

УДК 629.124.791

Применение метода дискретных элементов для численного моделирования воздействия битого льда на заякоренные объекты

Е.Б. Карулин^{1*}, М.М. Карулина¹

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Российская Федерация, 196158, г. Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44

* E-mail: e_karulin@ksrc.ru

Ключевые слова: турельное судно, численное моделирование, система заякорения, ледовые нагрузки, битый лед, метод дискретных элементов.

Тезисы. В статье приводится описание численной модели, позволяющей исследовать поведение в ледовых условиях одного из типов заякоренных плавучих объектов, а именно турельного судна. Турельное судно – плавучее сооружение судовой формы, удерживаемое на месте с помощью якорных связей, закрепленных к поворотному барабану (турели) внутри судна. Турель позволяет судну поворачиваться вокруг ее оси. При этом горизонтальные перемещения судна определяются жесткостью системы заякорения. Угол курса судна обусловлен совокупностью действующих на него внешних факторов – ветра, течения, дрейфа льда и усилий от движительно-рулевого комплекса. При изменении внешнего воздействия на судно оно совершает разворот к новому положению. Для снижения уровня ледового воздействия на корпус судна вблизи него необходимо создавать зону битого льда.

Численная модель базируется на решении уравнений движения судна в горизонтальной плоскости под действием внешних сил. Для описания поведения поля битого льда использован метод дискретных элементов: льдины представлены в виде массива отдельных плоских дисков различного диаметра и заданной толщины. Льдины движутся под воздействием контактных сил, возникающих при их взаимодействии друг с другом или с корпусом турельного судна, а также ветра и течения. Выполняется интегрирование дифференциального уравнения движения каждого элемента с вычислением для такового скоростей и новых координат. Суммирование сил, приложенных со стороны дискретных элементов к контуру судна, позволяет получить компоненты ледовой нагрузки.

В статье показана адаптация дискретно-элементной модели к изучению одного из возможных сценариев работы турельного судна – развороту в неподвижном предварительно разрушенном ледяном поле под действием собственных движителей. При этом изучены развороты судна в полях разрушенного ровного льда и вблизи разрушенной торосистой гряды. Модель верифицировалась путем сравнения результатов численного моделирования и данных натуральных измерений поведения заякоренной конической платформы Kulluk, а также результатов численного моделирования поведения ошвартованного у платформы танкера при изменении направления дрейфа льда и данных модельных исследований в ледовом бассейне.

Сценарий разворота турельного судна в неподвижном битом льду исследовался для оценки влияния геометрических размеров области битого льда на динамику разворота судна. Расчеты показали, что снижение размеров области битого льда привело к незначительному увеличению максимального значения ледовой нагрузки и невозможности выполнить полный разворот судна.

При изучении поведения судна в предварительно разрушенном торосе, когда отдельные блоки льда из кия тороса и консолидированного слоя сформировали около судна некоторую зону (полосу) битого льда, рассматривались три исходных положения оси разрушенного тороса относительно корпуса судна. Численное моделирование показало, что турельное судно способно самостоятельно выполнять безопасный разворот в предварительно разрушенных торосах принятой конфигурации при различной начальной ориентации оси тороса относительно корпуса судна. При этом смещения турели и значения восстанавливающей силы практически не отличаются от соответствующих значений при развороте судна в битом льду постоянной толщины, хотя скорость разворота заметно снижается. Сопоставление данных о времени изменения курса судна на 180° позволяет заключить, что на скорость разворота судна в торосистой гряде влияет начальная ориентация ее оси относительно корпуса судна.

Плавучие заякоренные платформы различных типов, а именно: конические конструкции (например, Kulluk), полупогружные установки (например, «Полярная звезда»), турельные суда (например, проекты сооружений для добычи, хранения и отгрузки газа Штокмановского месторождения), довольно широко используются (или планируются) для разработки глубоководных нефтяных или газовых месторождений,

в том числе в ледовых условиях. Изучение динамики поведения плавучих заякоренных объектов под воздействием различных внешних факторов – ветра, течения, льда, собственных работающих движителей и реакции системы заякорения – представляет собой сложную проблему. Некоторые частные случаи поведения этих объектов во льду рассмотрены с помощью аналитических моделей [1], а также при проведении модельных исследований [2, 3]. Эффективным подходом к проведению таких исследований является численное моделирование поведения заякоренных платформ в ледовых условиях [4–7].

В настоящей работе на основе численного моделирования изучено поведение в ледовых условиях одного из типов заякоренных плавучих объектов – турельного судна, которое отличает наличие специальной конструкции – заякоренной турели, позволяющей судну вращаться относительно некоторой вертикальной оси. При этом горизонтальные перемещения судна определяются жесткостью системы заякорения турели. Эта конструктивная особенность создает турельному судну некоторые преимущества по сравнению с другими заякоренными объектами в части возможности контролировать уровни ледовой, ветровой и гидродинамической нагрузок путем разворота по направлению действия внешней силы. Как правило, направления действия ветра, течения и дрейфа льда не совпадают. При изменении интенсивности или направления действия по крайней мере одного из перечисленных факторов судно начинает разворачиваться в позицию, обеспечивающую минимальное суммарное значение действующих на него внешних сил. Для снижения уровня ледового воздействия на корпус судна вблизи него необходимо создавать зону битого льда.

В качестве объекта исследований – турельного судна – рассмотрен один из вариантов сооружения для Штокмановского месторождения. Применяемая численная модель базируется на решении уравнений движения судна в горизонтальной плоскости под действием внешних сил. Для описания поведения поля битого льда использован метод дискретных элементов [8]. В настоящей статье представлены описание дискретно-элементной модели и ее адаптация к изучению одного из возможных сценариев работы турельного судна – развороту в неподвижном предварительно разрушенном

ледяном поле под действием собственных движителей. При этом изучены развороты судна в полях разрушенного ровного льда и вблизи разрушенной торосистой гряды. Толщина ровного льда полагалась равной 1 м.

Описание численной модели

Исследование поведения заякоренного турельного судна при наличии ветра, течения и льда основано на составлении и решении дифференциальных уравнений движения такого судна в горизонтальной плоскости. При этом вводятся следующие основные допущения:

- отсутствие влияния продольной и поперечной качки на движение судна в горизонтальной плоскости;
- центр тяжести турельного судна располагается в плоскости мидель-шпангоута, судно полагается симметричным относительно диаметральной плоскости (ДП) и плоскости мидель-шпангоута;
- движения заякоренного судна (горизонтальное перемещение и рыскание) происходят достаточно медленно, так что силами инерции якорных связей системы заякорения можно пренебречь;
- искажением поля скоростей течения жидкости пренебрегается;
- инерционными нагрузками, связанными с нестационарностью течения, ввиду малости производных по времени пренебрегается.

На рис. 1 пунктирной линией показано положение турельного судна в начальный момент времени $t = t_0$. Предполагается, что на судно в этот момент времени начинают действовать внешние силы – течение, ветер, лед (в любом сочетании или все вместе), вследствие чего судно начинает двигаться в горизонтальной плоскости. Для описания движения судна использованы две системы координат: неподвижная $\xi O_0 \eta$ и связанная с турельным судном XOY . Положение судна определяется координатами его центра тяжести (ξ_G и η_G) в связанной системе координат и углом курса (φ). Начало связанной системы координат лежит в точке пересечения ДП и мидель-шпангоута судна, а оси OX и OY направлены в нос судна и на правый борт соответственно. В момент времени t_0 обе системы координат совпадают.

Таким образом, положение турельного судна и его кинематические параметры в произвольный момент времени могут быть определены путем интегрирования дифференциальных

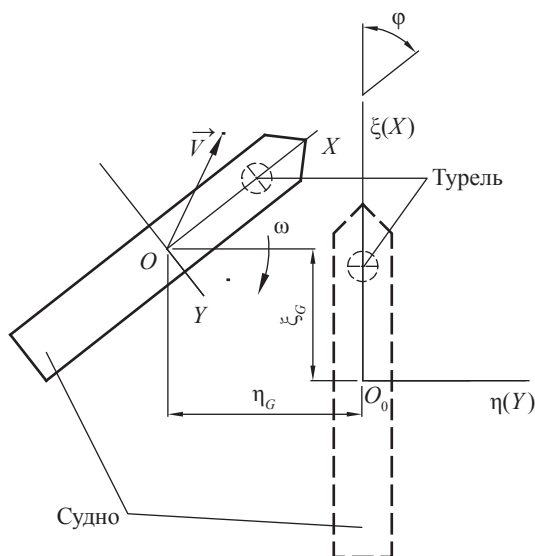


Рис. 1. Постановка задачи. Система координат: \vec{V} – линейная скорость судна; ω – угловая скорость вращения судна

уравнений движения судна в горизонтальной плоскости, которые записаны в связанной системе координат.

Для исключения повторного учета гидродинамических сил, определяемых экспериментальным путем, из системы уравнений удаляются соответствующие слагаемые. Присоединенный статический момент массы полагается равным 0 ввиду принимаемой симметрии платформы относительно плоскости мидель-шпангоута. В окончательном виде система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} m(1+k_{11})\frac{dV_x}{dt} - m(1+k_{22})V_y\omega &= X; \\ m(1+k_{22})\frac{dV_y}{dt} - m(1+k_{11})V_x\omega &= Y; \\ I(1+k_{66})\frac{d\omega}{dt} &= M, \end{aligned} \quad (1)$$

где m , I – соответственно масса судна и момент инерции судна относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести; k_{11} , k_{22} , k_{66} – коэффициенты присоединенных масс воды для судна и присоединенного момента инерции масс воды соответственно; V_x , V_y – проекции линейной скорости судна на оси связанной системы координат; X , Y , M – проекции суммарной внешней силы и внешний момент силы, действующие на корпус судна, соответственно. В данной работе момент силы, возникающий в результате воздействия

якорной системы удержания (ЯСУ), полагается равным 0. Для объектов, не имеющих турели, необходимо учитывать моменты силы, создаваемые якорными связями.

Собственные инерционные характеристики судна известны. В состав внешней силы и момента входят гидродинамические, аэродинамические и ледовые нагрузки на корпус судна, тяга движителей и подруливающих устройств, восстанавливающая сила системы заякорения турели и обусловленные этими силами моменты. Формулы для определения аэродинамических и гидродинамических сил опубликованы ранее [9]. Действующие на корпус судна ледовые нагрузки со стороны поля битого льда определяются с помощью 2D-метода дискретных элементов. Поле битого льда представляется набором распределенных по поверхности плоских элементов – дисков, диаметры которых соответствуют характерным геометрическим параметрам отдельных льдин. Задаваемая область битого льда может быть ограничена зонами чистой (открытой) воды или жесткими границами – кромками полей ровного льда, береговой линией, контурами судна и инженерных сооружений. При взаимодействии элементов друг с другом, а также с жесткими границами полагается, что на границе контакта возникают две компоненты контактной силы – нормальная и касательная. Подробное описание метода дискретных элементов и формулы для определения контактных сил приведены ранее [9].

В модель вводятся дополнительные допущения:

- наслаивания дисков друг на друга нет, перемещение происходит только в горизонтальной плоскости, т.е. рассматривается двумерная задача;
- ледяные диски разрушаются вследствие дробления, когда в зоне контакта давление льда достигает определенного значения. В результате разрушения дисков их диаметры уменьшаются;
- вращение дисков отсутствует. Ледяные диски движутся поступательно;
- поведение битого льда может быть описано с использованием аппарата механики сыпучих сред с присущими ей двумя характерными параметрами: углами внутреннего трения и сцепления.

В настоящих исследованиях приняты угол внутреннего трения, равный 30° , и сцепление 2000 Па. Эти значения базируются

на результатах предыдущих исследований и сопоставлении с экспериментальными данными.

Кроме описанных сил взаимодействия на каждый элемент в горизонтальной плоскости действуют силы гидродинамического и воздушного сопротивления, которые в общем случае не совпадают по направлению. Сила гидродинамического сопротивления дисков вычисляется по формуле

$$\vec{F}_{\text{в.диск}} = 0,5c_{\text{в.диск}} \rho_{\text{в}} A_{\text{диск}} |\vec{V}_{\text{диск}}| \vec{V}_{\text{диск}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{диск}}$, $\vec{V}_{\text{диск}}$ – площадь диска в плане и скорость относительно воды соответственно; $c_{\text{в.диск}}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды.

Воздушное сопротивление определено по аналогичной формуле с использованием соответствующих значений плотности воздуха и коэффициента воздушного сопротивления $c_{\text{воз.диск}}$. Коэффициенты $c_{\text{в.диск}}$ и $c_{\text{воз.диск}}$ приняты равными $6 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ соответственно [10]. Присоединенными массами воды при движении дисков в горизонтальной плоскости можно пренебречь.

После определения суммарных сил, действующих на каждый из элементов, для каждого такого элемента определяется ускорение и выполняется интегрирование дифференциального уравнения движения с вычислением скорости и новых координат. Суммирование сил, приложенных со стороны дискретных элементов к контуру судна, позволяет получить компоненты ледовой нагрузки в связанной с судном системе координат – силы $X_{\text{лед}}$, $Y_{\text{лед}}$ и момент $M_{\text{лед}}$ (см. форм. (1)).

Описанная модель верифицировалась путем сравнения с данными натурных измерений результатов численного моделирования взаимодействия заякоренной конической платформы Kulluk с битым льдом [5, 6], а также результатов численного моделирования поведения ошвартованного у платформы танкера при изменении направления дрейфа льда и данных модельных исследований в ледовом бассейне [9].

Описание турельного судна и системы заякорения

Основные геометрические параметры турельного судна, принятого в качестве объекта исследований, приведены в табл. 1. Полагается, что ЯСУ турели состоит из 12 цепных линий (калибр цепи – 114 мм) длиной 2500 м, распо-

Таблица 1

Основные параметры турельного судна

Длина по ватерлинии, м	235
Ширина по ватерлинии, м	38,8
Осадка по ватерлинии, м	15,0
Водоизмещение, м ³	117000
Момент инерции, кг·м ²	552,3·10 ⁹
Отстояние турели от мидель-шпангоута в нос, м:	85,0
• k_{11}	0,0175
• k_{22}	0,360
• k_{66}	0,290

ложенных строго радиально. Разрывное усилие цепной линии составляет 14,5 МН. Ключевые точки расположены симметрично по окружности диаметром 30 м при глубине моря 300 м. Жесткость ЯСУ предполагается постоянной по различным направлениям.

Разворот турельного судна в битом льду под действием движителей

Рассматривается разворот турельного судна в неподвижном битом льду с помощью собственных средств активного управления. Целью исследования сценария является оценка влияния геометрических размеров области битого льда (*англ.* managed ice) на динамику разворота судна. Предполагается, что тяга движителя 900 кН направлена перпендикулярно к ДП судна и приложена в точке с координатами $x = -102,0$ м, $y = 0$ м. Расчетная область представляет собой поле битого льда в виде правильного многоугольника, вписанного в окружности диаметрами 900 и 600 м. Расчетная область имитирует неразрушенное поле льда, ее границы полагаются твердыми стенками. Центр турели в начальный момент времени совпадает с центром описанной окружности. Параметры поля битого льда: толщина льда – 1 м, средний размер льдин – 20 м, сплоченность – 72 %. Колебания значений восстанавливающей силы ЯСУ турели обусловлены периодическим действием льдин и податливостью самой системы удержания.

Результаты расчетов показали (рис. 2), что снижение размеров области битого льда (уменьшение диаметра описанной окружности в 1,5 раза) привело:

- к незначительному увеличению максимального значения ледовой нагрузки (нагрузка примерно равна упору движителей);

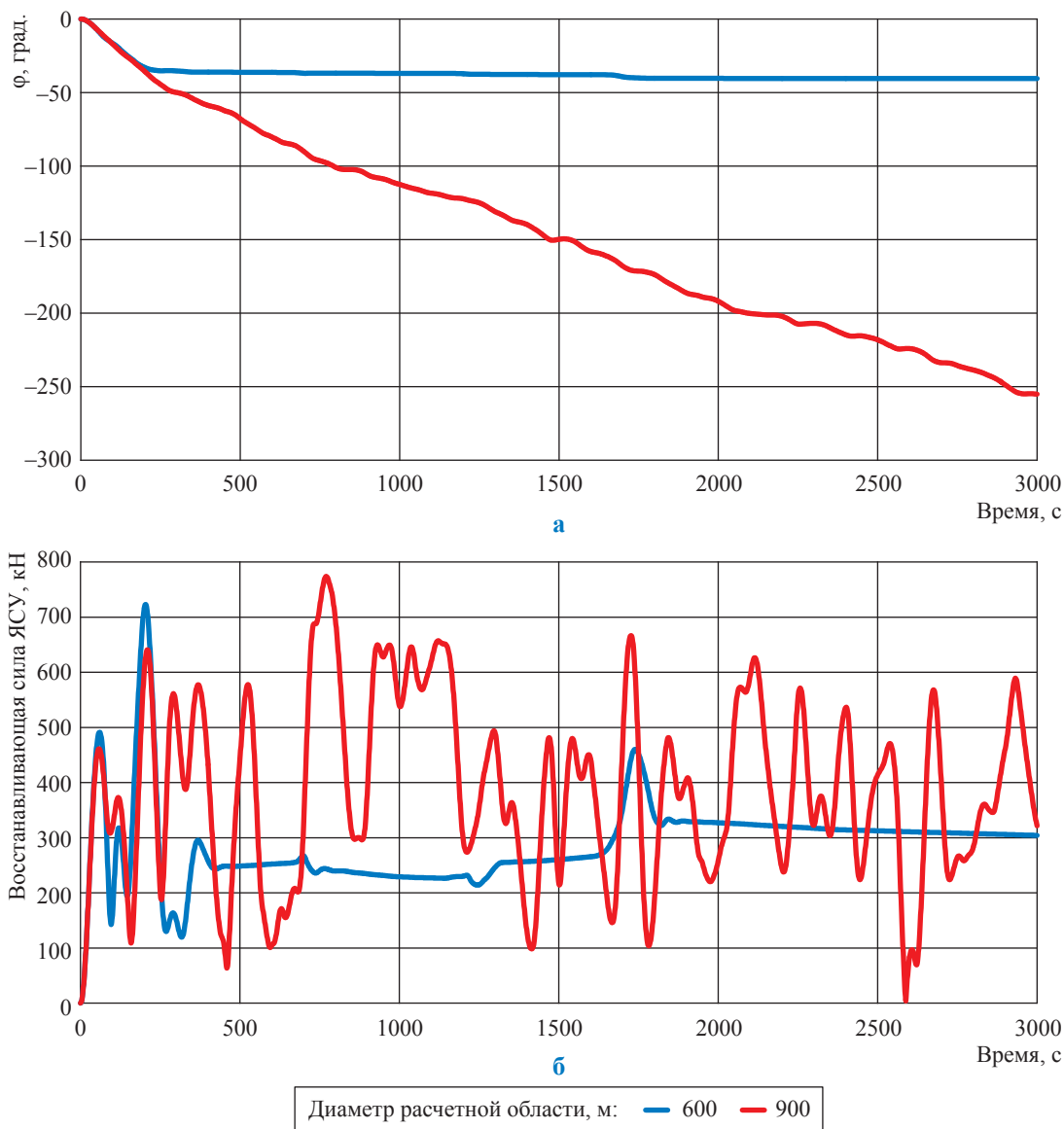


Рис. 2. Разворот турельного судна в битом льду: временная реализация угла курса (а) и реакции ЯСУ (б)

- невозможности выполнить полный разворот судна – изменить φ на 180° – самостоятельно, обеспечивая постоянную тягу движителей 900 кН.

Разворот турельного судна в неподвижном разрушенном торесе

В ледовых условиях безопасная эксплуатация турельного судна возможна при создании вокруг этого объекта зоны битого льда. Если судно располагается в неподвижном ледяном поле и прогнозируется начало дрейфа льда в некотором направлении, то для снижения уровня ледовых нагрузок оно должно самостоятельно или с помощью специальных

судов для управления ледовой обстановкой (УЛО) заблаговременно развернуться носом к предполагаемому направлению дрейфа. Как показали приведенные ранее результаты расчетов, эффективность разворота турельного судна при помощи собственных движителей в битом льду зависит от параметров льда и площади зоны битого льда. При толщине льда 1 м, среднем размере обломков льда 20 м, концентрации льда 72 % вокруг судна должна быть создана зона битого льда диаметром не менее 900 м для эффективного выполнения указанного маневра. Эти значения использованы при исследовании сценария разворота турельного судна в неподвижном разрушенном

однолетнем торосе с помощью собственных движителей.

Предполагается, что после проведения операций УЛО гряда торосов была разрушена и отдельные блоки льда из кия тороса и консолидированного слоя сформировали некоторую зону (полосу) битого льда. Ширина этой зоны принята равной 180 м, а максимальная толщина слоя льда по центральной оси – равной 10 м. Уменьшение толщины льда к краям зоны до толщины окружающего льда происходит линейно. Предполагается, что пропульсивный комплекс создает упор 900 кН, приложенный нормально к диаметральной плоскости судна в точке с координатами $x = -102,0$ м, $y = 0$ м. Расчетная область представляет собой зону битого льда в форме правильного многоугольника, вписанного в окружность диаметром 900 м.

Границы расчетной области являются твердыми стенками, имитирующими кромки сплошного льда. В начальный момент времени центр турели совпадает с центром описанной окружности. В задаче рассмотрены три исходных положения оси разрушенного тороса относительно корпуса судна (рис. 3). Интенсивность серого цвета соответствует различной толщине блоков льда: черным цветом обозначены блоки льда максимальной толщины – 10 м.

Результаты моделирования разворота судна в торосе сопоставлены со случаем разворота судна в битом льду постоянной толщины (рис. 4, табл. 2).

Результаты расчетов по представленной численной модели показывают:

- турельное судно способно самостоятельно выполнять безопасный разворот

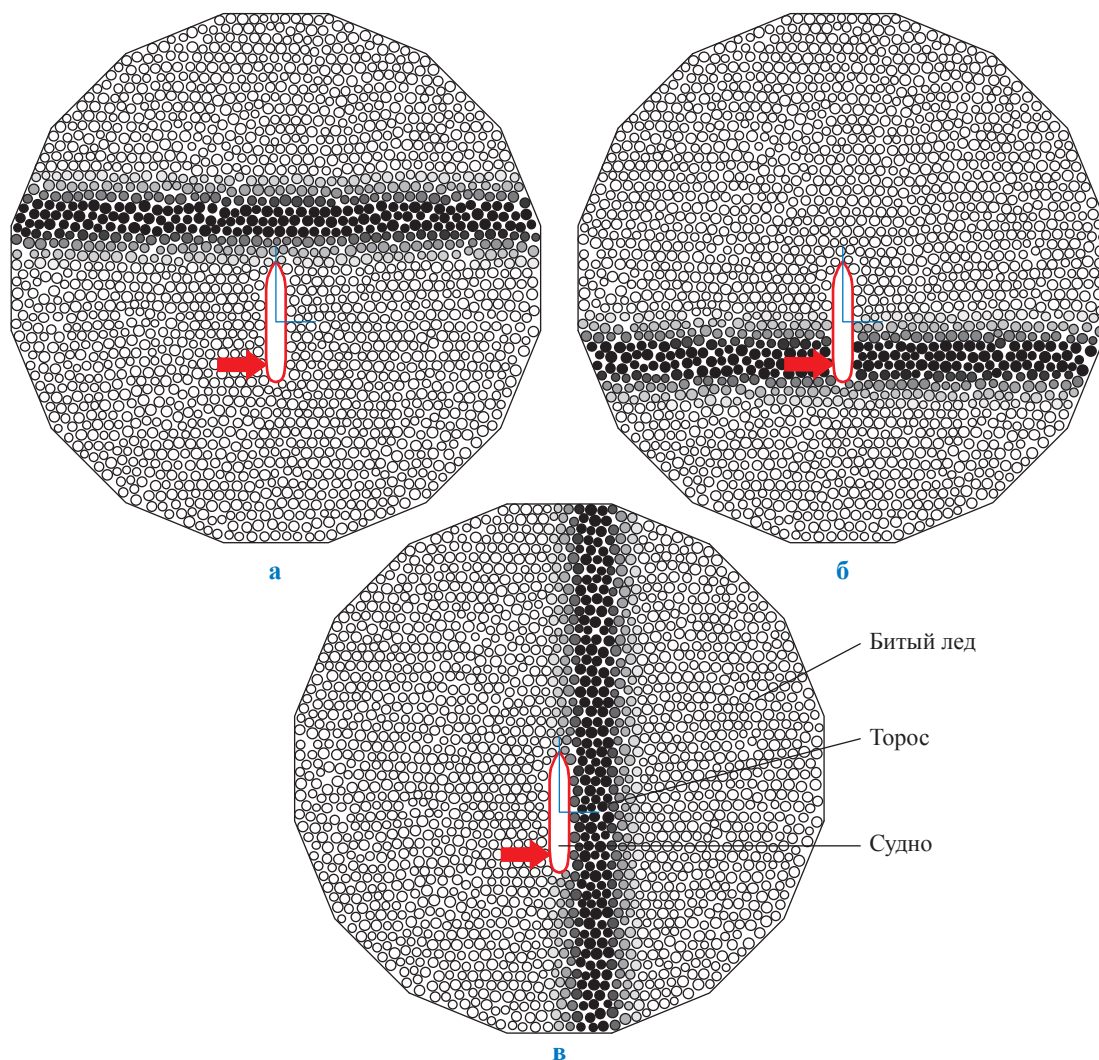


Рис. 3. Начальное расположение судна и разрушенного тороса: стрелка показывает действие упора движителей

Таблица 2

Разворот судна в торосе и битом льду

Ледовые условия	Битый лед	Разрушенный торос		
		см. рис. 3а	см. рис. 3б	см. рис. 3в
Время, необходимое для разворота судна на 180°, с	1700	1974	2988	> 3000
Максимальное смещение турели относительно исходного положения, м	6,95	6,60	5,52	7,35
Максимальная восстанавливающая сила, МН	1,00	0,95	0,79	1,06

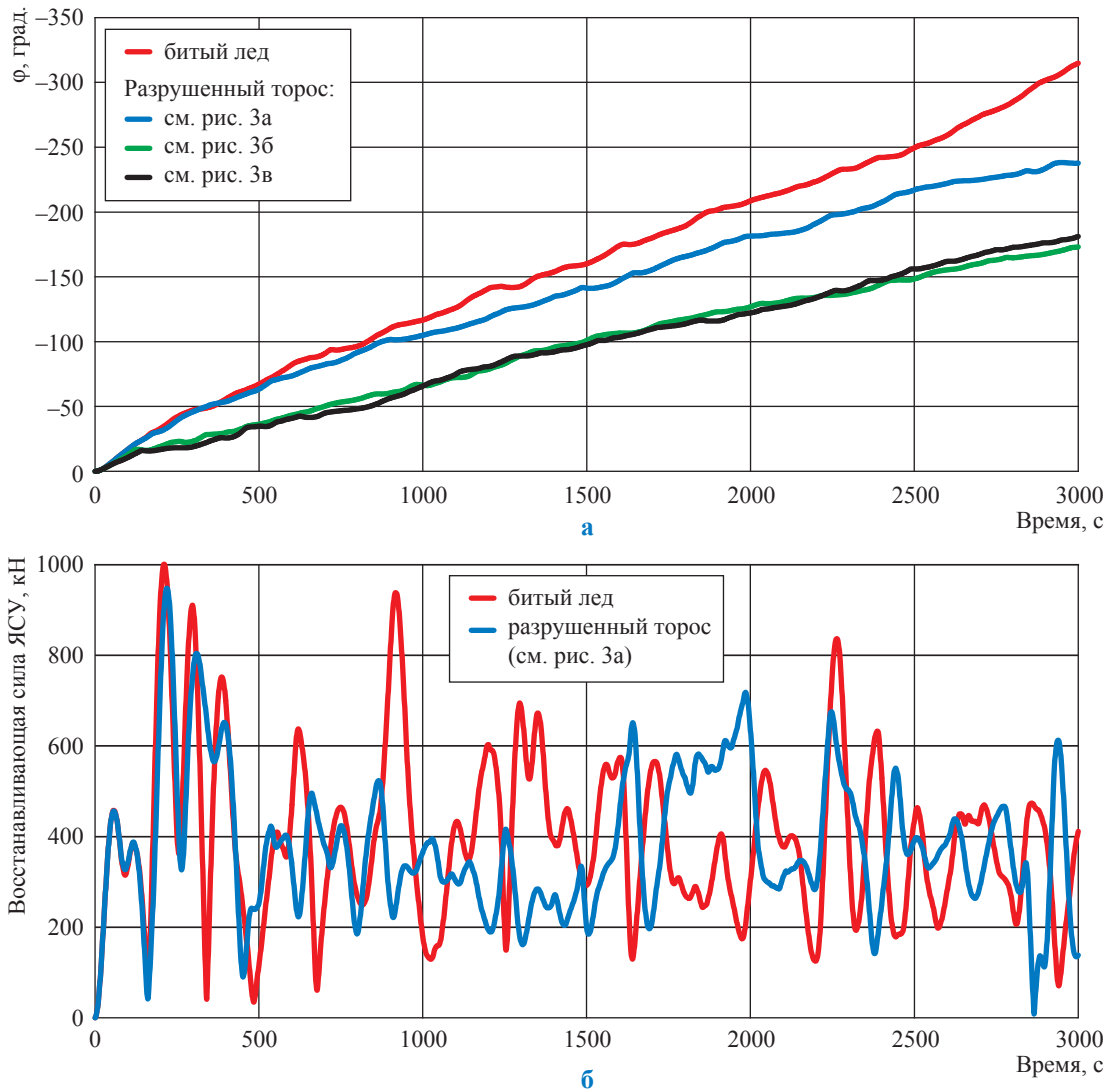


Рис. 4. Разворот судна в торосе: временная реализация угла курса (а) и реакции ЯСУ (б)

в предварительно разрушенных торосах заданной конфигурации при различной начальной ориентации оси тороса относительно корпуса судна, при этом скорость разворота снижается по сравнению со скоростью разворота в битом льду постоянной толщины;

- сопоставление данных о времени изменения курса судна на 180° позволяет заключить,

что разворот в торосе, перпендикулярно развернутом по отношению к корпусу судна, происходит быстрее, чем в торосах, имеющих другую начальную ориентацию оси;

- смещения турели и значения восстанавливающей силы практически не отличаются от соответствующих значений при развороте судна в битом льду.

Таким образом, представленная в статье численная модель движения судна в горизонтальной плоскости позволяет изучать динамику поведения заякоренного турельного судна на замерзающей акватории под воздействием внешних природных факторов (ветра, течения, битого льда), а также собственных движителей и сил реакции системы заякорения турели. По результатам расчетов можно проследить реакцию судна на заданное внешнее воздействие, определить значения кинематических параметров его движения и силы, передаваемые на систему заякорения турели.

Исследована возможность разворота турельного судна в зоне неподвижного битого льда, включая торосистую гряду, под действием собственных движителей. Полученные результаты показали, что судно способно выполнять безопасный разворот с помощью собственных пропульсивных комплексов в предварительно разрушенных полях ровного льда толщиной 1 м и грядах торосов с глубиной килля до 10 м, если при этом вблизи корпуса судна

создана зона битого льда достаточной площади. Скорость разворота судна в разрушенном торосе снижается по сравнению с разворотом в битом льду одной толщины; соответственно, увеличивается время, необходимое для разворота. Оценка времени требуется для планирования УЛО-операций при получении прогноза изменения внешних условий и заблаговременного разворота судна в положение, обеспечивающее минимальный или безопасный уровень внешних нагрузок.

Следует иметь в виду, что особенности представленной численной модели и принятые граничные условия влияют на полученные результаты. Выводы, основанные на полученных результатах, корректны применительно к исследованному диапазону параметров внешнего воздействия и свойств заякоренного объекта. Поэтому экстраполяция результатов и выводов за пределы этого диапазона может производиться с осторожностью и должна верифицироваться соответствующими данными натурных или модельных измерений.

Список литературы

1. Onishchenko D. Analytical estimation of maneuverability of moored FPU with internal turret in close ice / D. Onishchenko, A. Marchenko // Proc. of 23rd International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 15, Trondheim, Norway. – 2015. – <http://www.poac.com/PapersOnline.html>
2. Bezzubik O. Experimental investigation of interaction of moored platforms with drifting ice features / O. Bezzubik, A. Bitsulya, E. Karulin et al. // Proc. of the 17th International symposium on Ice IAHR, St. Petersburg, Russia. – 2004. – V. 1. – P. 76–84.
3. Bruun P.K. Ice model test of an Arctic SPAR / P.K. Bruun, J. Husvik, S. Le-Guennec et al. // Proc. of the 20th International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 09, June 9–12. – Luleå, Sweden, 2009. – POAC09-136. – <http://www.poac.com/PapersOnline.html>
4. Aksnes V. Analysis of the behaviour of a moored ship in variable ice drift / V. Aksnes, B. Bonnemaire // Proc. of the 20th Int. Conf. POAC 09, June 9–12. – Luleå, Sweden, 2009. – <http://www.poac.com/PapersOnline.html>
5. Sayed M. Numerical simulations of ice interaction with a moored structure / M. Sayed, A. Barker // Proc. of the Offshore Technology Conference. – Houston, Texas, 2011. – OTC22101.
6. Sayed M. Simulations of the station keeping of drill ships under changing direction of ice movement / M. Sayed, I. Kubat, D. Watson et al. // Proc. of the Arctic Technology Conference. – Copenhagen, 2015. – OTC 25565.
7. Zhou Li. Numerical simulation of moored structure station keeping in level ice / Li Zhou, B. Su, K. Riska et al. // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – № 71. – P. 54–66.
8. Hopkins M.A. Four stages of pressure ridging / M.A. Hopkins // J. of Geophysical Research. – 1998. – № 103 (C10). – P. 21883–21891.
9. Karulin E. Numerical and physical simulations of moored tanker behaviour / E. Karulin, M. Karulina // Ships and Offshore Structures. – 2011. – № 6(3). – P. 179–184.
10. Тимохов Л.А. Динамика морских льдов / Л.А. Тимохов, Д.Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 272 стр., ил.

Discrete element approach to numerical simulation of managed ice effect to the anchorage-dependent facilities

Ye.B. Karulin^{1*}, M.M. Karulina¹

¹ Krylov State Research Centre, Bld. 44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation

* E-mail: e_karulin@ksrc.ru

Abstract. The paper contains description of a numerical model which affords studying behavior of a turret-moored vessel within the ice environment. The turret-moored vessel is a floating facility being anchored by means of anchor links fixed to a rotary drum (turret) inside the vessel. The turret enables the vessel to turn around its axis. At that, horizontal motion of the vessel is determined by rigidity of the anchor system. A course angle of the ship depends on the integrated external factors like wind, currents, ice drift and efforts of a powerhelm unit. At changing of the external impact the vessel turns to new position. To decrease a level of ice influence on the body of the ship, it is necessary to create a zone of managed ice around her.

The numerical model is based on solution of equations of horizontal vessel motion under the influence of external forces. To describe behavior of a managed ice field a method of discrete elements is applied: the ice blocks are presented like separate plane disks of various diameters and given thickness. These blocks move under the influence of contact forces being caused by their mutual interactions and interaction with the ship body as well as due to wind and currents. For each element a differential equation of motion is being integrated with calculation of velocities and new coordinates. Summation of the forces applied to the ship profile on a part of the discrete elements enables to get the components of ice load.

The discrete-element model is adjusted to studying a possible work scenario for a turret-moored vessel; namely, it is a turn within a motionless and preliminary destroyed ice field under the influence of own engines. At that, the ship turns within the fields of ruined flat ice and near a destroyed hummock are studied. The model is verified by comparing results of simulation and field measurements regarding the interaction of the anchored Kulluk platform with ice, as well as the behavior of a tanker made fast along the platform at changing of the direction of ice drift.

The case of motionless managed ice was studied in order to estimate impact of ice area dimensions to dynamics of ship turning. Calculations showed that reduction of ice area increased a maximal value of ice load and excluded the full turning of the ship.

The model of ship turning in a preliminary destroyed hummock supposed that the separate ice blocks from a hummock keel and from a consolidated layer had formed some zone of managed ice around the ship. Three initial positions of hummock axis in relation to the ship body were explored. Numerical simulation showed that the turret-moored vessel is able to make safe turn within the preliminary destroyed hummocks of given configurations at various initial orientations of the hummock axis. At that, turret offsets and values of the restoring force practically do not differ from the correspondent values in respect to the managed ice of constant thickness, but the speed of turning drops. It was concluded that the speed of vessel turning within a hummock depends on the initial direction of hummock axis in relation to the ship body.

Keywords: turret-moored vessel, numerical simulation, anchorage system, ice loads, managed ice, discrete element method.

References

1. ONISHCHENKO, D. and A. MARCHENKO. Analytical estimation of maneuverability of moored FPU with internal turret in close ice. In: *Proc. of 23rd International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 15*. [online]. Trondheim, Norway, 2015. Available from: <http://www.poac.com/PapersOnline.html>. ISSN 0376-6756.
2. BEZZUBIK, O., A. BITSULYA, E. KARULIN et al. Experimental investigation of interaction of moored platforms with drifting ice features. In: *Proc. of the 17th International symposium on Ice IAHF, St. Petersburg, Russia*. 2004, vol. 1, pp. 76–84.
3. BRUUN, P.K., J. HUSVIK, S. LE-GUENNEC et al. Ice model test of an Arctic SPAR. In: *Proc. of the 20th International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 09, June 9–12* [online]. Luleå, Sweden, 2009, POAC09-136. Available from: <http://www.poac.com/PapersOnline.html>. ISSN 0376-6756.
4. AKSNES, V. and B. BONNEMAIRE. Analysis of the behaviour of a moored ship in variable ice drift. In: *Proc. of the 20th International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 09, June 9–12* [online]. Luleå, Sweden, 2009. Available from: <http://www.poac.com/PapersOnline.html>. ISSN 0376-6756.
5. SAYED, M. and A. BARKER. Numerical simulations of ice interaction with a moored structure. In: *Proc. of the Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, 2011, OTC22101.

6. SAYED, M., I. KUBAT, D. WATSON et al. Simulations of the station keeping of drill ships under changing direction of ice movement. In: *Proc. of the Arctic Technology Conference*. Copenhagen, 2015, OTC 25565
7. ZHOU, Li, B. SU, K. RISKI et al. Numerical simulation of moored structure station keeping in level ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2012, no. 71, pp. 54–66.
8. HOPKINS, M.A. Four stages of pressure ridging. *J. of Geophysical Research*. 1998, no. 103 (C10), pp. 21883–21891. ISSN 0148-0227.
9. KARULIN, E. and M. KARULINA. Numerical and physical simulations of moored tanker behavior. *Ships and Offshore Structures*. 2011, no. 6(3), pp. 179–184. ISSN 1744-5302.
10. TIMOKHOV, L.A. and D.Ye. KHEYSIN. *Dynamics of sea ices* [Dinamika morskikh ldov]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. (Russ.).