Гидротехническое строительство

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-12>
УДК 624.145+629.5.02

Л.В. Ким

КИМ ЛЕВ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы, e-mail: kim_lv@dvfu.ru
Дальневосточный федеральный университет
Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Безопасность мобильных морских буровых установок при обтекании потоком «контролируемого» льда

Аннотация: Выполнен анализ природных и техногенных опасностей для мобильных буровых установок, эксплуатируемых в замерзающих морях. Дана оценка уровня безопасности конструкции, определяющая зоны риска и скорость их роста. Отмечено, что снижение рисков возможно только при управлении ледовой обстановкой и определении критериев надежности и безопасности с учетом структурной целостности и живучести применительно к сочетаниям ледовых нагрузок с другими воздействиями.

В настоящее время из-за недостатка эксплуатационного опыта и высокой стоимости полевых работ возрастает роль физического и математического моделирования, создания программ управления ледовой обстановкой. В данной статье рассмотрено применение метода контрольного объема для анализа кинематического взаимодействия опоры со льдом. Приведены результаты модельных испытаний с гранулированной средой. Рассмотрена возможность применения данного метода для решения задачи расчета нагрузок от битого и тертого льда при моделировании ледовых потоков различной сплоченности.

Ключевые слова: безопасность, шельф, лед, буровая установка, структурная целостность, живучесть.

Введение

Ледостойкие мобильные буровые установки (МБУ) занимают промежуточное положение между судами ледового класса и ледостойкими стационарными буровыми установками (рис. 1). К ним относятся самоподъемные и полупогружные установки, буровые суда и технологические платформы. Они широко используются в разведочном бурении на шельфе, но в Арктике их применение ограничивают тяжелые природно-климатические условия, в частности короткий (менее 4 месяцев) навигационный сезон [7]. Повышение ледостойкости МБУ позволит повысить эксплуатационную эффективность за счет удлинения эксплуатационного периода [1, 8].

МНОЦ «Арктика» Дальневосточного федерального университета под руководством проф. А.Т. Беккера выполнил ряд НИОКР по данной тематике по заказу Арктического научного центра, ПАО «НК «Роснефть», ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Минпромторга РФ [1]. Темы исследований связаны с вопросами обеспечения ледовой безопасности МБУ на Арктическом шельфе.

Безопасность МБУ и его составных частей в значительной мере зависит от достоверности определения величин ледовых нагрузок. Воздействие ледовой обстановки (ЛО) на опорную часть установки может приводить к вибрациям технологического оборудования, трубо-

проводов, несущих конструкций, следствием чего могут быть повышение частоты утечек на фитингах и возникновения усталостных трещин в зонах концентрации напряжений, а также повреждения в подвижных элементах оборудования.

Необходимость оценки надежности и безопасности МБУ объясняется большим количеством неопределенностей при проектировании, например непредусмотренными или недооцененными воздействиями [21], которые могут привести к локальным повреждениям частей и элементов МБУ либо к ее гибели. Актуальность данной оценки возросла с учетом роста разведочного бурения на Арктическом шельфе при технологических ограничениях из-за западных санкций.

Рис. 1. Ледостойкая полупогружная буровая установка (ПБУ).

При проектировании МБУ используются как нормы Морского регистра судоходства, так и нормы нефтегазовой отрасли [2, 3], что отражается в методологии проектирования и анализа их безопасности. В частности, производится анализ структурной целостности (structural integrity) и живучести (robustness), который необходим при сверхпроектных нагружениях и допущении отказов отдельных частей и элементов системы, гарантировании запаса времени для эвакуации персонала [4].

История нашего исследования имеет хорошую теоретическую базу. Так, большой вклад в развитие теории структурной целостности внесли В. Crowder, Е. Williamson, D. Billow, J. Crawford, Н. Lew, J. Gilmour, U. Strarossek, T. Canisius, В. Ellingwood, Н. Kraminker и др. Критерии структурной целостности использованы в нормах API RP2 SIM [9], ISO [15], NORSOK [19], DNV-OS-C502 [12] и др. Вопросы теории надежности изложены в трудах Гнеденко Б.В., Беляева Ю.К., Соловьева А.Д., Болотина В.В. и др. Из зарубежных ученых следует отметить работы Барлоу Р., Прошана Ф., Калабро С.Р., Базовского Н.В., Смит В., Кофмана А. и др. Применительно к морским платформам проблему изучали Богатырева Е.В., Лобас И.Г., Крапивский Е.И., Вишневская Н.С. и др. Критерий надежности в применении к морским платформам рассматривался в работах Харченко Ю.А., Калашникова П.К., Балагура С.В. и др. Благодаря работам Рябина И.А., Догодонова А.Г., Шербистова Е.И., Крапивина В.Ф., Парфенова Ю.М., Флейшмана Б.С., Котельникова В.А. в последние годы получила развитие теория живучести морских платформ. Наконец, основой для дальнейших исследований послужили работы Стрелецкого Н.С., Абовского Н.П., Шапиро Г.И. и др.

В нормативных документах понятие структурной целостности и живучести часто приравниваются. Например, согласно [3], «конструктивная целостность (живучесть) (structural integrity (structural robustness)) – способность сооружения при таких событиях, как пожар, взры-

вы, удар, или вследствие человеческих ошибок избежать повреждений, не пропорциональных первоначальной причине». Здесь термин «конструктивная целостность» заменен на «конструктивная надежность». Кроме того, еще целый ряд моментов остается непроработанным.

Отсюда цель нашего исследования: обоснование методологии анализа структурной целостности и живучести при проектировании МБУ при ледовых воздействиях.

Прежде всего нам необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить анализ существующих подходов и методов оценки структурной целостности и живучести МБУ.
2. Разработать положения кинематического моделирования взаимодействия в системе «МБУ–ЛО», включающие определение полей скоростей, идентификации различных областей деформирования и движения ледяных потоков вокруг МБУ.

Термины «живучесть» и «структурная целостность»

Живучесть – это комплексное свойство, частичная работоспособность при наличии запредельных нагрузок. Элементарные свойства, входящие в понятие живучести, – сопротивляемость и восстанавливаемость. Приведем толкования термина: в ИСО 19902 – «...способность сооружения противостоять событиям с разумной вероятностью возникновения, не будучи поврежденными до такой степени несоразмерной причине»; в EN 1991-1-7 – «...способность сооружения противостоять событиям, таким как пожар, взрывы, удар или последствия человеческой ошибки, без значительного снижения работоспособности».

Одним из первых было предложение оценки живучести с помощью индекса надежности [15]. Позднее предложен индекс уязвимости, отражающий увеличение вероятности отказа, вызванного повреждением [19]. В ИСО 19902 используется коэффициент запаса прочности RSR. Влияние отказа конкретного конструктивного элемента учитывается коэффициентом повреждения RIF. Определение живучести на основе методов риска предложено Б.Р. Эллингвудом [13], Бэкером и соавторами [10] с использованием индекса живучести. Данный индекс отражает долю прямого риска (прямой риск связан с первоначальным ущербом + косвенный риск, связанный с последующим отказом из-за экстремального нагружения).

Структурная целостность – это комплексное свойство, способность сохранять несущую способность при отказе отдельных конструктивных элементов с подключением при необходимости других элементов. МБУ должно достичь нового деформированного состояния равновесия без разрушения всей конструкции. МБУ в поврежденном состоянии должна обеспечить остановку технологической системы, локализацию инцидента или аварии, безопасную эвакуацию персонала.

Элементарные свойства, входящие в структурную целостность, – это адаптивность, отказоустойчивость/помехоустойчивость [8]. Сопротивляемость – свойство, характеризующее способность противостоять каким-либо внешним воздействиям, не допуская повреждений элементов МБУ. Сопротивляемость, в свою очередь, определяется устойчивостью и защищенностью.

Адаптивность – свойство, характеризующее способность сохранять функциональные возможности при каких-либо повреждениях элементов. Адаптивность определяется непотопляемостью, автономностью и реконфигуративностью.

Восстанавливаемость – свойство, характеризующее способность восстанавливать функциональные возможности при каких-либо поражениях или повреждениях элементов для временного восстановления необходимых функций. Восстанавливаемость делится на самовосстанавливаемость и аварийную восстанавливаемость.

Управление структурной целостностью (structural integrity management) включает [9]:

- выбор материалов;
- разработку критериев опасности дефектов;
- проведение оценки усталости и разрушения материала элементов;
- разработку требований неразрушающего контроля.

Особое предельное состояние при ледовых воздействиях

В нормах введено понятие особого предельного состояния (ALS) для оценки коэффициента безопасности запределных деформаций в случае воздействия экстремальных нагрузок, возможных инцидентов и аварий. Такое состояние оценивается с помощью критерия живучести. Расчеты должны выполняться с учетом нелинейных и неупругих деформаций по деформированной схеме конструкции.

Для ледостойких МБУ наиболее вероятно особое предельное состояние при ледовых воздействиях. Однако в нормах рассматриваются частные сценарии воздействия какого-либо типа ЛО, что связано с малым объемом знаний. Следовательно, должны быть выявлены все опасности для МБУ на основе сценариев, выполнен анализ рисков, предложены конструктивные, организационные и технические меры [1].

Результаты оценки рисков МБУ сильно зависят от допущений моделей и сценариев аварии и качества исходных данных, в том числе достоверности данных по частоте отказов и аварий. Необходим учет возможных реализаций запределных нагрузок и природных воздействий, скачкообразных изменений напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов, что позволит уточнить модели опасностей, рассмотреть наиболее вероятные и опасные сценарии.

Зарубежные нормы API RP 2N и CSA S471 рекомендуют использовать расчетные показатели надежности, которыми являются вероятность наступления отказа и период повторяемости ледовой нагрузки. В отечественных нормах уровень надежности определяется нормируемыми значениями нагрузок и прочности материала, условиями работы конструкции и другими факторами. Проверка особого предельного состояния (ALS) должна выполняться для расчетных сценариев с особыми нагрузками (ALIE), где используют нелинейные методы расчета с учетом пластических свойств конструктивных элементов, эффектов пластичности и диссипации энергии.

Как отмечено в отчете [7]: «Основным препятствием для проектирования безопасных и рентабельных конструкций для применения на Крайнем Севере является отсутствие знаний и данных об эффекте ледовых нагрузок в их разнообразных формах, и в особенности в сочетании с другими нагрузками со стороны внешней среды (волны, ветер и т.д.) и колебанием конструкций».

Модель потоков «контролируемого» льда

Управление (контроль) ледовой обстановкой (УЛО, ice management) – это комплекс организационных и технических мероприятий по снижению уровня или предотвращению ледовых воздействий на МБУ. На настоящий момент при разработке плана УЛО основным является определение границ зон безопасности и временных интервалов реагирования. Ключевая цель эксплуатации МБУ – выполнение при экстремальных ситуациях не всех, а только ключевых функций МБУ, т.е. второстепенные функции могут быть либо «ослаблены», либо полностью выключены.

Система УЛО включает следующее: обнаружение ЛО; оценка угрозы потенциально опасных ЛО или ледовой обстановки в целом; мониторинг гидрометеорологической обстановки; мероприятия – физические (применение ледоколов, очистка акватории от льдов, буксировка айсбергов) и организационные (остановка технологического процесса, отсоединение и отвод МБУ с точки, эвакуация персонала).

Важнейшими характеристиками при реализации УЛО являются ледовые качества МБУ, т.е. его способность противостоять ледовым явлениям водного и атмосферного характера с целью обеспечения безопасности плавания и поддержания эксплуатационно-технических характеристик. В состав набора ледовых качеств входят: местная ледовая прочность корпуса и элементов движительно-рулевого комплекса, ледовая ходкость и маневренность, а также работоспособность судовых систем, устройств и механизмов. В настоящее время нормируется только прочность корпусных конструкций с присваиванием ледовой категории.

В связи с недостатком эксплуатационного опыта и высокой стоимостью полевых исследовательских работ первое место при разработке теории УЛО отводится задачам физического и математического моделирования. Следует подчеркнуть важность кинематических исследований, т.е. определения поля скоростей, идентификации различных областей движения ЛО вокруг МБУ. При проведении модельных испытаний для этого проводят видеофиксацию движения отдельных ЛО по всей площади ледового бассейна.

Деформационные характеристики льда, в отличие от плотностных, обуславливаются их механическими свойствами, а также особенностями расположения узлов конструкции МБУ. ЛО может находиться в трех структурно-механических состояниях [1]: твердого, пластичного и гранулированного. Прочность льда на местное смятие превосходит предел прочности на одноосное сжатие в несколько раз, и в каждом конкретном случае будет зависеть от размеров и геометрии ледорезного элемента МБУ, а также от скорости подхода, толщины и размеров ЛО [2]. Основными факторами, определяющими ледовые качества МБУ, являются параметры ЛО и расчетные сценарии нагружений.

Энергия потоков ЛО создает большие локальные (пульсационные) нагрузки, превышающие соответствующую глобальную нагрузку в 3–4 раза.

Существует множество численных методов моделирования ледовых потоков. Канадские исследователи предложили 3 базовых сценария воздействия «контролируемого» льда [11].

1. Крупнобитый лед с обломками размером порядка размера МБУ.
2. Мелкобитый лед.
3. Тертый лед.

Нами исследован вопрос применимости метода контрольных объемов, дополненный введением фиксированных областей движения ЛО и задаваемых линий тока (ЛТ) в указанных областях. Первым приближением является решение теории комплексных переменных для идеальной жидкости. Здесь контрольный объем – ячейка структурированной сетки, образованной ЛТ. Теоретическое обоснование метода контрольного объема применительно к задаче обтекания тел дано в работе [5]. В основе метода лежит разбиение области на непересекающиеся контрольные объемы с узловыми точками пересечения ЛТ, в которых определяются скорости потока.

Приняты следующие допущения [17].

1. Физическая интерпретация опирается на геометрическое представление: по Эйлеру – на фиксированной сетке КО (конечный объем), по Лагранжу – с фиксацией законов сохранения масс КО.

2. Такты движения КО делятся на 3 этапа: 1) вычисление кинематических параметров КО в Эйлеровых координатах; 2) Лагранжевы КО участвуют в свободном движении; 3) согласование деформаций согласно закону массопереноса.

3. Активная зона деформации имеет форму эллипса с размером $7D$ по длинной оси и $4D$ – по короткой (рис. 2).

4. В активной зоне возможны 3 режима потока по аналогии с теорией транспортных потоков [16]: а) свободный поток ледовых обломков F ; б) синхронизированный поток S ; в) широкий блок J .

5. Сетка в абсолютной системе строится по решению Фламана.

6. Сетка в относительной системе строится по ЛТ путем суммирования векторов абсолютной и переносной скоростей, а величина вектора – по аппроксимационной функции [17].

7. Принято условие прочности Кулона–Мора на контактной поверхности.

8. Использование уравнений массопереноса, где расчет полей абсолютных скоростей производится по теореме сложения скоростей (относительных и переносных). Граничные условия включают нулевые скорости на границе активной зоны деформации и профиль поперечной скорости по оси y (рис. 2). Профиль принимается при экспериментально установленном форм-коэффициенте профиля скорости в пограничном слое опоры МБУ.

9. Возможны 3 вида течения в сдвиговой области с различными его режимами (область обтекания, уплотненное ядро, область разрежения и пограничный слой): а) неразвитое при $v < v_{cr}$, профиль скорости имеет вогнутую форму; б) скользящее $v = v_{cr}$, профиль скорости треугольный; в) развитое $v > v_{cr}$, профиль скорости параболический. Здесь v – скорость потока, равная скорости движения опоры; v_{cr} – критическая скорость потока.

Рис. 2. Построение ЛТ переносных и относительных скоростей с формированием сетки КО [17].

При обтекании МБУ льдом возможны контактные схемы: отсутствие трения (локализация пластической полосы течения); промежуточные схемы и полное сцепление (образование уплотненного ядра с формированием активной зоны сжатия).

В сдвиговой зоне возможны два режима: быстрое сдвиговое и пластическое течение. Блоки движутся по определенным траекториям, находясь в длительном контакте друг с другом, происходящем в режиме либо скольжения, либо переката. Внутренние напряжения подчиняются закону сухого трения. В статическом случае плотной упаковки, характеризующейся постоянным взаимным контактом ЛО, получаем деформируемое твердое тело.

Уравнения равновесия в форме равенств для условий сплошной среды выполняются статистически, т.е. в среднем для какой-либо области. Вместо уравнений совместности деформаций используются уравнения массопереноса.

Задача I (абсолютная система координат). Вектор абсолютной скорости блока в виде суммы относительной и переносной скоростей. Активная зона деформации имеет размер $7D$ по длинной оси эллипса ($API\ 2N$) и $4D$ – по короткой.

Задача II (относительная система координат). Находится образование переносных перемещений в пределах активной зоны путем задания граничных условий на оси y , перпендикулярной направлению движения, в зависимости от вязкопластических свойств льда (коэффициента вязкости).

Обсуждение результатов

Для анализа используем известные результаты моделирования транспортных потоков по модели потенциального течения. На рис. 3 показаны виды потоков в зависимости от сплоченности.

Рис. 3. Три фазы ледового потока по аналогии с моделями транспортных потоков [16].

Свободный поток. ЛО движутся без взаимодействия между собой.

Синхронизированный поток. При высоких скоростях сдвига (критерий Фруда) контакты ЛО становятся кратковременными (точечными). Напряжения генерируются за счет передачи импульсов и поперечного массопереноса и пропорциональны квадрату скорости сдвига. Это объясняется одновременным, пропорциональным возрастанием величины импульсов и их числа в единицу времени с увеличением скорости сдвига.

Движение в «пробке». Характеризуется наличием устойчивых связей между ЛО. Деформации происходят в виде прерывистых сдвигов. Для описания потоков малосплоченного льда имеем несвязное состояние с кратковременными контактами ЛО. В сдвиговой зоне возможны два идеализированных режима течения ЛО: быстрое сдвиговое течение и «медленный» сдвиг (пластическое течение). ЛО движутся по определенным траекториям, находясь в длительном контакте друг с другом в режиме либо скольжения, либо переката. Внутренние напряжения подчиняются закону сухого трения. Образуется локализованная сдвиговая полоса неоднородной деформации. При высокой сплоченности образуется одна полоса сдвига, толщина которой зависит от вязкопластических параметров. Ширина полосы уменьшается с ростом напряжения.

Старт-стоп движение. Напряжения в ЛО возникают вследствие переноса импульса в неньютоновской жидкости и приводят к существенной зависимости от скорости сдвига. Возникают «вязкие» эффекты в поперечном направлении, когда из слоя в слой передаются дополнительные количества движения. При низкой сплоченности ледового покрова напряжение изменяется пропорционально квадрату скорости сдвига, а при более высоких концентрациях степень влияния скорости сдвига уменьшается.

В активной зоне возникают область сжатия и боковые сдвиговые области. В стационарном состоянии ЛТ совпадают с траекториями движения КО. В плане линии тока отклоняются от радиальных прямых линий в направлении движения образования под действием вращающего момента, создаваемого торможением со стороны медленнее движущихся КО в сдвиговых областях.

В боковых сдвиговых областях КО деформируются как неньютоновская жидкость с гиперболической зависимостью установившейся скорости ползучести от девиатора напряжения и экспоненциальной зависимостью от температуры. Вследствие различия скоростей узловых точек КО имеют относительную сдвиговую скорость, а также поперечный массоперенос в сдвиговом потоке.

Связное состояние характеризуется наличием устойчивых связей между КО. Однако модели связанных КО нельзя применить для описания потоков малосплоченного льда, так как он характеризуется кратковременными контактами ЛО, нарушением связей между ними, наличием интенсивного перемешивания.

Направления перемещения КО зависят от баланса моментов сил, действующих на него относительно оси, проходящей через опорные контактные точки. В отсутствие ударных импульсов при сдвиговой деформации основными силами, определяющими динамику взаимодействия КО, будут силы трения и тяжести.

Контактная область увеличивается пропорционально времени приложения нагрузки; соответственно, чем медленнее движется лед, тем больше площадь контактной поверхности. Размер уплотненного ядра постоянен и составляет 3 диаметра опоры (рис. 4).

Рис. 4. Линии тока обтекания двух опор ППБУ в гранулированной среде. Системы координат: а – абсолютная, б – относительная [17].

Заключение

Итак, выбор конструкции МБУ зависит от ледовых нагрузок. Их достоверное определение возможно только с учетом структуры, свойств и механизмов разрушения льда. А так как в настоящее время недостаточно изучены процессы взаимодействия ЛО с конструкциями МБУ, закономерности изменения ледовых нагрузок, физико-механические и прочностные свойства морского льда, очевидно, что необходим подход, базирующийся на учете сочетаний возможных экстремальных воздействий и риск-менеджмента.

Анализ материалов и опыт эксплуатации МБУ позволяют сделать следующие выводы.

1. Необходимо уточнение критериев живучести и структурной целостности МБУ для конкретных ледовых условий рассматриваемого лицензионного участка. В первом приближении данные критерии должны быть разработаны на основе испытаний и моделирования.

2. Метод КО имеет ряд преимуществ: позволяет учесть широкую изменчивость расчетных характеристик и закономерности их изменения в зависимости от видов и размеров ЛО на основе кинематического подхода.

3. Сравнение кинематических картин ледовых потоков, полученных при физическом и математическом моделировании, дает возможность провести верификацию экспериментальных и модельных результатов.

Направление дальнейших исследований – изучение закономерностей поведения ЛО, построение моделей и методов расчета процессов взаимодействия ЛО с МБУ и разрушения ЛО на основе метода контрольного объема, который достаточен для решения инженерных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беккер А.Т., Ким Л.В. Безопасность шельфовых сооружений при воздействии дрейфующих ледяных образований // Наука и безопасность: электрон. журн. 2015. № 15. С. 79–88.
2. ГОСТ Р ИСО 19906. Арктические морские сооружения.
3. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности.
4. Грабарева А.Д. Критерии «живучести» и «структурная целостность» для плавучих буровых установок в ледовых условиях // Актуальные вопросы в науке и практике: Вторая междунар. науч.-практ. конф., 2017. Уфа: Изд-во Дендра, 2017. Т. 2, № 1(2). С. 61–71.
5. Михайлов А.В. Физическая теория катастроф. СПб.: Реноме, 2009. 129 с.
6. НД № 2-020201-013. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Российский морской регистр судоходства, 2014.
7. Оценка международных стандартов для безопасной разведки, добычи и транспортировки нефти и газа в Баренцевом море. Гармонизация стандартов по охране труда, промышленной безопасности и охране окружающей среды для работ в Баренцевом море. Российско-Норвежский кооперационный проект «Баренц-2020». Окончательный отчет. Осло; Москва. 136 с.
8. Харченко Ю.А., Калашников П.К., Тер-Саркисов Р.М. Живучесть плавучих нефтегазовых комплексов судового типа, предназначенных для работы в Арктической зоне // Территория Нефтегаз. 2017. № 3. С. 74–78.
9. ANSI/API Recommended practice. Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures. American Petroleum Institute.
10. Baker I.W., Schubert M., Faber M.H. On assessment of robustness. J. Structural Safety. 2008(30): 253–267.
11. Croasdale K.R., Bruce J.R., Lifero P.A. et al. Sea ice loads due to managed ice. Proc. 20th Port and Ocean Arctic conference (POAC), June 9–12, 2009, Lulea, Sweden, p. 27–36.
12. DNV-OS-C502. Offshore Concrete Structures. Det Norske Veritas, 2012.
13. Ellingwood B.R. Strategies for mitigating risk of progressive collapse. Proc. ACSE Structures Congress, 2015, p. 5–6.
14. Frangopol D.M., Curly J.P. Effects of damage and redundancy on structural reliability. J Structural Eng, 1987(113);7:1533–1549.
15. ISO/DIS 19900. Petroleum and natural gas industries – General requirements for offshore structures.
16. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. Berlin: Springer, 2009. 430 p.
17. Kim L.V. Kinematic study of ice flow around offshore structures. Proc. Int. conference on the Okhotsk sea and sea ice. Mombetsu, Japan, 1993, p. 167–171.
18. Lind N.C. A measures of vulnerability and damage tolerance. Reliability Eng. & System Safety. 1995(48);1:1–6.
19. NORSOK Standard Z-013. Risk and emergency preparedness analysis.
20. Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures. ANSI/API Recommended practice. American Petroleum Institute.
21. Tsuprik V.G., Zanegin V.G., Kim L.V. Model of the Cyclic Fracture of Sea Ice. Proc. 13th ISOPE Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium. Jeju, Korea, October 14–17, 2018, p. 112–118.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-12>

Kim L.

LEV KIM, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: kim_lvl@dvfu.ru
Offshore & Structural Engineering Department, School of Engineering
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Safety of mobile offshore drilling units under managed ice impacts

Abstract: The problems of ensuring the safety of mobile drilling units (MODU) for exploratory drilling in freezing seas by identifying all hazards are considered. Safety prediction consists in determining the risk zone and its growth to the permissible value established for specific scenarios based on comprehensive studies (tests, different types of modeling). Risk reduction is possible only when managing ice conditions (ice management), defining reliability and safety criteria with regard to structural integrity and survivability in relation to their types and combinations of ice loads with other influences. Ice loads require a reliable determination of the structure, physical-mechanical and strength properties and mechanisms of ice destruction. The paper deals with the concepts of structural integrity and robustness of bearing elements of MODU in the interface zone with ice formations. Due to the lack of operational experience and the high cost of field research, the tasks of physical and mathematical modeling come to the fore when developing program of ice management. The ice flow parameters determine the design decisions of the support part of the MODU, the parameters and forms of the destruction of the ice. The application of the control volume method for the analysis of kinematic interaction in the MODU-ice system, including the determination of various areas of ice flow around the MODU, is considered. The results of model tests with a granular medium (ice analogue material) are given. The possibility of applying this method to solving the problem of ice forces from “managed” ice to simulate ice streams of various cohesion is considered.

Keywords: safety, MODU, ice, offshore, structural integrity, robustness.

REFERENCES

1. Bekker A.T., Kim L.V. Safety of offshore structures under action of drifting ice features. *Science and Safety: Electronic J.* 2015(15):79–88.
2. GOST R ISO 19906. Arctic offshore structures.
3. GOST R ISO 2394-2016. Building structures. Main principles of reliability.
4. Grabareva A.D. Criterium “robustness” and “structural integrity” for floating drilling units in ice conditions. *Actual problems in science and practice: II International scientific-practical conference.* 2017. Ufa: Dendra Publishing, 2017. Vol. 2, N 1(2). P. 61–71.
5. Mikhailov A.V. *Physical theory of catastrophes.* Saint-Peterburg, Renome Publishing, 2009. 129 p.
6. ND 2-020201-013. The rules of classification, construction and equipping of floating drilling units and marine stationary platforms. Russian Marine register of shopping, 2014.
7. Assessment of international standards for safe exploration, production and transportation of oil and gas in the Barents Sea. Harmonisation of Health, Safety, and Environmental Protection Standards for the Barents Sea. Russian-Norwegian cooperation project “Barents-2020”. Final Report. Oslo, Moscow. 136 p.
8. Kharchenko Y.A., Kalashnikov P.K., Ter-Sarkisov R.M. The Persistence of Floating Oil and Gas Marine Systems, Designed for Operation in The Arctic Zone. *Territory Neftegas.* 2017(3):74–78.

9. ANSI/API Recommended practice. Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures. American Petroleum Institute.
10. Baker I.W., Schubert M., Faber M.H. On assessment of robustness. *J. Structural Safety*. 2008(30):253–267.
11. Croasdale K.R., Bruce J.R., Liferov P.A. et al. Sea ice loads due to managed ice. *Proc. 20th Port and Ocean Arctic conference (POAC)*, June 9–12, 2009, Lulea, Sweden, p. 27–36.
12. DNV-OS-C502. Offshore Concrete Structures. Det Norske Veritas, 2012.
13. Ellingwood B.R. Strategies for mitigating risk of progressive collapse. *Proc. ACSE Structures Congress*, 2015, p. 5–6.
14. Frangopol D.M., Curly J.P. Effects of damage and redundancy on structural reliability. *J Structural Eng*, 1987(113);7:1533–1549.
15. ISO 19900. Petroleum and natural gas industries – General requirements for offshore structures.
16. Kerner B.S. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin: Springer, 2009. 430 p.
17. Kim L.V. Kinematic study of ice flow around offshore structures. *Proc. Int. conference on the Okhotsk sea and sea ice*. Mombetsu, Japan, 1993, p. 167–171.
18. Lind N.C. A measures of vulnerability and damage tolerance. *Reliability Eng. & System Safety*. 1995(48);1:1–6.
19. NORSOK Standard Z-013. Risk and emergency preparedness analysis.
20. Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures. ANSI/API Recommended practice. American Petroleum Institute.
21. Tsuprik V.G., Zanezin V.G., Kim L.V. Model of the Cyclic Fracture of Sea Ice. *Proc. 13th ISOPE Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium*. Jeju, Korea, October 14–17, 2018, p. 112–118.