

## БЕЗОПАСНОСТЬ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

**Беккер Александр Тевьевич**

*Директор Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»,  
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН*

**Ким Лев Владимирович**

*Заведующий Научно-конструкторской лабораторией проектирования морских инженерных сооружений ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»,  
кандидат технических наук, доцент, советник РААСН*

### Введение

Дальневосточные территории по сложности проблем строительства и эксплуатации, определяющих безопасность, относятся к зоне повышенного риска. От Камчатки до Японии и далее проходит сейсмический пояс, имеется большое число тектонических разломов. Условия строительства и эксплуатации характеризуются тяжелым гидрометеорологическим режимом, слабо развитой инфраструктурой и другими факторами, которые в совокупности являются более сложными, чем например, в Северном море или море Бофорта [7].

Планы России по освоению шельфа Арктики и дальневосточных морей требуют значительных капитальных вложений в строительство специальных сооружений, включающих объекты портовой инфраструктуры, нефтегазодобывающие платформы, объекты морской техники, трубопроводы и т.д. Первый проект обустройства морского месторождения нефти стартовал в 1998 г. («Сахалин 2») на месторождении Пильтун-Астохское, где был установлен первый в России добывающий комплекс «Витязь», включающий ледостойкую платформу «Моликпак». В 2005 г. установлены ледостойкие платформы для месторождений Лунское и Пильтун-Астохское (Сахалин 2) и для месторождения «Чайво» (Сахалин 1), в 2012 г. – для месторождения Аркутун-Даги (Сахалин 1). Первая на арктическом шельфе России ледостойкая платформа «Приразломная» установлена на шельфе Печорского моря в 2011 г.

На очереди освоение месторождений углеводородов на арктическом шельфе. Эти проекты предполагают строительство десятков ледостойких платформ, при этом их размеры и материалоемкость будут увеличиваться по мере освоения месторождений расположенных на больших глубинах арктического и субарктического шельфов.

Основными факторами, определяющими конструктивную схему платформ на шельфе, являются параметры дрейфующего ледяного покрова и расчетные случаи формирования нагрузок на сооружение. Учитывая высокую динамику ледяного покрова, можно предполагать возникновение расчетных случаев совместного воздействия на сооружения различных ледяных образований: ровных полей и торосов, дрейфующих торосистых гряд, стамух и пр. При реализации такого сценария могут возникать большие нагрузки, превышающие нагрузки от отдельных ледяных образований.

Необходимы разработки по учету стохастических реализаций нагрузок, прогнозу деградации напряженно-деформированного состояния конструкций в процессе жизненного цикла, что позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ [6]. Анализ сценариев позволяет выбрать конструкции, их элементы, соединения и узлы объекта, которые должны подлежать контролю в процессе эксплуатации объекта.

## 1. Актуальность исследований

Одной из проблем для замерзающих морей является обеспечение безопасности освоения нефтегазовых месторождений при действии дрейфующих ледяных полей. Сложность задач значительна с точки зрения имеющихся технических, технологических, ресурсных и экологических ограничений при освоении ресурсов арктического шельфа, увеличения доли импортозамещающих технических средств и технологий. Развитие технологий должны повысить информативность и оперативность системы диагностики и мониторинга. В частности, применительно к ледовым нагрузкам необходим учет возможных реализаций данных нагрузок, деградации конструкций и т.д. на основе вероятностного анализа. Недостаточные объем и достоверность информации о степени соответствия фактических характеристик морских нефтегазопромысловых сооружений (МНГС) требованиям проекта, незамеченные дефекты и т.д. могут существенно ухудшить индикаторы надежности и безопасности.

Анализ рекомендаций отечественных и зарубежных норм по расчету ледовых нагрузок показывает, что в них отсутствует значительная часть расчетных случаев и видов воздействий, которые могут реально возникать в условиях открытой акватории. В мировой практике расчетов ледовых нагрузок различными исследователями обычно рассматриваются только некоторые частные сценарии воздействия какого-либо типа ледового образования на опору сооружения (ровных ледяных и торосистых полей или отдельных торосов).

Существующие нормативные документы США и Канады, а также некоторых других стран, основываются на опыте проектирования и эксплуатации стационарных платформ для климатических условий залива Кука, моря Бофорта, Ботнического и Бохайского заливов, где применялись платформы свайного типа и искусственные острова. Российские стандарты не учитывают в полной мере специфику ледовых условий арктического шельфа, в частности, при оценках ледовых нагрузок от торов, локального, динамического и истирающего воздействия льда.

В мировой практике на сегодняшний день не существует единого подхода к выбору значений параметров ледяного покрова и ледовых нагрузок. Некоторые исследователи предлагают в качестве расчетных принимать максимально возможные из имеющегося ряда наблюдений значения. Другие рекомендуют вводить в расчет наиболее вероятные значения. При проектировании конструкций для морских условий в настоящее время чаще всего используются вероятностно-статистические методы определения расчетных параметров ледяного покрова и нагрузок.

Ледовые воздействия можно классифицировать по характеру, направлению, длительности действия, виду действующих ледяных образований (ЛО) и т.п. [6]. Ледовые нагрузки и воздействия возникают при следующих явлениях: горизонтальные перемещения при дрейфе или подвижках ледяных образований под действием ветра, течений, приливов, температурных деформаций и т.п., вертикальные перемещения ледяного покрова при колебании уровня моря, волны, обледенение конструкций. По длительности действия и характеру изменения во времени ледовые нагрузки можно разделить на статические, медленно изменяющиеся, ударные, циклические, динамические. По характеру взаимодействия различают квазистатические воздействия (навал, температурные расширения, подвижки ЛО под действием ветра, течения, изменения уровня моря и т.п.), динамическое воздействие при внедрении и прорезании дрейфующим ЛО сооружения с явлениями смятия, изгиба, пучения, торошения, истирания и др.

Воздействия льда могут стать причиной аварийных ситуаций, поэтому особую важность приобретают вопросы мониторинга технического состояния. К сожалению, российские организации не располагают необходимым опытом проведения мониторинга объектов повышенной ответственности, отечественная приборная база морально устарела. Необходимо выйти на новый уровень организации производства, научной, проектно-конструкторской деятельности. Стоимость зарубежных научно-технических разработок и программ является достаточно высокой, что

обуславливает целесообразность проведения самостоятельных теоретических и экспериментальных исследований.

Эффективное управление безопасностью (риск-менеджмент) морских нефтегазопромысловых сооружений (МНГС) предлагается проводить на базе многоуровневой иерархической системы, проведения ее декомпозиции / анализа / синтеза. Безопасная эксплуатация в значительной степени зависит от достоверного определения реакций МНГС на нагрузки и точности методов расчета с учетом структуры, свойств и механизмов дефектообразования и разрушения.

Составной частью процесса оценки рисков при ледовых воздействиях является идентификация деградационных процессов. Точность расчетов зависит от правильного учета структуры, свойств ЛО, закономерностей формирования ледового режима, механизмов разрушения и т.д. Необходимо использовать достижения информационно-компьютерных технологий, новых приборов и методик для совершенствования технологий мониторинга состояния сооружений. Это позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ сценариев развития ситуаций, оценить риски и т.д.

## 1.2. Исследование ледовой абразии опор МНГС

Созданный в 2014 г. R&D центр «Арктика» ДВФУ имеет ряд соглашений с нефтяными (ОАО «Роснефть»), строительными (Kvaerner Concrete Solutions), проектными (Multiconsult) компаниями, университетами (СПбГПУ, НИИСФ РААСН, Норвежский университет науки и технологии, Мемориальный университет Нью Фаундленда, Даляньский технологический университет и др.). Эти соглашения направлены, в том числе на развитие исследований в области свойств морского льда, особенностей формирования ледовых нагрузок и воздействий. Участие промышленных партнеров и университетских научных групп намечено по следующим приоритетным направлениям: формирование экстремальных ледовых нагрузок, ледовая абразия, материалы для арктических сооружений, приборы для ледовых исследований.

Эти направления исследований являются очень важными, определяющими в проектировании надежных МНГС, поскольку конструкционные материалы, из которых они возводятся, служат в суровых условиях севера. Стальные конструкции становятся хрупкими, поэтому практически большинство платформ в Арктике бетонные.

Однако, бетон в зоне контакта с дрейфующим ледяным покровом, истирается с образованием дефектов [1, 4]. Процесс формирования ледо-

вых воздействий в значительной степени определяется механизмом разрушения ЛО в зоне контакта, который влияет на динамические характеристики процесса взаимодействия и величину истирающего воздействия. Плотность бетона снижается, увеличивается пористость, уменьшается сопротивляемость циклам замораживания – оттаивания. Износ вызывает ускоренную коррозию и оголение арматуры, потерю толщины и соответственно несущую способность опор.

Бетонная поверхность под механическим воздействием ледяных образований воспринимает воздействие выступами шероховатости с вкраплениями заполнителя. Основным инструментом воздействия льда при истирании являются ледяные кристаллы. На механизм истирающего воздействия льда влияют: структура, размеры кристаллов льда, его прочность, контактное давление и время (или путь воздействия). Выступы в бетоне и льду могут иметь одинаковый порядок или отличаться, что предопределяет различные механизмы изнашивания. В бетоне в первую очередь разрушается цементный камень, а затем крупный и мелкий заполнитель. Выступающие элементы заполнителя вдавливаются в камень, часть из них дробится и перемещается под действием сил трения. Цементный камень обеспечивает устойчивость до тех пор, пока достаточно большое количество частиц заполнителя не начнет соприкасаться с истирающим льдом. Затем нагрузка в сочетании с воздействием низких температур и влажности разрушает связи цементного камня и заполнителя.

В результате неблагоприятных сочетаний нагрузок и воздействий, например, многократно повторяющихся нагрузок от внешней среды, релаксации бетона, попеременного замораживания-оттаивания смачиваемых зон конструкции, перепадов температур воздуха, процессов коррозии, капиллярной усадки, выщелачивания цементного раствора и др. возникают следующие типы абразии: механическая, молекулярно-механическая, коррозионно-механическая и термомеханическая.

Разрушение происходит в виде следующих явлений. Царапание, когда кристаллы льда образует «борозды», которые являются инициаторами трещин. Ударное изнашивание с образованием лунок из-за локальных пластических деформаций цементного камня. Выкрашивание – результат циклического усталостного воздействия на цементный камень и заполнитель.

В ходе исследований 2009-2010 гг. ДВФУ совместно с компанией «Гидротекс» по заказу корпорации «Акер Солюшнс» создали испытательный стенд на ледовую абразию, разработали программные продукты для расчета ледовых нагрузок и величины абразии [1-3, 6]. Было установлено, что факторами, влияющими на истирание бетона «в точке», явля-

ются: давление на контакте «лед-сооружение», путь взаимодействия (истирания) между сооружением и ледяным полем в точке контакта, температура льда, сопротивление материала конструкции и его компонентов истиранию.

Опыт эксплуатации платформ на шельфе Охотского моря (Пильтун-Астохское, Луньское, Аркутун-Дагинское месторождения и др.) показал, что ледовая абразия является опасным явлением, и может вызвать разрушение материала в зоне переменного уровня. Это вызвано особенностью ледового режима данной акватории, в частности, высокими контактными давлениями и высокими скоростями дрейфа ледяных образований (до 1,8 м/с).

Параметры дрейфующего льда определяют конструктивные решения опорной части ледостойких МНГС, влияют на его динамику, и существенно сказываются на параметрах и формах разрушения ледяного поля при взаимодействии с конструкцией. Процесс ледовой абразии происходит при обтекании МНГС ЛО различных видов (битый лед, сплошные поле и пр.). За расчетный срок эксплуатации (обычно 30-40 лет) это приводит к уменьшению толщины опоры на несколько десятков сантиметров, т.е. к оголению арматуры.

Общая протяженность льда, проходящая через участок месторождения, представляет собой косвенную меру суровости ледового режима в отношении нагрузок на конструкцию. Например, в районе месторождения «Аркутун-Даги» за ледовый сезон проходит в среднем 306 км наслоенного льда и 2138 км ровного льда, в районе месторождения «Луньское» - 180 км наслоенного льда и 1250 км ровного, на месторождении «Пильтун-Астохское» – 275 км наслоенного и 1925 км ровного. Среднее давление льда составляет величину порядка 1-3 МПа, локальные давления по данным разных исследователей могут достигать 15-42 МПа. Такие высокие давления вызывают проникновение воды, находящейся на границе контакта льда и бетона, в поры бетона.

Взаимодействие потоков ЛО в распределенной системе обуславливает волновой характер пластического течения. Процесс пластического течения протекает одновременно на различных структурных уровнях, масштаб которых определяется геометрией сооружения и размерами структурных неоднородностей.

Математическое описание такой сложной и многокомпонентной структуры, как дрейфующий ледяной покров, представляет собой значительные трудности, что главным образом связано с нелинейным характером параметров, входящих в структуру, и нелинейными процессами внутри ее. Необходимо рассматривать отдельные расчетные ситуации с

ЛО (обломочный лед, поля, торосы, айсберги) и для каждой ситуации разработать математические модели [3].

Сравнительный анализ используемых расчетных методов для ледовых нагрузок показал, что значения различаются до десяти раз [5]. Через 10 лет эти расхождения значительно уменьшились, но все равно еще значительны (до трех раз). Большие расхождения в значениях расчетных нагрузок, определенных по существующим методикам различными исследователями, обусловлены следующими причинами.

Во-первых, высокой степенью пространственно-временной изменчивости свойств и существенной неоднородностью ледяного покрова и их недостаточным учетом, во-вторых, разнообразием свойств льда при взаимодействии с конструкциями, а также несовершенством принятых в нормах расчетных моделей. Решение этой проблемы требует постановки широкого комплекса экспериментальных исследований ледового режима с целью определения наиболее вероятного диапазона и характера изменчивости функциональных параметров, обуславливающих величину и характер нагрузок в течение ледового периода, а так же особенностей состояния системы «лед-сооружение» в конкретном физико-географическом районе.

Для определения интегральных плотностных характеристик массива, представленного различными типами структурных неоднородностей, достаточно определить эти характеристики для каждой разновидности льда и для каждого типа структурных неоднородностей, найти средневзвешенное значение в зависимости от весовой части в «смеси». Деформационные характеристики льда, в отличие от плотностных, обуславливаются еще и их механическими свойствами и свойствами их контактов, и особенностями взаимного расположения компонент.

В отличие от плотностных и деформационных характеристик прочностные свойства подчиняются схеме «избирательности-независимости», поскольку разрушение происходит в наиболее слабом звене – «структурной неоднородности». Для определения интегральных плотностных характеристик ЛО, представленного различными типами структурных неоднородностей, достаточно определить эти характеристики для каждого типа ЛО и для каждого типа структурных неоднородностей, найти средневзвешенное значение в зависимости от весовой части в «смеси».

Поскольку вид, размеры и свойства структурных неоднородностей отдельных порядков резко отличаются друг от друга, применяют различные способы экспериментального определения характеристик. К образцам 1-го порядка предъявляются требования достаточной представительности и однородности, с тем, чтобы они не включали структурных неод-

нородностей других, более низких порядков. Для неоднородностей высоких порядков следует применять метод непосредственного определения прочностных характеристик по их поверхностям.

Реологические свойства льда определяются на основе теории линейных наследственных сред с использованием в качестве функции ползучести степенной зависимости. Параметры ползучести  $\alpha$  и  $\delta$  определяют в лабораторных условиях при поперечном изгибе и одноосном сжатии. На 1-м этапе устанавливают пределы прочности и общий характер деформирования, на 2-м этапе – характер развития реологических процессов и определяют параметры ползучести образцов льда во всем диапазоне изменения нагрузок.

Основой методики расчета является вероятностная имитационная модель формирования ледовых нагрузок, основанная на выводе функции распределения параметров ледового режима и имитации возможных ситуаций, характеризуемых случайным сочетанием значений входных параметров [6]. На основе разработанных расчетных моделей взаимодействия «лед-сооружение» можно выполнять расчеты режима нагружения сооружений за жизненный цикл, для чего используются разработанная Беккером А.Т. модель процесса механического взаимодействия ледяных полей с сооружением. В результате численного моделирования определяются вероятностные характеристики ледовой нагрузки, контактного напряжения в ледяной плите, длины пути взаимодействия, глубины истирания материала корпуса конструкции и т.п.

На запатентованном испытательном стенде Ледовой лаборатории ДВФУ с помощью эмпирической модели абразии бетона выполнены расчеты ежегодной/суммарной абразии материала конструкции [1, 2]. Необходимые для расчета значения общей глубины ледовой абразии бетона, контактное напряжение в ледяной плите  $\sigma$  и длина пути истирания определяются на основании теоретических исследований, разработанного алгоритма и компьютерные программы расчета, на которые получены три патента.

Взаимодействия между ЛО и сооружением является сложным явлением с влиянием различных факторов. Глобальная нагрузка определяется по среднему контактному давлению, однако локальное давление неравномерно и зависит от кристаллической структуры и других факторов [8].

Крайне актуально сейчас обеспечить изучение механических свойств льда и ЛО в целом для идентификации количественных зависимостей прочности материала. Для этого необходимы модели, описывающие поведение ЛО, установление связей между измерениями, природным состоянием, методами испытаний.



Изучение закономерностей поведения ЛО, построение моделей и методов расчета процессов взаимодействия ЛО с сооружениями и разрушения ЛО на основе дискретно-континуальных и численно-аналитических методов развивается сотрудниками центра «Арктика» ДВФУ.

В классе моделей дискретных сред выделены модели блочных сред. Поле состоит из блоков с реальными размерами, учитываются силы взаимодействия между блоками как распорной зернистой (гранулированной) среды. В принятом нами подходе иерархическая структура неоднородных ЛО представлена в виде следующих уровней элементов системы: поля; структурные блоки и микроблоки [2].

Макромодели обтекания МНГС потоком ЛО можно разделить на три группы:

- 1) кинематические типа Лайтхилл-Уитмена и др.);
- 2) модели 2-го порядка;
- 3) модели на основе кинетических уравнений.

Нами использована кинематическая модель на основе следующих допущений.

Суть метода заключается в представлении ЛО в виде дискретной модели, составленной из блоков различной формы и конфигурации [3]. Движение блоков идет вдоль линий тока, изучаемых в абсолютной и относительной системе координат. Используется подход теории транспортных потоков с соблюдением баланса масс и контактных взаимодействий ледяных блоков между собой и с опорами сооружения.

Ледовые блоки находятся в стадии неустойчивого гидростатического равновесия, нарушаемого эндогенными и экзогенными процессами. Они находятся в непрерывном движении, которое характеризуется различной направленностью и интенсивностью в зависимости от изменения нагрузочных факторов. Блоки образуют матричный каркас, а между блоками – заполнитель в виде дисперсной фазы.

Распределение напряжений в блоках на их интерфейсах принимается согласно коэффициентам распределительной способности для зернистой среды. Уравнение баланса количества движения связывает нагрузку с изменением компонент радиального напряжения, а поток импульса определяется давлением и орбитальной скоростью блоков, вкладом турбулентных пульсаций скорости блока, и потоком импульсов в «активной» зоне деформации.

Скорость деградации при ударных воздействиях ЛО определяется уравнением Аррениуса. Параметр «температуры» определяет режим нагружения, а для ЛО – режим движения потока (гравитационный или

вязкостный). Деградация бетона сопровождается накоплением дефектов, фрагментацией и трещинообразованием. Предлагаемый подход позволяет моделировать различные сценарии взаимодействия «лед-сооружение» на единой базе с учетом инструментов современных информационных технологий.

### 1.3. Мониторинг МНГС

Теоретические исследования должны подкрепляться расширением знаний о реальных процессах и их индикаторах для конкретного района расположения будущих МНГС. Проведение инженерных изысканий является дорогостоящим и длительным процессом. По требованиям норм данные должны быть получены за период не менее пяти лет. Поэтому технологии изысканий, контроля и мониторинга должны совершенствоваться с учетом типа и конструктивных особенностей сооружений, функционального назначения и природно-климатических условий и т.д. Целью является повышение информативности, оперативности и доступности анализов, объективный выбор способов поддержания эксплуатационной надежности и безопасности МНГС.

Техническая диагностика основывается на иерархической структуре контроля сложной системы, включающей «контрольные операции – диагностические процедуры – элементарные проверки». На каждом этапе существуют комплексы неопределенностей разной значимости.

На первом этапе, этапе сбора данных, неопределенности информации характеризуется следующими факторами: нечеткость, неоднозначность, неполнота, противоречивость, неточность, достоверность (субъективные и объективные искажения) и т.п.

На втором этапе анализа информации: погрешности после обработки данных и при выполнении расчетов на ЭВМ, несоответствие признаков отказов и дефектов реальной картине, погрешности анализа, несбалансированный набор индикаторов, ошибочные весомости индикаторов, неточность оценок, влияние системы резервирования, влияние организационно-технологических факторов, недооценка критичности несоответствий и т.п.

На третьем этапе синтеза знаний и принятия решений: нечеткость целей и критериев, неполнота знаний о предметной области, неточность оценок эффективности решений, прогнозов последствий решений и т.п.

Методика контрольных операций и проверок приведена в нормативных документах, но в них уделено мало внимания таким диагностическим процедурам, как сравнение, идентификация, интерпретация, клас-

сификация. Эти процедуры слабо формализуются, и их выполнение возлагается на инспекторов технического контроля, квалификация и опыт которых может сильно различаться.

Мониторинг должен быть комплексным с применением дистанционных средств (донные станции, полузатопленные и плавучие буи, подводные роботы, аэро- и спутниковая съемка GLANAS, NASA, RADARSAT и GEOSAT), а также локальные контактные измерения (вертолетные десанты, ледокольные экспедиции). Экспедиционные методы, когда судно должно пройти непосредственно через район предполагаемого строительства, ограничены длительностью наблюдений. Если исследования верхнего уровня (экспедиционные методы, спутниковый мониторинг) активно используются, то наблюдения нижнего уровня с помощью донных и притопленных наблюдательных станций, плавающих и заякоренных буев, беспилотных летательных и подводных аппаратов недостаточны для перспективных районов Карского и других морей. Однако без контактных методов невозможно создать многомасштабную информационную модель, которая должна основываться на длительных рядах наблюдений параметров среды, выделения сезонных и стохастических вариаций и т.д.

Необходим учет возможных реализаций запредельных нагрузок и природных воздействий, скачкообразных изменений напряженно-деформированного состояния конструкций объекта в процессе его жизненного цикла, что позволит уточнить модели угроз. Анализ сценариев позволяет выбрать конструкции и их элементы, которые должны подлежать контролю в процессе эксплуатации объекта.

Цель мониторинга включает в том числе и наблюдение за состоянием системы «МНГС – грунтовое основание – внешняя среда» для обеспечения структурной целостности, функциональной работоспособности и безопасности сооружения.

Задачи мониторинга:

- выбор объектов контроля (наиболее ответственных элементов конструкций, определение в них опасных сечений и контрольных точек для установки измерительных приборов);
- выбор методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или создание средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- проведение инструментальных и визуальных наблюдений;
- определение состояния конструкций по данным сопоставления натуральных наблюдений с результатами расчетов или с критериальными характеристиками;
- выработка рекомендаций по эксплуатации.

Система мониторинга включает:

Уровень I – первичные датчики и измерительные системы (сейсмографы датчики, давления, акселерометры, тензодатчики и т.д.).

Уровень II – оборудование для сбора, преобразования информации, полученной от первичных датчиков и приборов, в цифровой вид, сохранение с присвоенной меткой реального времени и передачу информации на уровень III.

Уровень III – оборудование для приема информации, визуализации, накопления архивов и результатов расчетов.

Технология работ для надводной и подводной зон ледостойких МНГС различна вследствие использования различных технических средств. В надводной зоне для доступа к поверхностям МНГС используются лестницы (где они имеются), смотровые люки и проходы внутри шахт, плавсредства. Для оптимизации проведения работ освидетельствование проводится в два этапа:

- 1) зонирование на основе визуального осмотра и выборочных измерений с целью идентификации бездефектных участков (в пределах поля допусков);
- 2) детальное обследование с целью установления границ дефектных зон и идентификации причин возникновения дефектов.

В подводной зоне используются водолазы и подводные роботы различных видов в зависимости от задач. Подводное освидетельствование зонировано по высоте по способу проведения работ:

- а) зона переменного уровня, где скорость деградации наибольшая и выше вероятность обнаружения дефектов;
- б) глубинная зона.

Для визуального осмотра внутренних пространств шахт опорных колонн МНГС используются специальные каналы доступа, через люки доступа в верхних строениях, связывающие нижний и верхние настилы МНГС, а также каналы доступа для малогабаритных подводных роботов к нижней шахте стояков и к области фундаментного кессона.

Нами разработан комплекс моделей системы «объект-среда», адекватно отражающий происходящие взаимосвязанные процессы (механические, геологические, гидрологические, технологические и др.). Измерения проводятся на базе двух подходов: Эйлера, в котором анализ текущего состояния позволяет оценить величины нагрузок, и Лагранжа, в котором по известным величинам нагрузок оценивается текущее состояние элементов МНГС.

Рассмотрим интегральные и дифференциальные способы диагностики прочностных параметров льда и ледяных образований. Неопреде-

ленность, которая вызывается несовершенством методов отбора образцов для определения прочности льда, приводит к тому, что расчетные значения ледовых нагрузок завышаются. Испытания льда с учётом низких порядков структурных неоднородностей проводятся в натуральных условиях (in-situ).

Плотность льда в массиве с достаточной степенью точности (с погрешностью до 3%) можно определить с помощью гамма-метода, основанного на эффекте различной степени поглощения и рассеяния радиоактивного гамма-излучения в средах с различной плотностью. С этой целью в изучаемом участке массива льда бурят на расстоянии порядка 0,5 м друг от друга параллельные скважины. В одном помещают закрытый источник гамма-излучения, во втором помещают регистрирующий зонд с детектором. Перемещая зонды с источником и детектором вдоль скважин, фиксируют интенсивность гамма-излучения, по тарировочным графикам устанавливают плотность льда.

Деформационные характеристики льда определяют динамическим методом с применением ультразвуковых методов, импульсного метода с измерением времени распространения колебаний при ударе или взрыве и сейсмическим методом. Ультразвуковой метод может быть использован для определения скоростей упругих волн для определения деформационных свойств льда с учётом структурных неоднородностей 1-2 порядка. Сейсмический метод следует применять при исследованиях больших участков ЛО (сотни метров).

Нормативные методики расчета ледовых нагрузок используют такой параметр как кубиковая прочность льда, которая имеет большую вариацию, что требует применения больших значений коэффициентов условий работы и надежности. Профессором ДВФУ Цуприком В.Г. предложено использовать такой параметр как удельная энергия механического разрушения льда [8, 9]. Данный параметр может быть определен методом сброса шарика (индентора).

Индентор является мелкомасштабной моделью как для столкновения цилиндрической опоры с дрейфующим ледяным покровом, так и, например, вдавливания полусферы крупного заполнителя на бетонной поверхности вдвигающуюся поверхность ЛО. Способ основан на определении усилий при статическом или динамическом внедрении индентора в массив на заданную глубину, либо на определении глубины и/или площади внедрения индентора при заданном усилии внедрения. Во время проведения ежегодной Зимней школы по ледовой механике в кампусе ДВФУ в феврале 2015 г. в бухте Новик проведены очередные испы-

тания методом сброса шарика. Это позволит усовершенствовать процедуры проведения испытаний в полевых условиях (in-situ).

В формулу расчета глубины абразии входит эмпирический коэффициент абразии, определяемый в ДВФУ на испытательном стенде, созданном при содействии Роснауки и Фонда Бортника в 2007 г. Известна зависимость этого коэффициента от твердости льда и бетона, однако глубоких исследований этого явления не проводилось. Комплекс исследований динамической прочности провели сотрудники ДВПИ (сейчас ДВФУ) Н.Г. Храпатый и его ученики [8].

Предлагается использовать три инденторных способа: метод сброса стального шара (Drop Ball Method), метод отскока стального шара при скатывании со специального желоба с углом наклона  $45^\circ$ , и способ Бринелля. Различие в размере индентора: в первом случае шар имеет вес 1 кг, во втором порядка 100 г, В – размер индентора порядка 10 мм.

Предлагается дополнить их испытаниями на срез по исследуемой поверхности ледовых структурных неоднородностей, а также испытаниями на кручение. Это два близких способа, однако, при первом в плоскости среза поле напряжений неоднородное, вызывающее явление дилатансии. Кроме того по мере развития среза уменьшается площадь контакта, что вызывает большой разброс величин угла внутреннего трения и сцепления. Кручение (вращательный срез) обеспечивает постоянную площадь контакта для цилиндрических образцов.

Однако вышеупомянутые способы являются экспресс-методами и имеют относительно небольшую точность. К надежным способам относятся дорогостоящие испытания in-situ путем нагружения домкратом участков ледяного поля или прессиометром в скважине. Однако эти способы имеют высокую стоимость из-за необходимости проведения комплекса работ на ледяном поле для учета пространственной неоднородности, зависимости от температуры. Поэтому отсутствие представительной выборки по основным параметрам льда и ЛО требует применения математического моделирования и средне- и мелкомасштабного физического моделирования либо в ледовом бассейне, либо на натурном льду.

### Заключение

Суровые условия строительства и эксплуатации нефтегазопромысловых сооружений на арктическом шельфе требуют комплексного решения возникающих научно-технических проблем. Параметры дрейфующего льда определяют конструктивные решения опорной части платформ, влияют на его динамику, и существенно сказываются на параметрах

и формах разрушения ледяного поля при взаимодействии с конструкцией. Необходимо совершенствование методологии исследования ледовых нагрузок на МНГС. Структурные неоднородности ЛО различных масштабов должны определяться как интегральными, так и дифференциальными способами определения свойств.

Необходим учет возможных реализаций экстремальных нагрузок и воздействий, скачкообразных изменений состояния конструкций. Это позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ сценариев развития ситуаций, оценить риски. Управление безопасностью должно основываться на моделях взаимодействия сооружений со средой, современных компьютерных технологиях и анализе жизненного цикла объектов. Безопасная эксплуатация в значительной степени зависит от достоверного определения ледовой нагрузки и точности методов расчета с учетом структуры, свойств и механизмов разрушения льда.

Анализ проблем мониторинга в арктических условиях показал следующее. Проведение ледокольных экспедиций (с наличием вертолета для высадки «десанта») оправдывает себя на начальном этапе подготовки освоения конкретного месторождения, но основу баз геоданных должны составить мониторинговые измерения с помощью сети стационарных и мобильных станций.

Теоретическая часть работы выполнена по проекту №543 госзадания Минобрнауки РФ, экспериментальная – по гранту Научного фонда ДВФУ.

### Библиографический список

1. Bekker A.T., Uvarova T.E., Kim S.D. Abrasion effect of ice cover on supports of hydraulic engineering structures in conditions of Sakhalin island shelf // Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Honolulu, USA, 2003. P. 110-117.
2. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Physical and Mechanical Properties of Modeling Ice for Investigation of Abrasion Process on Ice-Resistant Offshore Platforms // Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China, 2010. P. 140-146.
3. Kim L.V. Kinematic analysis of the ice flow around offshore structures // Proc. 14th Int. conference on computing in civil and building engineering, Moscow, June 27-29, 2012. P. 202-209.
4. Problems of the ice cover abrading action on legs of concrete offshore structures // Proc. Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, Helsingfors, Finland, October 25-26, 2007. P. 45-58.

5. Shkhinek K., Blanchet D., Croasdale K. et al. Comparison of the Russian and foreign codes and methods for global load estimations // Proc. Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1994, Vol. 4. P. 75-82.
6. Беккер А.Т. Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. - Владивосток: Дальнаука, 2005. 361 с.
7. Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. - М.: Институт «Гипростроймост», 2005. 340 с.
8. Гомольский С.Г., Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. Исследования ударов твердого тела о лед // В кн.: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. - Л.: Энергия, 1979. С.73-76.
9. Цуприк В.Г. Теоретические исследования удельной энергии механического разрушения морского льда // Вестник НГУ. Серия: Математика, Механика, Информатика. Новосибирск, 2013. С. 119-125.