



**КАРАЕВ ИСМАТ ПАША ОГЛЫ**

**ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ОБУСТРОЙСТВА  
НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА МЕЛКОВОДНОМ ШЕЛЬФЕ  
АРКТИКИ (на примере месторождений Обской и Тазовской губ и  
прямальского шельфа)**

25.00.18 – Технология освоения морских месторождений полезных ископаемых  
по техническим наукам

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

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

**Люгай Дмитрий Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Евстафьев Илья Леонидович**, кандидат технических наук, начальник Управления геологии, Департамент добычи на шельфе ПАО «Газпром нефть».

**Ермаков Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

**Ведущая организация:** ООО «Красноярсгазпром нефтегазпроект»

Защита диссертации состоится «12» декабря 2018 г. в «13» часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, сельское поселение Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте <http://www.vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_»

201\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Д. Г.-М. Н.



Соловьев Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Российская Федерация обладает крупнейшим в мире континентальным шельфом с огромными запасами углеводородов, значительная часть которых приходится на арктические моря (на мелководном шельфе Карского моря в прибрежной части приамальского шельфа выявлены акваториальные продолжения уникальных по запасам месторождений суши Харасавэйского и Крузенштернского, а в акватории Обской и Тазовской губ - открыты газоконденсатные месторождения Каменномысское-море, Северо-Каменномысское, Обское, Чугорьяхинское, Семаковское, Тота-Яхинское, Антипаютинское). Отличием континентального шельфа российской Арктики является короткий межледовый период, средняя продолжительность которого не превышает 2-2,5 месяца. В отдельные холодные годы лед в некоторых арктических районах присутствует круглогодично, а многолетний лед достигает толщины до 3 м, что требует создания технических средств освоения месторождений нефти и газа с соответствующим ледовым классом ИМО (Международная морская организация) РС1 или РС2.

Важным фактором, влияющим на выбор концепции обустройства арктических месторождений, является глубина воды на акватории месторождения, которая, в конечном итоге, определяет платформенное (опирающееся на дно, плавучее) или подводное обустройство. Глубина морской акватории определяет границы применимости технических средств для бурения скважин и эксплуатации месторождения. Плавучие буровые установки (полупогружные и буровые суда), независимо от ледового класса, не могут применяться при глубинах воды менее 50-60 м, а буровые установки и технологические сооружения, опирающиеся на дно, должны обладать соответствующей ледостойкостью.

В мире накоплен большой опыт по освоению месторождений в труднодоступных регионах, однако отсутствует практика освоения месторождений в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях, аналогичных акваториям приамальского шельфа, Обской и Тазовской губ.

Особенностью освоения арктических нефтегазовых месторождений является необходимость принятия решений по их обустройству и транспорту продукции в условиях с длительным или постоянным наличием дрейфующего ледового покрова и экзарации морского дна ледовыми образованиями, а также сложной интерференции прямых и опосредованных воздействий различных факторов на возникновение и развитие процессов и явлений, опасных для нефтегазовых промысловых объектов. Принимая во внимание, что 60 % акваторий арктических морей России обладает глубиной менее 60 м, а по геологическим оценкам в них размещены десятки млрд. тут углеводородных ресурсов, проблема их освоения является одной из важнейших и актуальных направлений научно-технического развития морской нефтегазодобычи.

Месторождения приамальского шельфа и акваторий Обской и Тазовской губ рассматриваются в качестве сырьевой базы для поддержания добычи в Надым-Пуртазовском регионе (большинство базовых сухопутных месторожде-

ний находятся в стадии падающей добычи). Поэтому задача обоснованного выбора концепции освоения рассматриваемых месторождений является **актуальной**.

**Цель диссертационной работы** – развитие научно-методических подходов к выбору и обоснованию концепции обустройства нефтегазовых месторождений на мелководном шельфе Арктики.

#### **Основные задачи**

Поставленная цель диссертационной работы достигается путем решения следующих задач:

- анализ и обобщение мирового опыта обустройства морских нефтегазовых месторождений и оценка степени их пригодности для арктического шельфа Российской Федерации;
- обоснование методов выбора рациональных типов объектов обустройства (искусственные островные сооружения, стационарные платформы, подводные добычные комплексы) мелководных месторождений в условиях неопределенности;
- разработка методов определения технической доступности нефтегазодносных участков арктического шельфа для реализации подводных объектов обустройства с учетом ледовой обстановки, удаленности от берега и глубины акватории.
- определение глубины пропахивания дна ледовыми образованиями для установления безопасной глубины заглубления подводных объектов обустройства (ПДК и подводные трубопроводы).

#### **Научная новизна**

Разработана методика выбора концептуальных вариантов обустройства морских нефтегазовых месторождений, на основе которой определены рациональные схемы платформенного обустройства месторождений со свайными основаниями.

Установлено, что строительство любых сооружений с гравитационным типом основания для освоения месторождений Обской губы без специальных мер по укреплению грунтов основания неприемлемо.

Расчетными оценками свайных оснований платформ установлены условия обеспечения устойчивости платформ со свайным основанием в условиях критического мелководья.

По результатам районирования шельфа Карского моря и Обской и Тазовской губ определены зоны технической доступности для применения подводных технологий, что позволит определить очередность освоения месторождений региона, исходя из наличия и готовности к применению необходимых технических средств и сооружений.

Определено, что из-за мелководья акватории Обской и Тазовской губ и воздействия ледовых образований подводное оборудование и технические средства, обеспечивающие добычу (подводные трубопроводы), должны заглубляться

в морской грунт. Верх заглубляемых подводных объектов для Северо-Каменномысского ГКМ должен быть не менее 2,9 м ниже уровня морского дна.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Результаты работы были использованы ООО «Газпром ВНИИГАЗ» при разработке технологических схем разработки и обоснования инвестиций освоения месторождений Каменномысское-море и Северо-Каменномысское (2008-2012 гг.), а также в технико-экономических предложениях (ТЭП) по освоению месторождений Чугоряхинское, Симаковское, Антипаютинское, Тотояхинское акватории Обской и Тазовской губ (2013-2016 гг.).

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при выборе концепции обустройства аналогичных месторождений на мелководном шельфе Арктики.

### **Методы диссертационного исследования**

Для решения поставленных задач применялись общие положения научных исследований, включающие анализ и обобщение научно-литературных источников, проведение теоретических исследований.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика выбора варианта концепции освоения морских месторождений, учитывающая особенности мелководного шельфа Арктики;
2. Методика определения зон технической доступности нефтегазоносных участков шельфа Арктики с помощью подводных технологий (с определением состава технических средств и сооружений).
3. Обоснование границ устойчивости и условий применимости искусственных островных сооружений (ИОС), гравитационных и свайных опорных оснований при обустройстве Северо-Каменномысского месторождения.
4. Оценка глубины пропахивания грунта ледовыми образованиями и деформации грунтов в акватории Северо-Каменномысского месторождения для обоснования величины заглубления объектов обустройства (подводные добычные системы, трубопроводы и др.).

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Поставленные в диссертационной работе задачи решались с использованием теоретического анализа, механики грунтов, теории пластичности, расчетно-аналитического и численного моделирования.

Результаты исследований представлялись на международных и отечественных научно-практических конференциях и публиковались в рецензируемых печатных изданиях.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях и заседаниях секций Ученого совета ООО «Газпром ВНИИГАЗ»:

- 8-я международная конференция по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа СНГ (RAO / CIS Offshore 2007), г. Санкт-Петербург, 11-13 сентября 2007 г.;

- XV научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, г. Тюмень, 20-23 мая 2008 г.;
- ROOGD -2008 - II Международная конференция «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток», Московская область, ООО «ВНИИГАЗ», 17-18 сентября 2008 г.;
- Международная научно-практическая конференция молодых специалистов и ученых "Применение новых технологий в газовой отрасли: опыт и преемственность". Московская область, ООО «ВНИИГАЗ», 30 сентября - 01 октября 2008 г.
- XIII научно-практическая конференция «Проблемы развития газовой промышленности Сибири - 2014».
- III Международный молодежный образовательный форум «Арктика. Сделано в России – 2017».

### **Публикации**

Основное содержание диссертационной работы изложено в 8 публикациях, в том числе в 4-х статьях в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение с выводами и предложениями, список использованной литературы из 74 наименований. Содержание изложено на 135 страницах машинописного текста и включает 52 рисунка и 23 таблицы.

### **Благодарности**

Автор выражает признательность и благодарность своему научному руководителю д.т.н. Д.В. Люгаю за выбор направления исследований, обсуждение их результатов и консультации. Автор также искренне признателен и благодарен профессору, д.т.н. Д.А. Мирзоеву, профессору, д.т.н. М.Н. Мансурову, профессору, д.э.н. П.Б. Никитину, члену-корреспонденту РАН, профессору, д.т.н. Б.А. Григорьеву, д.г.-м.н. Н.Н. Соловьеву за ценные советы и консультации. Автор выражает признательность ведущим специалистам «Корпоративного научно-технического центра освоения морских нефтегазовых ресурсов» ООО «Газпром ВНИИГАЗ» А.В. Маричеву, С.В. Грекову, И.Э. Ибрагимову, С.А. Вершинину, О.А. Корниенко, М.М. Наумову, К.Н. Савельеву, М.М. Чумакову, О.М. Финагенову, П.С. Шушпанникову, В.В. Василевскому за обсуждение основных положений диссертационной работы. Также искренняя благодарность сотрудникам отдела Аспирантуры ООО «Газпром ВНИИГАЗ» Н.А. Громаковой, А.Г. Богдановой и Ю.С. Грачевой за помощь в решении организационных вопросов и оформлении диссертационной работы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится общая характеристика диссертационной работы, обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований. Определена научная новизна и основные защищаемые положения. Отмечена практическая значимость проведенных исследований.

**В первой главе** анализируются природно-климатические и инженерно-геологические условия Обской губы. Рассматривается мировой опыт обустройства мелководных месторождений арктического шельфа с помощью искусственных островных сооружений и стационарных платформ. Также проведен анализ существующего и проектируемого подводно-подледного промыслового оборудования. Проблема обустройства морских месторождений в общем виде включает в себя две основные задачи: 1) обоснование техники и технологии строительства разведочных и эксплуатационных скважин; 2) обоснование технологий эксплуатации скважин, добычи, сбора, промысловой подготовки и транспорта углеводородной продукции, утилизации шлама и пластовой воды. В данной главе приводится анализ состояния готовности к применению промыслового оборудования, предназначенного для установки и длительной работы на дне моря, приемлемых для использования на подводных промыслах Карского моря.

По результатам проведенного анализа сделано заключение, что, несмотря на известные технические достижения в области обустройства морских месторождений, вследствие сложностей и проблем, порождаемых природно-климатическими, инженерно-геологическими и ледовыми условиями шельфа Российской Арктики, работа по поиску решений, позволяющих экономически целесообразным способом осуществить обустройство мелководных месторождений Обской и Тазовской губ и приямальского шельфа далека от завершения. Так существующие проекты ледостойких буровых установок для круглогодичного бурения скважин в условиях замерзающих морей не приемлемы для работы на мелководье, т.к. они обладают большой осадкой и ограничены по минимально допустимой глубине морской воды (не менее 50-60 м). Подводно-подледная установка для бурения скважин, устанавливаемая непосредственно на морском дне, под ледяным покровом отсутствуют на мировом рынке. Создание таких комплексов является сложной и многоплановой проблемой, требующей значительных интеллектуальных усилий, большого опыта и производственных возможностей, и их появление нереально в ближайшие 10 – 15 лет.

В связи с изложенным представляется оправданным и вполне реализуемым вариант – осуществление бурения эксплуатационных скважин на месторождениях Обской и Тазовской губ и приямальского шельфа с искусственных островов или ледостойких стационарных платформ различного типа с размещением на них буровой установки и технологического оборудования, необходимого для осуществления добычи и транспортировки на берег углеводородной продукции. Это не исключает применение подводных сепарационно-компрессорных станций, мультифазных насосных установок, установок для закачки воды в пласт и систем управления этим оборудованием для решения задач по транспортировке продукции месторождений на берег.

Выбор концепции освоения нефтегазовых месторождений Обской и Тазовской губ и приямальского шельфа требует развития научно-методических подходов, обоснованных расчетно-аналитическими исследованиями влияния осо-

бенностей региона (ледовая обстановка, грунтовые условия и т.д.) на объекты обустройства. Для принятия технических решений, направленных на возможное практическое применение в будущем подводных технологий необходимо уже сегодня проводить исследования, направленные на определение глубины пропачивания дна торосистыми образованиями и оценки характера деформаций грунта при воздействии на него киля тороса.

**Вторая глава** «Выбор и обоснование вариантов освоения углеводородных месторождений арктического шельфа с учетом их технической доступности» посвящена разработке научно-методических основ решения задач обустройства месторождений мелководного континентального шельфа замерзающих морей.

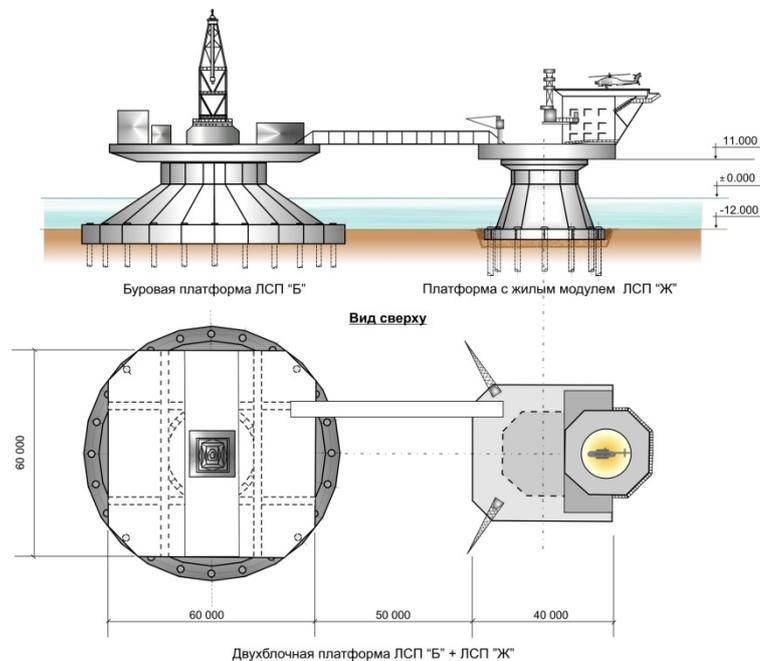
При освоении морских месторождений и обосновании схем размещения добычного оборудования весьма важным является учет специфических условий региона (например, Арктики) и выявление применимости существующих системных решений или выявление разрывов в развитии/отсутствии технологий для обеспечения проектных решений. Для концептуальной стадии разработки проекта, сопровождающейся, как правило, значительной нехваткой геологической и природно-климатической информацией на месте строительства, наиболее эффективной и объективной формой выбора приемлемого варианта конструкции промыслового сооружения с учетом возможной минимизации ее стоимости, обеспечения надежности и безопасности на весь период эксплуатации является метод экспертных оценок. Выбор приемлемых для дальнейшего рассмотрения вариантов обустройства морских нефтегазовых месторождений производится в три этапа: 1. подготовка и анализ исходных природно-климатических, океанографических и других условий размещения и эксплуатации промысловых сооружений; 2. подготовка и анализ технологических требований, влияющих на конструкции промысловых ледостойких сооружений; 3. Формирование и анализ критериев для выбора приемлемого варианта (Технический уровень, технологичность, оперативность строительства, соответствие нормативным требованиям, обеспечение технической, пожарной и экологической безопасности, стоимость). Указанные критерии передаются экспертам совместно с проектами вариантов конструкций, для последующей оценки и выбора основного варианта. Каждый критерий оценивается экспертом по 10 балльной системе. К экспертной оценке допускаются только высококвалифицированные специалисты. Для уменьшения субъективности оценок экспертов, по каждому критерию вводится весовой коэффициент от 1 до 5. Результаты оценки критериев с учетом весовых коэффициентов ( $K$ ), числа критериев ( $n$ ) и количества экспертов ( $m$ ) определяют рейтинги вариантов конструкций ( $R$ ), полученные из выражения:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m K_i E_i}{n}$$

В работе проанализирована применимость ледостойких стационарных платформ, ледостойких блок-кондукторов и искусственных островных сооруже-

ний. В соответствии с результатами анализа и рекомендуемым технологическим вариантам разработки Северо-Каменномысского месторождения двумя кустами скважин в качестве основной платформы для бурения 20 скважин рекомендованы два альтернативных варианта: а) моноблочная ЛСП и ее двухблочная конструктивная модификация с отдельно расположенным от основной производственной платформы жилым блоком, соединенным коммуникационным мостом; б) для бурения двух кустов из 8 скважин предлагается ЛБК. Для бурения скважин на всех ЛБК рекомендуется применение мобильной ледостойкой буровой платформы (МЛБП), рассчитанной на круглогодичное бурение эксплуатационных скважин.

Двухблочная платформа состоит из двух отдельных блоков: ЛСП «Б» и ЛСП «Ж», соединенных между собой мостом пролётом 50-70 м. Общий вид двухблочной платформы показан на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Двухблочная платформа ЛСП «Б» + ЛСП «Ж»**

В сравнении с моноблочными конструкциями двухблочная конструкция имеет преимущества за счет повышения безопасности из-за расположения жилого модуля вдали от зон повышенной опасности и облегчения условий строительства платформы из-за ее разделения на два отдельных блока, имеющих меньшие массогабаритные характеристики, чем одна моноблочная конструкция. Проведенные оценки показывают, что вариант двухблочной конструкции экономически несколько привлекательнее. В то же время, принятые технические решения в части монтажа верхних строений на опорное основание недостаточно апробированы на практике. С точки зрения надежности предпочтительнее вариант с использованием моноблочной ЛСП.

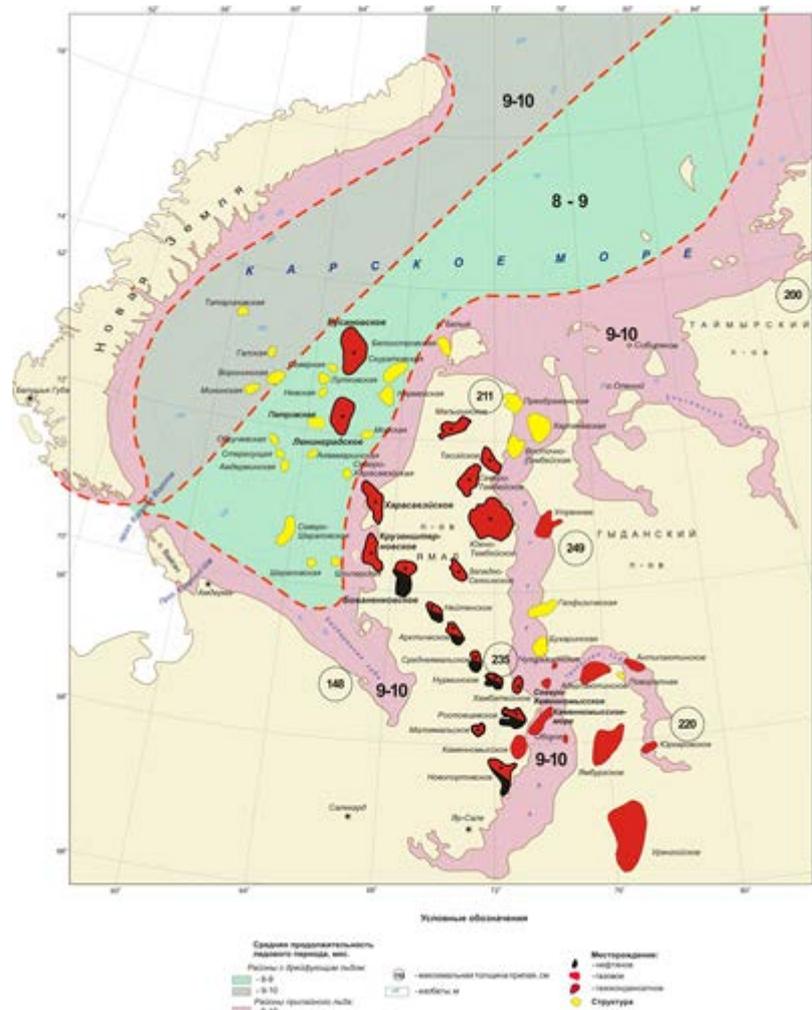
Рассмотрен вариант использования малогабаритной платформы - ЛБК, работающего в автоматическом безлюдном режиме, которая служит опорной конструкцией для бурения через него эксплуатационных скважин с помощью ПБК и размещения на нем устьев пробуренных скважин. При ее использовании возможны три варианта бурения скважин: с помощью мобильной ледостойкой буровой платформы (МЛБП), с помощью передвижного бурового комплекса (ПБК), с помощью самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ) в навигационный период. В качестве альтернативы рассмотрен вариант использования МЛБП для бурения подводных эксплуатационных скважин и последующей их эксплуатации при помощи подводного добычного комплекса (ПДК), который состоит из 3-х блоков: корпусных конструкций ПДК, подводного фундаментного основания (ПФО) и мобильной ледостойкой буровой платформы (МЛБП), которая осуществляет бурение. Экономические оценки показывают, что вариант добычного комплекса с использованием ПДК почти в два раза дороже, чем вариант с использованием ЛБК.

Анализ применимости различных типов искусственных островных сооружений (ИОС) при обустройстве Северо-Каменномысского месторождения показал, что в существующих природно-климатических, инженерно-геологических, гидрологических условиях без специальных мер по укреплению грунтов основания недопустимо. Повышение несущей способности грунтов основания путем их замены на стабильные является практически не осуществимым мероприятием.

В качестве рекомендуемого варианта платформенного обустройства Северо-Каменномысского месторождения предлагается моноблочная ЛСП или ее двухблочная конструктивная модификация со свайным фундаментом. Для бурения отдаленных кустов предлагается ледостойкий блок-кондуктор.

В данной главе также изложена методика определения технической доступности нефтегазоносных участков шельфа арктических морей для использования подводных технологий (с определением состава технических средств и сооружений) путем районирования морской акватории. Она позволяет определить очередность освоения месторождений по мере готовности сопровождающих ее необходимых технико-технологических, подводных, плавучих и стационарных средств. Этапы предлагаемой методики включают: 1. анализ нефтегазоносности акватории морей; 2. создание банка данных; 3. составление районированных по ледовым условиям карт морей; 4. создание информационного банка данных по наличию технических средств и сооружений; 5. совмещение нефтегазоносных структур с картой районирования; 6. определение оптимальных для конкретных районов состава объектов подводного обустройства. Методика апробирована на примере шельфа Карского моря (включая Обскую и Тазовскую губы) (рис.2).

Акватория Карского моря условно поделена по ледовым условиям на 3 зоны технической доступности, для каждой из которых определены условия применения подводных технологий.



**Рисунок 2 – Карта районирования Карского моря по ледовым условиям**

**Зона I** - Районы припайного льда. Для глубин моря менее 10-15 м необходимо предусмотреть защиту ПДК от воздействий льда. Применение ПДК должно сопровождаться созданием мобильной ледостойкой буровой установки.

**Зона II** – районы с дрейфующим льдом со средней продолжительностью ледового периода 8 – 9 месяцев. На глубинах до 60 м, возможно применение мобильной ледостойкой буровой установки. Для бурения скважин в более глубоких водах ледостойкие платформы отсутствуют, необходимо создание подводной буровой установки.

**Зона III** – районы с дрейфующим льдом со средней продолжительностью ледового периода 9 – 10 месяцев. Для бурения эксплуатационных скважин на месторождениях этой зоны требуется создание подводной буровой установки, подводных сепараторов, компрессоров, источников энергии и систем дистанционного управления.

Анализ применения подводных технологий на Северо-Каменномысском месторождении и его аналогов, показывает, что из-за мелководья и воздействия льда комплекс подводного оборудования должен заглубляться в грунт. Трудно-

доступность скважин является существенным недостатком подводного обустройства и высоким риском эксплуатации.

**В третьей главе** исследуются границы устойчивости и условия применимости искусственных островных сооружений, гравитационных и свайных опорных оснований ЛСП в условиях Северо-Каменномысского месторождения. Исследования проведены для следующих объектов обустройства:

- ЛСП (кессон) – ледостойкая стационарная платформа (ЛСП) с функциями «бурение + жильё» или искусственный насыпной остров.
- ЛСП (монокон) – ледостойкий корпус в форме многогранной призмы с прямыми стенками.
- ЛБК – ледостойкий блок-кондуктор.

Грунтовые условия Обской губы, характеризующиеся присутствием илов и потенциально неустойчивой пластичной глины, оказывают значительное негативное влияние на конструкцию и устойчивость оснований и сооружений.

Исследования гравитационного варианта платформы ЛСП аналитическими и численными методами показали, что устойчивость платформы на площадке Северо-Каменномысская при принятых исходных данных не может быть обеспечена.

Оценка варианта строительства насыпного искусственного острова на пластичной глине выявляет ряд существенных осложнений, связанных с долгосрочной консолидационной осадкой, низким темпом строительства острова и, в конечном итоге, с технической надежностью сооружения. Поэтому строительство крупного насыпного острова на пластичной глине в данном районе не целесообразно.

Оценки устойчивости свайных вариантов платформ, рассчитанных по сертифицированному за рубежом программному комплексу PLAXIS 3D Foundation, учитывающему 3х мерность системы и использующему метод конечных элементов, показывают, что устойчивость сооружений может быть обеспечена с применением свай диаметром от 1800 до 2400 мм с толщиной стенки 50 мм и длиной от 50 до 70 м. Для обеспечения устойчивости свайных вариантов платформ, рассчитанных по российским стандартам и нормам DNV, требуется увеличение количества или диаметра используемых свай. Поэтому для рекомендуемых вариантов конструкций платформ с опорной частью конусного типа предлагаются: количество свай 20 – 24 шт., диаметр – 1800 мм, толщина стенки 50 – 60 мм, глубина забивки в грунт – 50-60 м, для платформ ЛБК: свай 12 шт, диаметр 1800 мм, толщина стенки свай 50-60 мм, глубина забивки в грунт 50 – 60 м.

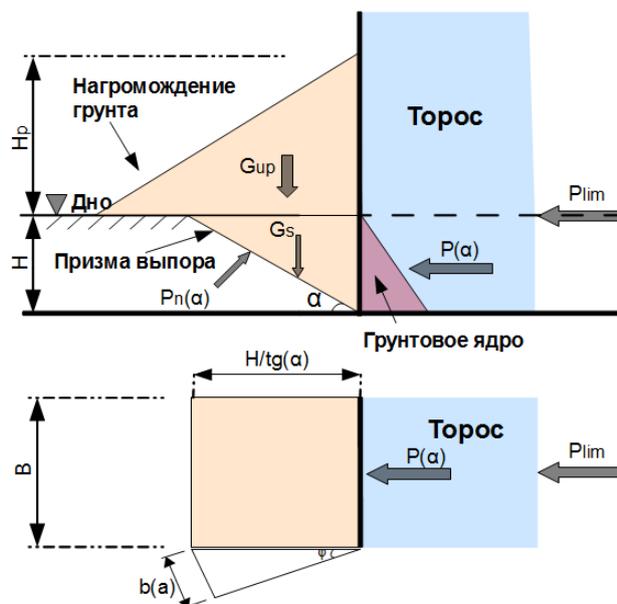
Указанное количество свай по вариантам платформ обеспечивает также их устойчивость при воздействии ледовых нагрузок, определенных по методикам ISO 19906 и СНиП 2.06.04-82.

**В четвертой главе** приводятся оценки пропахивания грунта ледовыми образованиями (на примере Северо-Каменномысского газового месторождения), основанные на результатах расчетно-теоретического исследования и численного моделирования.

Расчетно-теоретические (инженерные) исследования определяют глубину пропахивания грунта, при которой нагрузки от кия тороса на заглубленные объекты максимальные. Исследования опираются на результаты исследований С.А. Вершинина, П.А. Трускова и П.А. Лиферова по пропахиванию торосов для условий шельфа о. Сахалин. Сделано допущение, что значения предельных ледовых нагрузок от экстремальных торосов в Обской губе сопоставимы с аналогичными показателями для сахалинского шельфа. При этом, учитывая мелководность Обской губы и особенности грунтов, слагающих ее дно, глубины пропахивания, при которых достигаются сопоставимые значения ледовых нагрузок, будут значительно выше сахалинских.

Данная задача решена для суглинка мягкопластичного пылеватого, слагающего верхний грунтовый слой Северо-Каменномысского газового месторождения со свойствами, принятыми по данным изысканий.

Прочность тороса принята как для частично смерзшегося образования, не разрушающегося при пропахивании, т.е. глубина пропахивания будет определяться свойствами грунта. Расчетные значения экстремального ледового тороса для С-КГМ приняты по данным наблюдений. Расчетная схема представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3 - Расчетная схема пропахивания грунта**

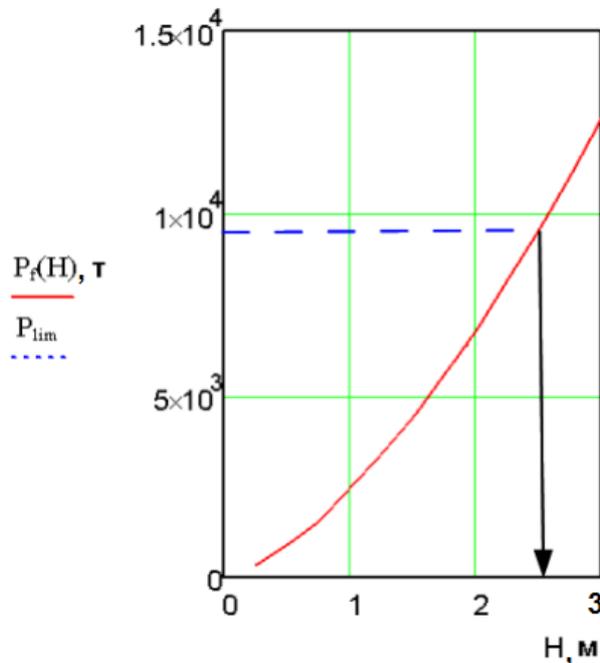
При движении тороса происходит деформирование грунта, характеризующееся образованием призмы выпора и призмы волочения по фронту кия. Тело призмы выпора рассматривается как жестко-пластическое. Нагромождение грунта перед торосом рассматривается как сыпучее (теряет сцепление).

Расчеты базируются на обобщенной кинематической энергетической модели (КЭМ). Усилие при скольжении призмы выпирания (фронтальное сопротивление грунта) определяется из условия равенства мощности работы внешних сил и скорости диссипации энергии движения тороса и выражается следующей формулой:

$$P(\alpha) = \frac{Gsn(\alpha) \cdot \tan(\varphi) + c \frac{H \cdot B}{\sin(\alpha)} + c \cdot b(\alpha) \frac{H}{\sin(\alpha)} + Gs(\alpha) \cdot \sin(\alpha) + 2To(\alpha) + 2No(\alpha)}{F(\alpha) - \sin(\alpha) \cdot \tan(\varphi)}$$

Торос теряет энергию движения при уменьшении угла наклона призмы выпора  $\alpha$  и при минимальном его значении происходит остановка тороса. Фронтальное сопротивление грунта при этом минимальное.

По результатам расчетов построен график изменения фронтального сопротивления грунта от глубины борозды  $H$  при максимальной нагрузке от ровного льда  $P_{lim180} = 9072$  т (рис. 4).

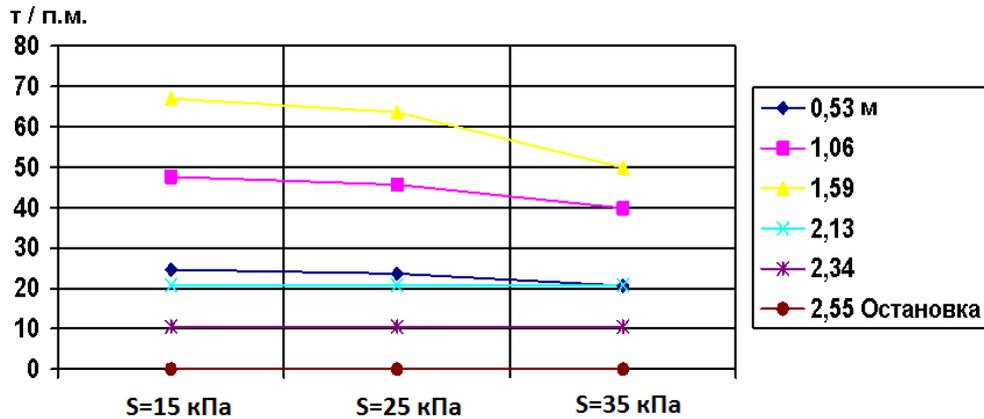


**Рисунок 4 - График изменения силы отпора грунта  $P(\alpha)$  в зависимости от глубины борозды  $H$  при максимальной нагрузке от ровного льда  $P_{lim180} = 9072$  т.**

Как видно из графика искомая глубина борозды составляет 2.55 м.

Далее путем сопоставления полученных результатов с результатами указанных ранее исследований был определен корректирующий коэффициент и построен график изменения ледовой нагрузки на стенку защитного кессона при

различных значениях глубины пропахивания борозд в мягко-пластичных глинах (рис. 5).



**Рисунок 5 - График изменения ледовой нагрузки на заглубленный объект при различных значениях глубины пропахивания для ледовых условий СКГМ**

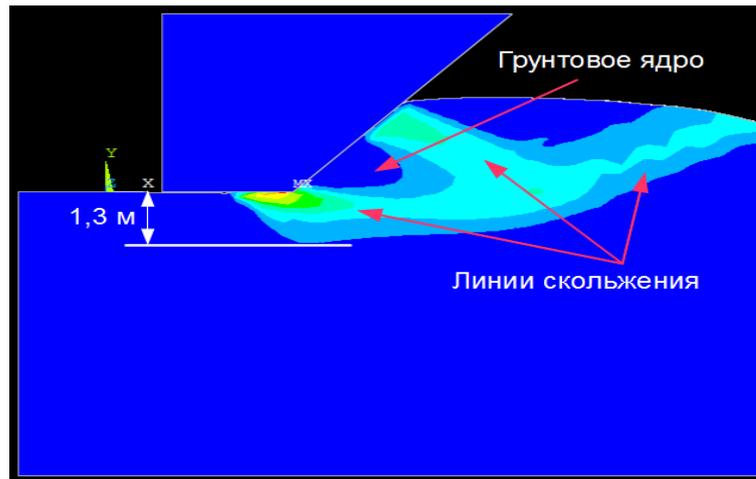
Таким образом, если не заглубить подводный объект максимальная погонная нагрузка на него составит  $p=68$  т/п.м. Такая нагрузка возникает при наиболее опасной глубине пропахивания  $H=1,59$  м. Поэтому во избежание контакта подводных объектов обустройства с торосистыми образованиями необходимо заглублять их на величину не менее 1,59 м.

Для анализа деформирования грунтового массива ниже борозды и возникающих при этом предельных напряжений проведено численное моделирование пропахивания морского дна торосистым образованием методом конечных элементов (МКЭ) с помощью вычислительного конечно-элементного комплекса (ВК) Ansys Mechanical – 2015.

Киль тороса моделируется как изотропная среда и характеризуется модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Угол наклона передней грани киля  $45^\circ$ . Грунт задается с помощью упруго-пластичной модели Друкера-Прагера со следующими входными параметрами: модуль деформации  $E$ , число Пуассона  $\nu$ , сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ .

Расчет велся для глубины пропахивания 1,59 м.

По результатам расчета получено поле интенсивности деформаций (рис. 6).



**Рисунок 6 – Поле интенсивности деформаций**

По полю интенсивности деформаций видно, что деформации ниже борозды распространяются на глубину 1,3 м. С учетом этого величина минимального заглубления подводных объектов освоения в условиях Северо-Каменномысского газового месторождения составляет 2,89 м. Таким образом, численное моделирование позволило оптимизировать величину заглубления подводных объектов обустройства.

Также в результате численного моделирования получено поле эквивалентных напряжений по Мизесу, характеризующее НДС грунта в момент достижения им предельного равновесия. Установлено, что максимальные значения напряжений (676-759 кПа) при пропахивании возникают на границе контакта угла кия тороса и грунтового массива. Значения напряжений, возникающих по фронту, кия варьируются от 339 кПа до 676 кПа.

Полученные значения максимальных нагрузок по фронту кия совпадают с результатами аналитических расчетов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основными результатами выполненных исследований, отраженными в диссертационной работе, являются усовершенствованные научно-методические подходы к выбору и обоснованию концепции обустройства нефтегазовых месторождений на мелководном шельфе Арктики (методика выбора варианта концепции освоения углеводородных месторождений; методика определения зон технической доступности нефтегазоносных участков шельфа с помощью подводных технологий), с использованием которых автором выполнены исследования и получены следующие результаты:

1. Рациональные схемы платформенного обустройства Северо-Каменномысского месторождения по двум альтернативным вариантам: - моноблочная ЛСП и - ее двухблочная конструктивная модификация с отдельно расположенным от производственной платформы жилым блоком, соединенным коммуникационным мостом. Для бурения двух отдаленных кустов из 8 скважин предлагается использовать ледостойкий блок-кондуктор (ЛБК).

2. Грунтовые условия Обской губы, характеризующиеся присутствием илов и потенциально неустойчивой пластичной глины, оказывают значительное влияние на конструкцию оснований и сооружений. Установлено, что применение гравитационного основания платформы не обеспечивает ее устойчивость на акватории Северо-Каменомысского ГКМ при реальных инженерно-геологических условиях морского дна.

3. Оценка варианта строительства насыпного искусственного острова на пластичной глине выявляет ряд существенных осложнений, связанных с долгосрочной консолидационной осадкой, темпом строительства острова и надежностью сооружения. Установлено, что строительство ИОС для освоения месторождений Обской губы без специальных мер по укреплению грунтов основания недопустимо. Удаление слабых грунтов толщиной 15-26 м и замена их на стабильные является практически не осуществимым мероприятием.

4. Оценки свайных вариантов платформ, рассчитанных по программному комплексу PLAXIS 3D Foundation, использующего метод конечных элементов, показывают, что устойчивость сооружений может быть обеспечена с применением свай диаметром от 1800 до 2400 мм с толщиной стенки 50 мм, с длиной от 50 до 70 м. Для обеспечения устойчивости свайных вариантов платформ, рассчитанных по российским стандартам и нормам DNV, требуется увеличение количества или диаметра используемых свай. Для платформ ЛСП-БЖ количество свай 20 – 24 шт., диаметр – 1800 мм, глубина забивки в грунт – 50-60 м, для платформ ЛБК: свай 12 шт, диаметр 1800 мм, глубина забивки в грунт 50 – 60 м. Указанное количество свай по вариантам платформ обеспечивает также их устойчивость при воздействии ледовых нагрузок, определенных по методикам ISO 19906 и СНиП 2.06.04-82.

5. Анализ применения подводных технологий на Северо-Каменномысском месторождении и его аналогов, показывает, что из-за мелководья акватории и воздействия ледовых образований комплекс подводного оборудования и технических средств, обеспечивающих добычу, должен заглубляться в морской грунт. Оценочная величина заглубления составляет не менее 2,89 м.

6. Труднодоступность устья скважин в зимний период является наиболее существенным недостатком использования подводных методов обустройства. Альтернативным техническим средством ПДК является надводное размещение устьев скважин на ледостойком блок-кондукторе (ЛБК), способное функционировать подобно ПДК в безлюдном автоматическом режиме. Поэтому решение о применении того или иного метода необходимо принимать на основании сравнительной оценки их технико-экономических характеристик.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для аналогичных месторождений арктического шельфа страны.

#### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Амиросланов З.А., Караев И.П. Проблема сцепления между бетонным ядром и стальной оболочкой опорного блока ледостойких сталебетонных плат-

форм.//ежеквартальный научно-технический журнал «Вестник ассоциации буровых подрядчиков», 2008 г., №4 с. 25-28

2. Рабкин В.М., Мирзоев Ф.Д., Караев И.П. Основные факторы, влияющие на возможность применения подводной технологии в условиях арктического шельфа России.// Газовая промышленность (спецвыпуск), 2009, №634, с. 54-55.

3. Финагенов О.М., Караев И.П. Выбор рациональных вариантов стационарных нефтегазодобывающих платформ для обустройства месторождений Обской и Тазовской губ.// Гидротехника XXI век. 2013 г, №4 (16), с. 57–61.

4. Караев И.П., Мирзоев Ф.Д., Архипова О.Л. Методика разработки концептуальных схем обустройства нефтегазовых месторождений арктического шельфа / SOCAR PROCEEDINGS Баку 2015, №3, стр. 58-65.

5. Мирзоев. Д.А., Вершинин С.А., Караев И.П. Воздействие ледовых образований на конструкции подводных добычных комплексов при отсутствии контакта торосов с донным грунтом.// Газовая промышленность, (спецвыпуск), 2011, №661, с. 86-89.

6. Рабкин В.М., Мирзоев Ф.Д., Караев И.П., Вершинин С.А., Трусков П.А., Лиферов П.А. Физическое моделирование воздействия ледовых образований на подводные объекты обустройства морских нефтегазовых месторождений / Освоение морских нефтегазовых месторождений: состояние, проблемы и перспективы: Сб. науч. Тр. – М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008. – с.162-167.

7. Новиков А.А., Караев И.П. Расчетно-аналитическое исследование выбора типов оснований ледостойких стационарных платформ для освоения месторождений Обской губы: журнал «Газовая промышленность» 2018 г. №7/771 – с. 40-46.

8. Люгай Д.В., Караев И.П. К вопросу освоения газовых месторождений Обской губы с использованием искусственных островных сооружений: ежеквартальный научно-технический журнал «Вестник ассоциации буровых подрядчиков» 2018. №1 – с. 2-5

Подписано к печати « » 2018 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».