к днищу.



**Рисунок 3.** Схема разреза подводного нефтехранилища (1 – гравийное основание, 2 – анкерное устройство, 3 – днище; 4 – патрубок, 5 – корпус, 6 – продукт налива, 7 – газоздушная смесь, 8 – внешний газопровод, 9 – газосборник, 10 – сваи)

Днище нефтехранилища 3 покоится на предварительно выровненном гравийном основании морского дна и крепится по периферии анкерными устройствами 2. Таким способом обеспечивается устойчивое положение хранилища под воздействием подводных течений, исключается потеря несущей способности системы «резервуар – основание», опрокидывание, значительное размывание морского дна вблизи основания, чрезмерные смещения и тд.

Габариты и толщина стенки конструктивных элементов резервуара выбираются согласно расчету на прочность и устойчивость оболочки по предельным состояниям конструкции.

Для обеспечения процесса «больших» и «малых» дыханий при заполнении и опорожнении нефтехранилища рядом расположен газосборник 9, соединенный с корпусом 5 внешним газопроводом 8. Газосборник крепится с помощью свай 10 в грунте дна водоема и может быть заполнен азотом для повышения безопасности.

В зависимости от емкости нефтехранилища и несущей способности грунта, необходимо предусматривать установку кольцевого фундамента для уменьшения разницы осадок основания в центре и на периферии, а также повышения жесткости узла сопряжения стенки и днища.

Корпус оболочки 5 содержит патрубок 4 для герметичного заполнения нефтехранилища нефтепродуктом и патрубок для слива нефтепродукта из нефтехранилища под действием избыточного давления газа в газосборнике 9, который расположен за патрубком 4 на одном с ним уровне. Внутри нефтехранилища устанавливается контрольно – измерительное оборудование и хранится нефтепродукт 6, над зеркалом которого образуется газовоздушная смесь 7.

Чтобы установить резервуар в проектное подводное положение, необходимо преодолеть Архимедову силу. Для этого служат специальные пригрузы, с помощью которых конструкция плавно опускается на гравийное основание 1, и с помощью анкерных устройств 2, жестко закрепляется на гравийном основании 1. После этого пригрузы демонтируются.

Для управления технологическими процессами и обеспечения безопасных условий эксплуатации, предусматривается установка контрольно – измерительного оборудования с целью мониторинга работы хранилища, наблюдения за состоянием его конструктивных элементов с целью оценки их надежности, а также своевременного выявления дефектов и повышения уровня безопасности.

**В третьей главе** представлено определение массо – габаритных параметров подводного резервуара заданной емкости и проанализированы полученные результаты расчетов с целью обоснования реализуемости предложенной конструкции в промышленности и возможности ее эксплуатации в природно – географических условиях арктического шельфа.

Оболочка нефтехранилища относится к разряду тонких, в основу понятия которых положены допущения, имеющие вполне определенный физический смысл и очевидную преемственность от хорошо проверенной теории балок.

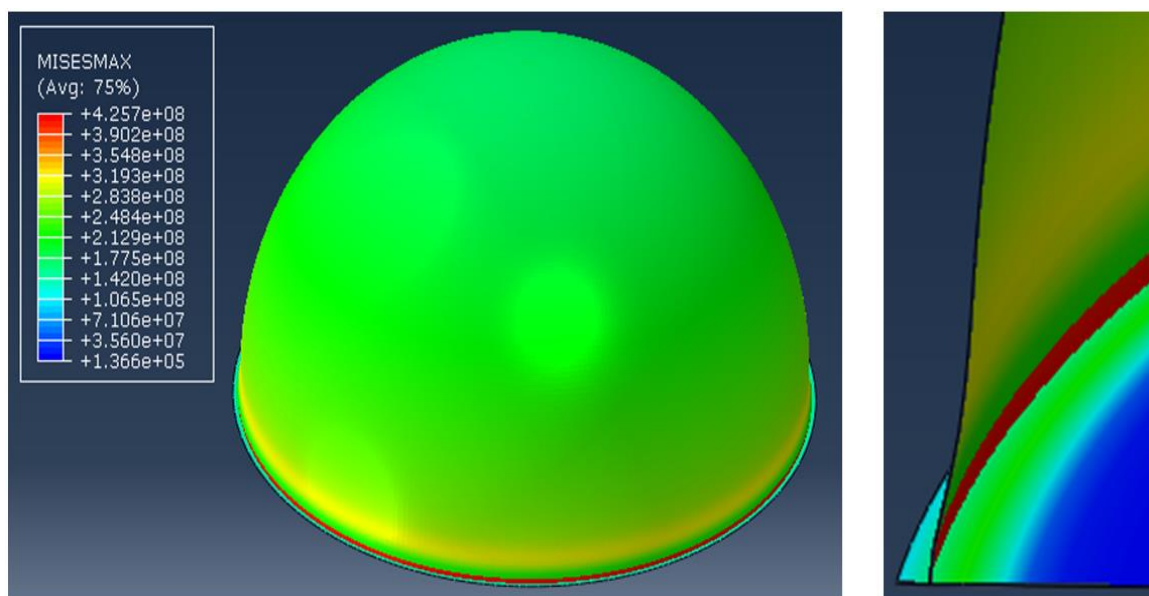
В соответствии с современными нормативными требованиями, приведенными в главе 2, определение компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) морских нефтегазовых сооружений рекомендуется выполнять численными способами по методу конечных элементов (МКЭ).

Для определения массо – габаритных параметров подводного резервуара заданной емкости с учетом выбранных исходных данных, был проведен численный расчет в апробированном программном комплексе ABAQUS: определен тип и размер задачи; составлена конечно – элементная модель конструкции и заданы граничные условия; смоделирована система «конструкция – морское дно» и приложенные нагрузки; проведена оценка корректности модели.

По конкретным условиям плавания в арктических морях, например, в Баренцевом и Карском, оптимальными являются танкеры дедвейтом 60 тыс. т. В связи с этим, было выбрано нефтехранилище с кратным дедвейту танкера объемом 123500 м<sup>3</sup>.

В качестве материала изготовления конструкции приемлема сталь, предпочтительно доступная для приобретения на внутреннем рынке страны. Такой является высокопрочная хладостойкая сталь F690W, разработки ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» для применения на объектах нефтегазового комплекса в арктических регионах. Сталь имеет повышенную сопротивляемость хрупкому разрушению; конструкции пригодны для эксплуатации при температурах до – 40<sup>0</sup>С, возможная толщина проката 8 – 150 мм, ширина листа 1.5 – 3.2 м, а длина 4.5 – 11.5 м.

Эпюры эквивалентных напряжений, полученные в результате расчета, представлены на рисунке 4. В расчете учитывалось наличие кольцевого фундамента, шириной 1 м.



*Рисунок 4. Эпюра распределения максимальных эквивалентных напряжений (по Мизесу), слева – корпус нефтехранилища, справа – уторный узел*

Расчетами установлено, что толщина стенки с учетом припуска на износ должна составить 73 мм при общей массе конструкции 82850 т.

Помимо исследования прочности тонкостенной оболочки подводного резервуара важной задачей является определение устойчивости, когда внутри нефтехранилища отсутствует нефтепродукт.

Потеря устойчивости полусферических оболочек обычно сопровождается выпучиванием, появлением либо одной быстро увеличивающейся вмятины, либо серии волн в кольцевом направлении. Критическую гидростатическую нагрузку, при которой возможно смятие тонкостенной оболочки корпуса резервуара, можно определить по методикам, разработанным А.С. Вольмиром. Для применения нефтехранилища на больших глубинах, необходимо принимать меры для повышения устойчивости конструкции.

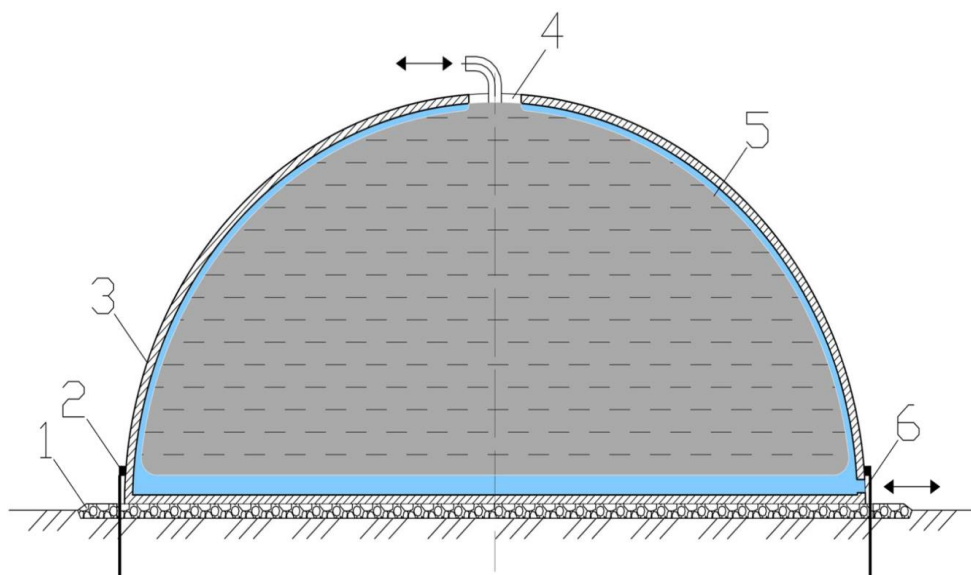
**В четвертой главе** изложены предложения по дальнейшей оптимизации разработанного хранилища с точки зрения сокращения капитальных затрат на строительство при сохранении высокого уровня экологической безопасности, а также ключевые моменты для оценки эксплуатационных параметров резервуара.

Как показало исследование НДС и определение массо – габаритных параметров конструкции, представленные в предыдущей главе, в самом неблагоприятном случае (когда нефтехранилище не заполнено нефтью) в уторном узле возникают напряжения значительной величины (рисунок 4). Чтобы их компенсировать требуется предусматривать значительную толщину стенки, а также ребра жесткости, что создает дополнительные технологические трудности при монтаже в специализированных сборочных цехах для сварки поясов купола большой толщины. Более того, в расчетах не учитывалась усталостная прочность, что очевидно, привело бы к дальнейшему увеличению толщины конструктивных элементов хранилища.

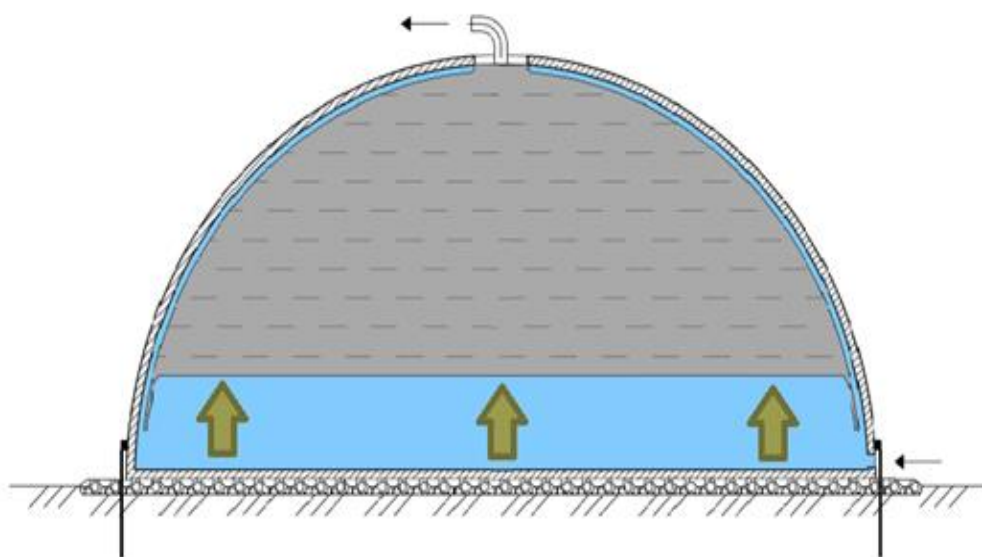
Поэтому возникает задача оптимизации представленного в главе 2 резервуара для устранения выявленных исследованием недостатков.

В результате проведенной работы предлагается оптимизированная модификация подводного нефтехранилища для хранения жидких углеводородов на месторождениях арктического шельфа, схема которого представлена на рисунке 5.

Для исключения значительных напряжений в полусферической оболочке предлагается установить эластичную мембрану (тканевую секцию) 5 с целью предотвращения контакта нефти и воды, а у основания резервуара по периметру предусмотреть отверстия 6, позволяющие морской воде проникать внутрь сооружения для выравнивания давления внутри и снаружи купола при заполнении и, аналогично, при опорожнении хранилища (рисунок 6). В каждое из таких отверстий необходимо установить фильтрующие элементы с целью предотвратить попадание посторонних предметов внутрь хранилища.



**Рисунок 5.** Схема разреза оптимизированного подводного нефтехранилища (1 – гравийное основание, 2 – анкерное устройство, 3 – оболочка внешнего корпуса (купол), 4 – съемный элемент для слива/налива резервуара с контрольно – измерительным оборудованием, 5 – мягкая оболочка для налива нефти, 6 – отверстие для впуска/выпуска морской воды)



**Рисунок 6.** Схема опорожнения подводного нефтехранилища

Мембрана представляет собой единое целое со съемным элементом 4, что позволяет, при необходимости, в кратчайшие сроки выполнить ее замену. Здесь же находится и узел подключения внешней трубной обвязки для слива/налива нефти. Такое решение позволяет значительно снизить толщину стенки корпуса резервуара 3, исключает необходимость в газосборнике 10 (рисунок 3), упрощает процесс изготовления и снижает капитальные и операционные затраты, сохраняя при этом высокий уровень экологической безопасности

нефтехранилища. Резервуар устанавливается на предварительно подготовленное основание 1 из уплотненной мелкой гальки и закрепляется в проектном положении при помощи анкеров 2.

Между мембраной 5 и защитным корпусом 3 предусматривается некоторое свободное пространство, заполняемое водой для снижения трения тканевой поверхности о стенку резервуара при заполнении/опорожнении хранилища. Такое же пространство, как показано на рисунке 5, необходимо предусмотреть между днищем резервуара и тканевой оболочкой для обеспечения равномерности заполнения хранилища морской водой и снижения трения, как и в предыдущем случае. Фактический размер данных зон определяется исходя из особенностей выбранного материала для изготовления тканевой секции и емкости нефтехранилища.

Исходя из производственно – технических условий изготовления купола 3, он может представлять собой как сегмент сферы, так и состоять из полусферической части и цилиндра.

Для изготовления такой конструкции возможно использовать сравнительно дешевую хладостойкую сталь, например, F460W толщиной 7,5 мм.

Вес шести нефтехранилищ суммарным объемом 120000 м<sup>3</sup> (20000 м<sup>3</sup> каждое) составляет всего 2189.48 т, что меньше примерно в 38 раз, чем в случае до оптимизации.

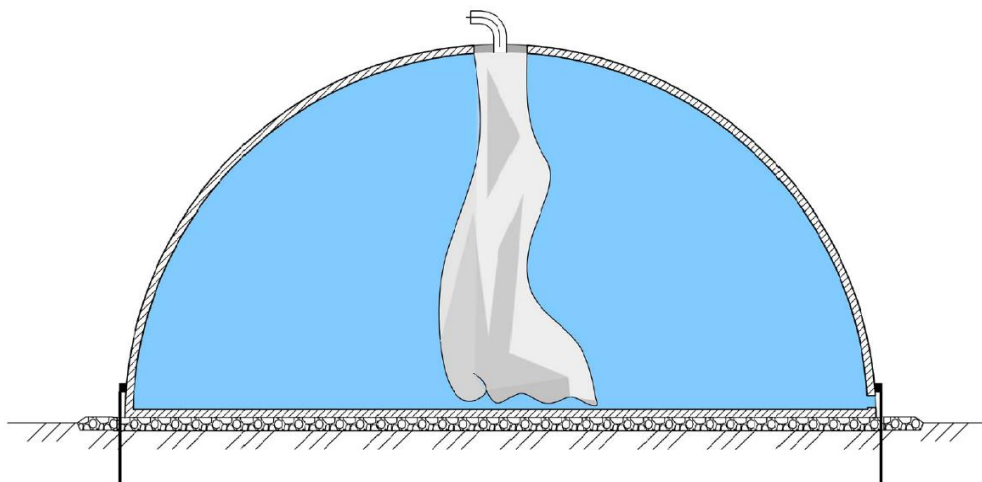
Исследование плавучести резервуара показало, что максимальную положительную плавучесть 2688.98 т он будет иметь в случае, когда полностью заполнен нефтью. Компенсировать силу всплытия можно пригрузами, или более надежным способом – установкой по периметру основания анкеров.

Гибкая мембрана должна обладать высокой химической стойкостью при хранении такой агрессивной среды, как сырая нефть под воздействием внешнего давления и переменной температуры. Прототипом для подобных конструктивных элементов служат гибкие резервуары, широко применяемые во всем мире с целью ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН), усиленные дополнительными полимерными слоями для повышения усталостной прочности при существующих циклических нагрузках.

В случае, если в результате чрезвычайной ситуации произойдет разрыв мембраны, нефть, будучи легче воды, будет подниматься вверх к куполу конструкции. Поэтому в технологическом узле устанавливаются датчики для контроля содержания нефти внутри стальной защитной оболочки. Информация с таких датчиков передается на пульт управления в диспетчерскую и служит сигналом к автоматизированному закрытию задвижки, расположенной на патрубке для заполнения морской водой извне, а также приводит к остановке насосного оборудования. Таким образом обеспечивается полная герметичность нефтехранилища и предотвращается утечка нефти в акваторию. После откачки образовавшейся в результате утечки нефтесодержащей воды из резервуара, выполняется замена гибкой мембраны. Схема подводного хранилища с



установленной гибкой мембраной до заполнения нефтью представлена на рисунке 7.



**Рисунок 7.** *Схема подводного хранилища с установленной гибкой мембраной до заполнения нефтью*

Все контрольно – измерительное оборудование, которое устанавливается на съемном элементе 4 (рисунок 5), должно быть сделано дистанционно – управляемым в составе автоматизированной системы управления и безопасности, а также быть интегрированным в систему диспетчерского управления и сбора данных (SCADA). Главным образом, требуется контролировать такие параметры, как: скорость заполнения; уровень продукта налива, с помощью, например, акустических датчиков, смонтированных у основания защитного купола; температуру нефти внутри эластичной емкости для контроля образования асфальтено – смолистых и парафиновых отложений; содержание нефти между гибкой мембраной и внутренней оболочкой защитного корпуса.

Предлагаемая конструкция может применяться как в единичном варианте, так и в составе группы, образуя подводный резервуарный парк. Различные месторождения требуют предусматривать различное количество таких нефтехранилищ. С технологической и экономической точки зрения предпочтительным является использование нескольких резервуаров емкостью до 20000 м<sup>3</sup>, т.к. при больших объемах возникает ряд проблем, ведущих к удорожанию за счет значительного увеличения толщины стенки хранилища, необходимости установки ребер жесткости, сложностей при изготовлении, транспортировке и т.д.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что с технико – экономической точки зрения рекомендуемым является применение оптимизированной конструкции подводного резервуара.

С точки зрения устойчивости, так как давление внутри и снаружи защитной оболочки будет уравновешено, оптимизированное нефтехранилище может быть использовано на любой глубине без ограничений, что является значительным преимуществом.

Отмечено, что благодаря низкой плотности тканевой оболочки, в верхней части тонкостенного защитного купола критерии прочности и устойчивости будут соблюдаться, если мембрана 5 вместе со съемным элементом 4 (рисунок 5) будет устанавливаться после погружения хранилища в проектное положение и заполнения водой.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Учитывая перспективу освоения крупных шельфовых месторождений, сооружение экологически безопасных подводных стационарных нефтехранилищ с высоким уровнем эксплуатационной надежности позволит эффективно решить задачу накопления и временного хранения углеводородов для выполнения технологических операций по загрузке в подводные и надводные танкеры в максимально сжатые сроки;

2. Проведенный анализ современных конструкций российских и зарубежных подводных резервуаров показал, что многие из них не удовлетворяют современным требованиям к экологической безопасности, поэтому в настоящее время весьма остро стоит задача разработки оптимальных подводных нефтехранилищ, удовлетворяющих этим критериям;

3. При разработке надежной конструкции подводного нефтехранилища с высоким уровнем экологической безопасности следует принимать во внимание все особенности эксплуатации подводного резервуара в шельфовых зонах и определить его оптимальную конструкционную форму на основе расчета на прочность по предельным состояниям при самом неблагоприятном сочетании нагрузок и воздействий;

4. На основе анализа существующих хранилищ, разработана и запатентована новая конструкция подводного резервуара, обеспечивающая высокую надежность и экологическую безопасность при длительной эксплуатации на шельфе арктических морей;

5. Исходя из принятых условий применения, определены основные массо – габаритные характеристики предлагаемого гидротехнического сооружения, а также проанализированы полученные результаты расчетов с целью обоснования реализуемости предложенной конструкции в промышленности и возможности ее эксплуатации в природно – географических условиях арктического шельфа.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Сонин, М.С. Методология оценки надежности конструкций подводных резервуаров / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2013. — № 2. — С. 27 – 29.
2. Сонин, М.С. Методика расчета на прочность днища подводного резервуара / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2013. — № 3. — С. 30 – 31.
3. Сонин, М.С. Методика расчета подводного резервуара по моментной теории / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2013. — № 4. — С. 39 – 40.
4. Сонин, М.С. Процесс загрязнения акватории при утечке нефтепродуктов из подводных нефтехранилищ / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2014. — № 2. — С. 43 – 55.
5. Сонин, М.С. Разработка оптимальной конструкции подводного нефтехранилища по критериям эксплуатационной надежности и экологической безопасности / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2014. — № 1. — С. 49 – 51.

### *В прочих изданиях:*

1. Сонин, М.С. Использование газосборников для заправки танкеров нефтепродуктом из подводных нефтехранилищ / М.С. Сонин // Тезисы докладов 10 – й Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика). — Москва: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2013. — С. 120.
2. Сонин, М.С. Метод оценки экологической опасности загрязнения морской воды при утечки нефтепродуктов из подводных нефтехранилищ / М.С. Сонин // Материалы VI Научно – практической конференции «Экологические проблемы XXI века». – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2014. — С. 69.
3. Сонин, М.С., Шутов В.Е. Обеспечение экологической безопасности хранения нефтепродуктов в подводных резервуарах при освоении месторождений арктического шельфа / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Тезисы международной научно – практической конференции «Наука и инновационные разработки – Северу». — Москва: Издательство «Перо», 2014. — С. 167 – 168.
4. Сонин, М.С. Критический анализ подводных нефтехранилищ с целью создания надежной и экологически безопасной конструкции / М.С. Сонин // Тезисы докладов 68-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2014». — Москва: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2014. — С. 305.

5. Сонин, М.С. Перспективы применения подводных нефтехранилищ на месторождениях арктического шельфа / М.С. Сонин, М.Н. Мансуров // НефтегазРу (Neftegaz.ru). — 2015. — № 7 – 8. — С. 14 – 17.

6. Сонин, М.С. Разработка надежной конструкции подводного нефтяного резервуара / М.С. Сонин, В.Е. Шутов // Сборник докладов Международной научно – практической конференции «Интеллектуальное месторождение: инновационные технологии от скважины до магистральной трубы». — Краснодар: ООО «Научно – производственная фирма «НИТПО»», 2013. — С. 140 – 142.

7. Сонин, М.С. Разработка оптимальной конструкции подводного нефтехранилища по критериям надежности и экологической безопасности / М.С. Сонин // Тезисы докладов конгресса Российского нефтегазового саммита «Переработка, Транспортировка, Хранение». — Москва: Бизнес Динамикс, 2014. — С. 42.

8. Пат. 133818 РФ, В 65D. Подводное нефтехранилище / М.С. Сонин (РФ). — № 2013126693/12; Заявлено 11.06.2013; Опубл. 27.10.2013.

Подписано к печати «11» апреля 2016 г.

Заказ № 4334

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд. л., ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

142717, Московская область,

Ленинский р-н, п. Развилка.