

УДК 629.124.791

## Численное исследование динамики турельного судна в условиях воздействия битого льда

М.М. Карулина<sup>1\*</sup>, Е.Б. Карулин<sup>1</sup>

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

\* E-mail: m\_karulina@ksrc.ru

**Ключевые слова:** турельное судно, численное моделирование, битый лед, метод дискретных элементов, дрейф льда, приливная волна.

**Тезисы.** В статье представлены результаты численного моделирования поведения турельного судна под воздействием внешних сил – ветра, течения и битого льда. Модель базируется на решении уравнений движения судна в горизонтальной плоскости, а для описания поведения поля битого льда использован метод дискретных элементов. Рассматривается один из вариантов турельного судна, предлагаемый для использования при освоении глубоководного Штокмановского газоконденсатного месторождения в Баренцевом море. Изучены сценарии внешнего воздействия на судно, возможные на Штокмановском месторождении в зимний период, а именно:

- разворот турельного судна в условиях ветра, течения и дрейфующего под их действием льда;
- поведение судна в поле битого льда, дрейфующего под действием циклической приливной волны.

Для первого сценария оценивается влияние положения центра турели по длине судна на динамические и кинематические характеристики разворота судна. При этом движение объекта происходит в условиях воздействий на него битого льда, течения и ветра, несовпадающих по направлению. Показано, что смещение центра турели ближе к миделю привело к снижению скорости разворота судна, увеличению среднего значения угла курса после завершения поворота и увеличению максимального и среднего значений восстанавливающей силы системы заякорения турели; после разворота угол курса судна колеблется относительно некоторого установившегося значения.

В условиях воздействия на турельное судно приливной волны и при наличии вокруг корпуса судна зоны битого льда с заданным средним размером льдин происходит медленный разворот судна. При этом смещения турели и восстанавливающая сила имеют небольшие значения, и безопасный разворот судна возможен без использования собственных движителей.

В процессе численных исследований изучено влияние сжатия ледяного покрова на динамику разворота судна и возникающие ледовые нагрузки. На начальной стадии воздействия приливной волны сжатие и ветер отсутствовали. Судно выполняло медленный разворот под действием приливной волны, формируя за корпусом небольшие зоны чистой воды. Согласно расчетам, сжатие льда силой 1–2 балла приводит к быстрому закрытию канала за судном и существенному увеличению средних и амплитудных значений ледовых нагрузок, передаваемых на систему заякорения турели. Последующее появление ветра приводит к интенсивному развороту судна. Корпус судна не устанавливается строго против ветра, что обусловлено дополнительным действием на судно других факторов. На фоне сжатия льда действие ветра практически не увеличивает усилия в якорной системе турельного судна.

Перспективным типом плавучих сооружений для добычи, хранения и отгрузки нефти и газа на глубоководных акваториях являются платформы, корпус которых имеет судовые обводы. Такие платформы, турельные суда, оснащаются специальной конструкцией – турелью с системой заякорения, позволяющей объекту разворачиваться вокруг вертикальной оси турели под действием внешних сил.

Турельные суда рассматривались в качестве варианта платформ для освоения глубоководного Штокмановского газоконденсатного месторождения в Баренцевом море. Поскольку месторождение располагается на акватории, где возможно появление ледяного покрова, для обеспечения безопасного функционирования судна необходимо оценить ледовые нагрузки, действующие на его корпус и передающиеся на систему заякорения турели. Аналитические оценки и результаты модельных исследований показали, что уровень ледовых нагрузок от ровного льда при изменении направления его дрейфа может существенно превышать держащую способность системы заякорения турели. Безопасная эксплуатация турельного судна в ледовых условиях возможна

только при создании (с помощью судов управления ледовой обстановкой) вблизи его корпуса зоны битого льда достаточной площади.

Для исследования динамики поведения турельного судна в условиях битого льда, дрейфующего под воздействием ветра и/или течения, а также определения возникающих при этом ледовых нагрузок в системе заякорения турели авторами разработана численная модель [1–3]. Далее в статье с использованием разработанной модели изучены несколько сценариев воздействия на судно внешних факторов. Выбор расчетных сценариев основан на данных изысканий о ледовых и гидрометеорологических условиях в районе Штокмановского месторождения [4, 5].

Особенностью названных численных исследований является изучение влияния сжатия ледяного покрова на динамику разворота судна и возникающие ледовые нагрузки. Исходная расчетная модель адаптирована для учета ледового сжатия, что позволило оценить вклад этого явления в процессы функционирования турельного судна в ледовых условиях. В результате показано, что при сжатии ледяного поля происходит значительное увеличение нагрузок в системе заякорения турели.

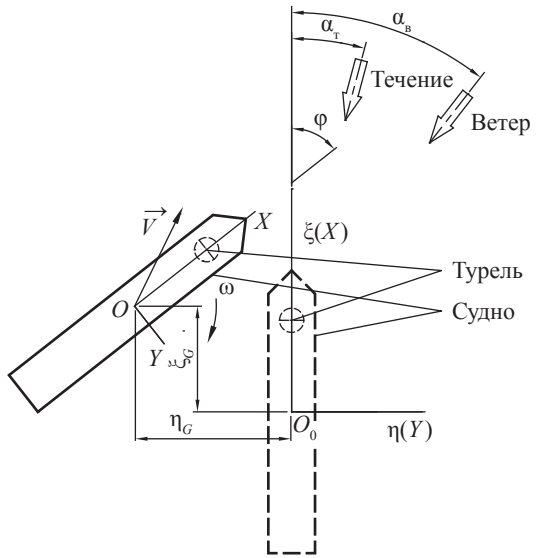
Ниже подробно рассмотрены расчетные сценарии и основные результаты численного моделирования.

### Поворот турельного судна в дрейфующем под действием ветра и течения битом льду

Предполагается, что в начальный момент времени смещение центра турели равно нулю и в какой-то момент времени внешние факторы (ветер, течение, лед) начинают воздействовать на судно (рис. 1). Направления ветра и течения могут быть различными, а направление дрейфа льда определяется их совместным воздействием. Под действием ветра, течения и дрейфующего льда судно начинает вращаться вокруг турели, при этом центр турели изменяет свое положение в неподвижной системе координат.

В расчетах принимаются следующие условия:

- угол направления действия ветра  $\alpha_v = 25,4^\circ$ , скорость ветра составляет 15,0 м/с;
- угол направления действия течения  $\alpha_t = 341^\circ$ , скорость течения составляет 0,5 м/с;
- скорости ветра и течения линейно возрастают от 0 до заданных величин на протяжении 600 с;



**Рис. 1. Постановка задачи. Система координат и направления действия внешних факторов. Основные параметры модели и условные обозначения см. в предыдущей статье в экспликации к рис. 1, с. 105–106 [3]**

- результирующее направление дрейфа льда близко к  $0^\circ$ , толщина льда составляет 1,0 м, сплоченность – 72 %, средний диаметр льдин – 20 м;
- начальное значение  $\varphi$  (угол курса судна) равно  $90^\circ$ ;
- размер расчетной области вдоль оси  $O_0\xi$  – 3520 м, вдоль оси  $O_0\eta$  – 920 м, боковые границы – твердые стенки, нижняя и верхняя границы свободны;
- рассматривается два положения центра турели по длине судна (ось  $OX$ , направленная в нос судна) – отстояние на 85 и 64,25 м от начала связанной системы координат.

Результаты численного моделирования движения турельного судна под действием ветра, течения и дрейфующего битого льда показаны на рис. 2 в виде изменения угла  $\varphi$  и реакции якорной системы удержания (ЯСУ) турели. После разворота  $\varphi$  колеблется относительно некоторого установившегося значения, что характерно для заякоренных объектов [2, 6]. Положение центра турели по длине судна влияет на динамику поведения судна: смещение центра турели ближе к миделю привело к небольшому снижению скорости разворота судна, увеличению установившегося угла  $\varphi$ , а также максимального и среднего значений

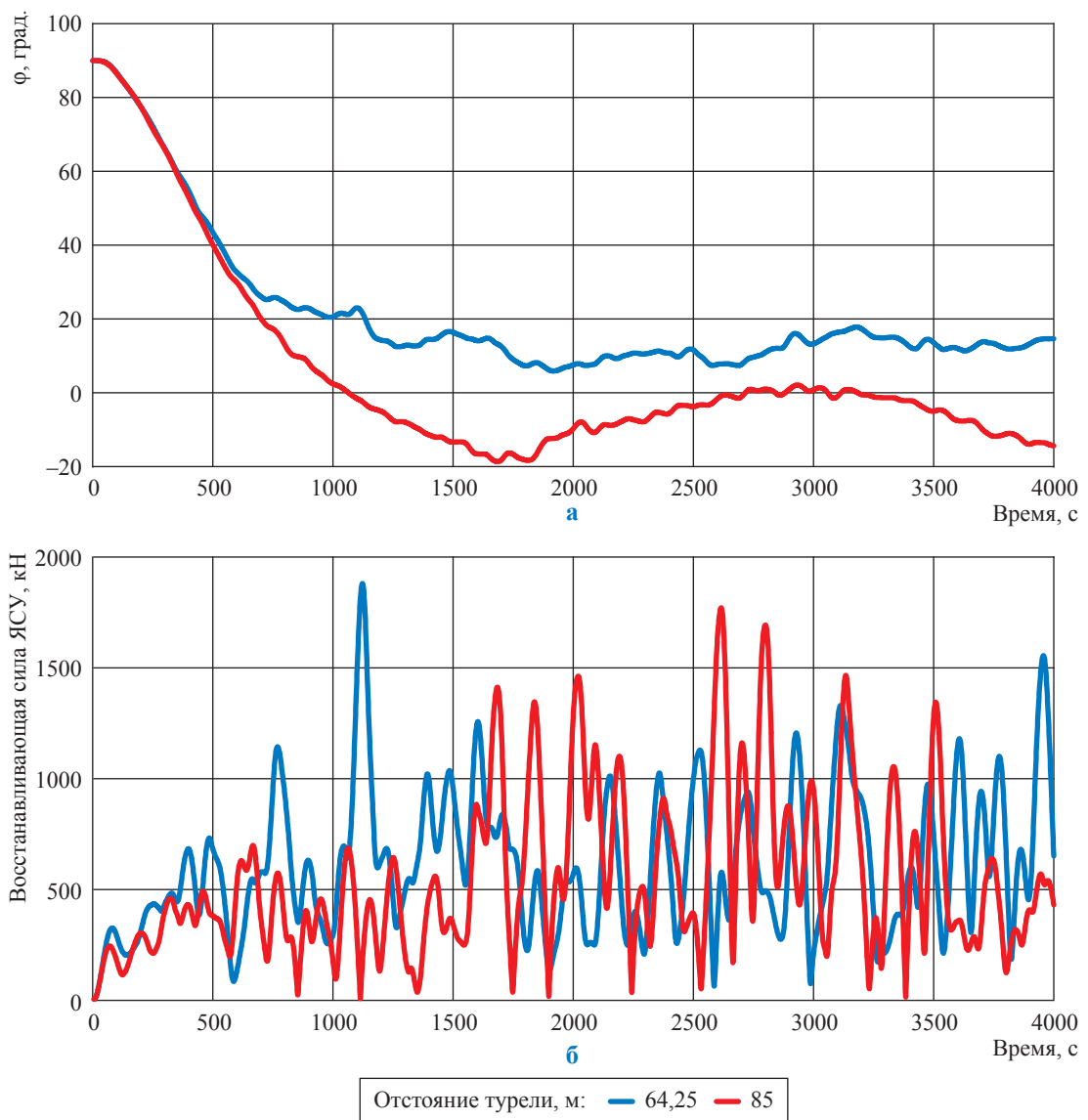


Рис. 2. Временная реализация угла курса судна (а) и реакции ЯСУ турели (б)

восстанавливающей силы ЯСУ. При этом амплитуда колебаний значений восстанавливающей силы после завершения разворота возросла.

### Динамика турельного судна при воздействии битого льда, дрейфующего в условиях приливной волны

В качестве одного из сценариев расчета динамики заякоренного турельного судна рассмотрен случай движения в условиях приливной волны, описываемой уравнением Свердруп [5]. Компоненты вектора скорости течения  $\vec{U}_s$  в волне Свердруп определяются по формулам:

$$U_{s,x} = \frac{A\omega_s}{k_s H} \cos \theta; \quad U_{s,y} = \frac{Af}{k_s H} \sin \theta; \quad \theta = k_s x - \omega_s t,$$

где  $A$ ,  $\omega_s$  и  $k_s$  – амплитуда, частота и волновое число волны Свердруп соответственно;  $H$  – глубина воды;  $f$  – параметр Кориолиса;  $t$  – текущее время. С учетом применимости объекта исследования к Штокмановскому месторождению в расчетах использованы параметры, характерные для 74° с.ш.:  $A = 0,1$  м;  $k_s = 2,583 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ ;  $f = 1,398 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_s = 1,405 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ;  $H = 3,000 \cdot 10^2 \text{ м}$  [5].

Исходя из кругового характера движения льдин, дрейфующих под действием течения волны Свердруп, построена расчетная область специальной конфигурации – из трех колец (рис. 3). Срединное кольцо, в котором расположен исследуемый объект, заполнено льдинами диаметром в среднем 40 м, наружный диаметр кольца – 3200 м, внутренний – 1800 м.

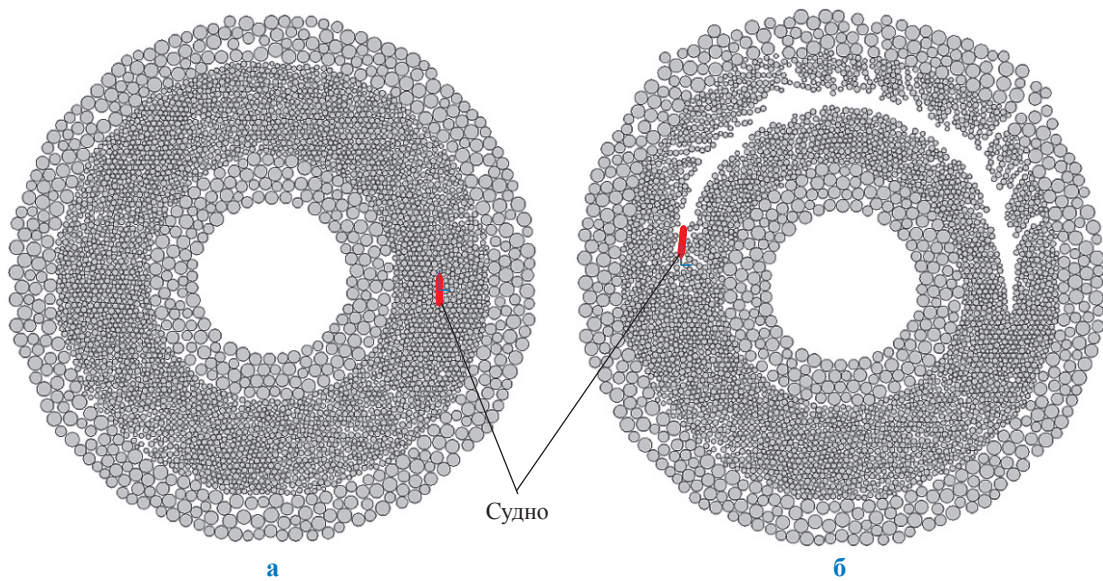


Рис. 3. Конфигурации расчетной области: а – начальная; б – через 7 ч

Для сокращения количества льдин, участвующих в расчете, срединное кольцо соседствует с внешней и внутренней кольцевыми областями (по 350 м толщиной), заполненными льдинами большего диаметра (в среднем 100 м). В каждой из трех областей сплоченность льдин составляет 72 %. Границы расчетной области свободны. Продолжительность воздействия приливного течения на судно полагается равной 7 ч.

Результаты расчетов с использованием разработанной численной модели показывают, что в условиях воздействия на турельное судно приливной волны и при наличии вокруг корпуса судна зоны битого льда со средним размером льдин 40 м происходит медленный разворот судна. При этом смещения турели и восстанавливающая сила имеют небольшие значения, и безопасный разворот судна возможен без использования собственных движителей (см. рис. 3б).

#### Поведение турельного судна под воздействием приливной волны Свердрупа в условиях ветра и сжатия ледяного поля

Второй расчетный сценарий воздействия волны Свердрупа на турельное судно изучает последовательное подключение двух дополнительных внешних факторов: ледового сжатия и ветра. Кроме того, исследовано влияние изменения коэффициента трения льда о корпус судна на ледовые нагрузки.

Для поставленной задачи расчетная область (см. рис. 3а) несколько модифицирована:

два концентрических кольца опоясывают круг. Внутренний круг диаметром 1583 м представляет собой неразрушенный участок ледяного поля толщиной 1 м. Срединное кольцо (внешний диаметр – 3190 м), в котором расположен исследуемый объект, заполнено льдинами (сплоченность 72 %) в среднем диаметром 40 м. Для сокращения количества льдин, участвующих в расчете, внешнее кольцо представлено слоем льдин диаметром в среднем 85 м. Границы расчетной области свободны.

На начальной стадии воздействия волны Свердрупа сжатие и ветер отсутствовали. Судно выполняло медленный разворот под действием приливной волны, формируя вблизи корпуса небольшие зоны чистой воды. Примерно через 33 мин после начала разворота судна возникает сжатие в ледяном поле. В численной модели сжатие имитируется дополнительными давлениями, которые прикладываются к расположенным по внешней границе расчетной области льдинам и направлены к ее центру. Значения этих давлений зависят от заданной степени сжатия. Расчеты выполнены применительно к сжатиям 1 и 2 балла, соответствующие значения давлений составили 10 и 30 кПа [7].

Результаты расчетов с применением описанной модели показывают, что появление сжатия приводит к быстрому закрытию канала за судном: примерно через 1,5 мин после начала действия сжатия силой 1 балл канал полностью закрылся. При сжатии интенсивность изменения угла  $\varphi$  оставалась практи-

чески постоянной: появились лишь некоторые колебания курса относительно прямой, соответствующей отсутствию сжатия (рис. 4). При этом наличие сжатия приводит к существенно увеличению средних и амплитудных значений ледовых нагрузок, передаваемых на ЯСУ (таблица, рис. 5). Изменение степени сжатия в диапазоне одного-двух баллов практически не сказалось на среднем значении ледовой нагрузки.

Расчеты показали существенное влияние на ледовую нагрузку состояния обшивки корпуса: увеличение коэффициента трения льда о корпус судна от 0,09 до 0,36 при сжатии силой 2 балла привело к росту среднего значения восстанавливающей силы от 1,7 до 2,8 МН (см. таблицу).

Один из расчетных сценариев предусматривал, что кроме воздействия на судно приливной волны и сжатия силой 1 балл в момент

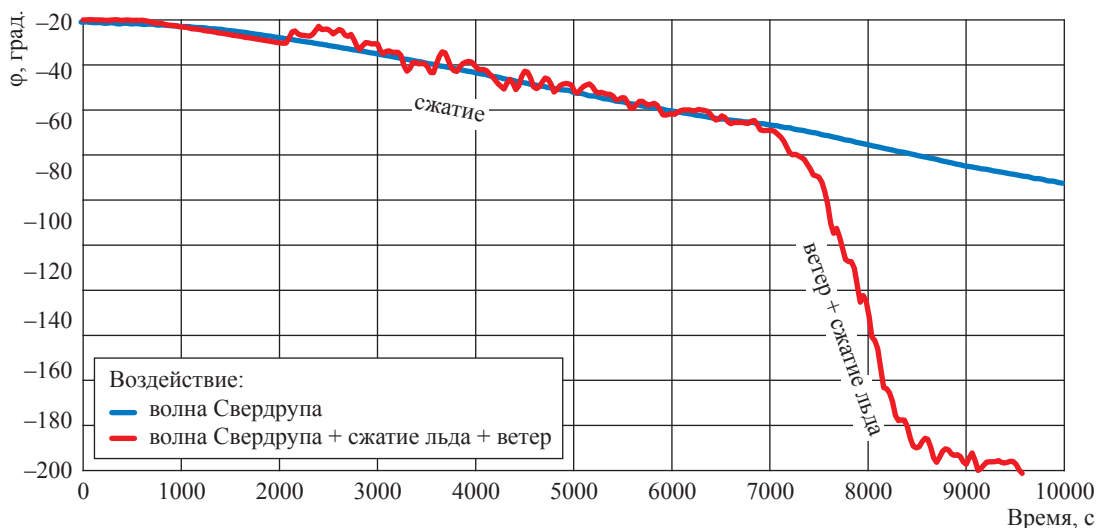


Рис. 4. Изменение курса судна

**Средние значения восстанавливающей силы при развороте судна под действием волны Свердрупа, МН**

Коэффициент трения лед/корпус	Без сжатия	Сжатие 1 балл	Сжатие 2 балла
0,09	0,7	1,7	1,7
0,36	–	–	2,8

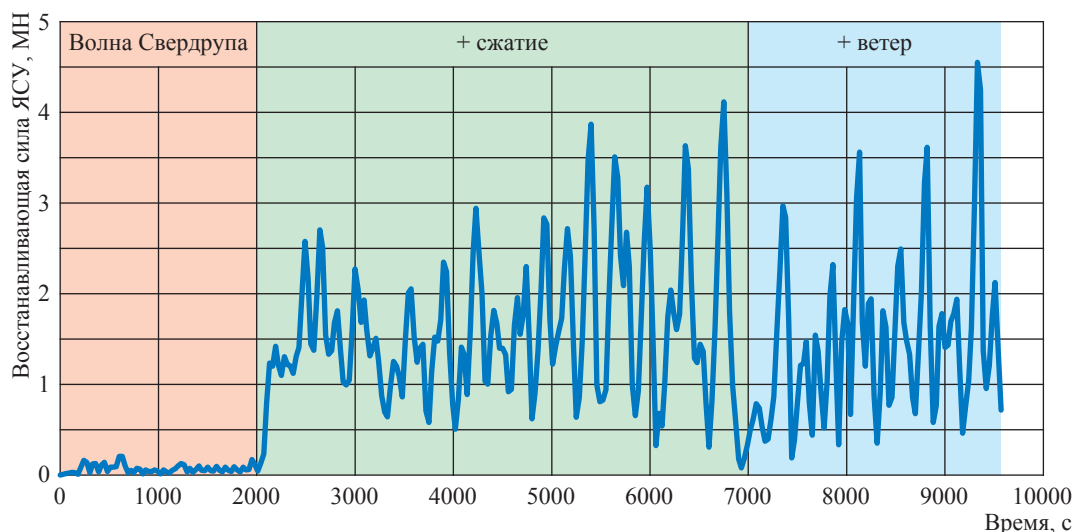


Рис. 5. Изменение восстанавливающей силы ЯСУ



времени  $t = 7020$  с (117 мин) под углом  $135^\circ$  начинает дуть ветер со скоростью 15 м/с. В численной модели учитывается влияние ветра как на дрейфующий лед, так и на корпус судна. Траектория движения льдин складывается из совместного действия течения и ветра. Результаты расчетов и данные натурных наблюдений за дрейфом льда в юго-восточной части Баренцева моря [4] показывают, что ветер скоростью больше 10 м/с становится определяющим фактором изменения направления дрейфа льда. Непосредственное влияние ветра на поведение судна обусловлено большой площадью парусности рассматриваемого объекта.

Появление ветра приводит к интенсивному развороту судна, стремящемуся минимизировать ветровое сопротивление. Равновесный  $\varphi \approx 196^\circ$ , и относительно него происходят небольшие колебания курса (см. рис. 4), т.е. корпус судна не устанавливается строго против ветра, что обусловлено дополнительным действием на судно других природных факторов.

Появление ветра не привело к заметному изменению характера поведения и значений восстанавливающей силы ЯСУ (см. рис. 5).

\*\*\*

В статье изучены некоторые сценарии воздействия природных факторов – ветра, течения и битого льда – на турельное судно, которые могут возникнуть при эксплуатации

реального объекта на замерзающей глубоководной акватории, например на Штокмановском месторождении. При изменении направления или интенсивности действия хотя бы одного из перечисленных факторов турельное судно начинает разворачиваться. Численные исследования показали, что положение центра турели по длине судна оказывает влияние на динамику разворота судна: чем дальше от миделя располагается центр турели, тем интенсивнее происходит разворот и тем меньше восстанавливающие силы в системе заякорения.

Исследования динамики турельного судна в битом льду под воздействием приливной волны Свердрупа дополнены оценкой влияния сжатия льда и ветра. Результаты показали, что возникновение сжатия силой 1–2 балла практически не сказывается на динамике движения судна под воздействием приливной волны, но при этом существенно (на порядок) возрастают нагрузки на систему заякорения турели. Если появляется еще один внешний фактор – ветер, скорость которого превышает 10 м/с, то круговая траектория дрейфа льда изменяется, что вместе с дополнительными аэродинамическими нагрузками, действующими на корпус судна, вносит существенные изменения в динамику разворота турельного судна.

При анализе результатов численного моделирования следует помнить об ограничениях использования расчетной модели [3].

## Список литературы

1. Karulin Ye. Numerical and physical simulations of moored tanker behavior / Ye. Karulin, M. Karulina // *Ships and Offshore Structures*. – 2011. – № 6 (3). – P. 179–184.
2. Карулин Е.Б. Аналитическое исследование динамики турельного судна в ледовых условиях / Е.Б. Карулин, М.М. Карулина // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. – СПб., 2010. – Вып. 51 (335). – 229 с.
3. Карулин Е.Б. Применение метода дискретных элементов для численного моделирования воздействия битого льда на заякоренные объекты / Е.Б. Карулин, М.М. Карулина // *Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа*. – М.: Газпром ВНИГАЗ, 2017. – № 4 (32). – С. 104–113.
4. Зубакин Г.К. Оценка ледовых условий в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения / Г.К. Зубакин, И.В. Бузин, А.А. Скутин // *Труды ААНИИ: Комплексные исследования и изыскания ледовых и гидрометеорологических явлений и процессов на арктическом шельфе*. – СПб.: ААНИИ, 2004. – Т. 449. – С. 124–139.
5. Марченко А.В. Влияние эффекта присоединенных масс на вращение и буксировку дрейфующих айсбергов / А.В. Марченко // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. – СПб., 2015. – Т. 86 (370). – С. 101–116.
6. Рахманин Н.Н. Рыскание и дрейф судна на якоре при действии ветра и течения / Н.Н. Рахманин // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова: сб. ст. по гидромеханике и динамике судна*. – Л.: Судостроение, 1967. – Вып. 239.
7. Тимохов Л.А. Динамика морских льдов / Л.А. Тимохов, Д.Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 272 с., ил.

## Numerical study of dynamics of a turret-moored vessel being influenced by managed ice

M.M. Karulina<sup>1\*</sup>, Ye.B. Karulin<sup>1</sup>

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

\* E-mail: m\_karulina@ksrc.ru

**Abstract.** The article presents results of numerical simulation for behavior of a turret-moored vessel being influenced by the external forces like winds, currents and managed ice. A model is based on solution of equations for horizontal motion of a vessel, and behavior of a managed ice field is described using a discrete element method. A version of a turret-moored vessel suggested for application at Stokman gas-condensate field in the Barents Sea is studied. Two scenarios of external impact possible in the Barents Sea waters in winter are examined, namely:

- turning of a vessel in presence of a wind, a current and the ice blocks drifting under the influence of the mentioned wind and current;
- vessel behavior within a field of managed ice drifting under the influence of a tidal wave.

The first scenario supposed estimation of an effect exerted by a position of a turret center along the lengthwise dimension of the vessel to dynamic and kinematic characteristics of its turn. At that, the vessel motion is affected by a wind, a current and ice acting in different directions. It was shown that dismissal of the turret center closer to a midsection reduced velocity of the vessel turn, increased deviation of a course angle and scaled up maximal and average restoring efforts of a turret anchor system. After turning the course angle was fluctuating near some constant value.

Under the influence of a tidal wave and in presence of the managed ice with given dimensions of the ice blocks the vessel was slowly slewing. At that values of turret dismissal and restoring effort were small, and safe turn of the vessel was possible without switching on of its own engines.

In course of numerical simulation an impact of the ice cover compression to the vessel turn dynamics and appearing ice loads was studied. At an initial stage of tide-wave influence there were neither compression, nor wind. The vessel was slowly turning under the influence of the tidal wave forming the pure-water areas of modest size behind the vessel body. According to calculations, a force-one-two compression led to rapid closing of a channel behind the ship, and to serious increase of the average and peak ice loads directed to the anchor system of the turret. Further appearance of the wind made the vessel slew intensively. Due to additional effect of other factors the ship body didn't settle right opposite the wind. Against a background of compression impact the wind practically didn't increase the effort of the turret anchor system.

**Keywords:** turret-moored vessel, numerical simulation, managed ice, discrete element method, ice drift, tidal wave.

### References

1. KARULIN, Ye.B. and M.M. KARULINA. Numerical and physical simulations of moored tanker behavior. *Ships and Offshore Structures*. 2011, no. 6(3), pp. 179–184. ISSN 1744-5302.
2. KARULIN, Ye.B. and M.M. KARULINA. Analytic study of a turret-moored vessel dynamics in ice conditions [Analiticheskoye issledovaniye dinamiki turelnogo sudna v ledovykh usloviyakh]. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. St. Petersburg, 2010, is. 51(335). ISSN 0869-8422. (Russ.).
3. KARULIN, Ye.B. and M.M. KARULINA. Discrete element approach to numerical simulation of managed ice effect to the anchorage-dependent facilities [Primeneniye metoda diskretnykh elementov dlya chislennogo modelirovaniya vozdeystviya bitogo lda na zayakorennyye obyekty]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2017, no. 4(32): Modern approach and promising technologies within the projects for development of oil-and-gas fields at the Russian continental shelf [Sovremennyye podkhody i perspektivnyye tekhnologii v proyektakh osvoyeniya neftegazovykh mestorozhdeniy rossiiskogo shelfa], pp. 104–113. ISSN 2306-8949. (Russ.).
4. ZUBAKIN, G.K., I.V. BUZIN and A.A. Skutin. Estimation of ice conditions nearby Shtokman gas-condensate field [Otsenka ledovykh usloviy v rayone Shtokmanovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya]. *Trudy AANII*. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2004, vol. 449: Complex research and investigation of ice and hydrometeorological phenomena and processes at the Arctic shelf [Kompleksnyye issledovaniya i izyskaniya ledovykh i gidrometeorologicheskikh yavleniy i protsessov na arkticheskoy shelfe], pp. 124–139. ISSN 0130-5123. (Russ.).
5. MARCHENKO, A. Influence of added masses on rotation and towing of drifting icebergs [Vliyaniye effekta prisoyedinennykh mass na vrashcheniye i buksirovku dreyfuyushchikh aisbergov]. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. St. Petersburg, 2015, is. 86(370), pp. 101–116. ISSN 2542-2324. (Russ.).
6. RAKHMANIN, N.N. Snaking and drifting of an anchored vessel under the influence of a wind and a current [Ryskaniye i dreyf sudna na yakore pri deystvii vetra i techeniya]. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1967, is. 239: collected papers on hydromechanics and dynamics of vessels. ISSN 0869-8422. (Russ.).
7. TIMOKHOV, L.A. and D.Ye. KHEYSIN. *Dynamics of sea ices* [Dinamika morskikh ldov]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. (Russ.).