

УДК 629.563

Д.А. Онищенко, А.В. Марченко

Моделирование разворота на месте плавучего сооружения судового типа с внутренней турелью в условиях сплоченного ледяного покрова

Ключевые слова:

технологическое судно, якорная система удержания, ледовая нагрузка, разворот на месте, математическая модель.

Keywords:

ship-shaped production unit, mooring system, ice actions, turning on the spot, mathematical model.

В связи с перспективами освоения морских месторождений углеводородов в Арктике и в других ледовитых морях, расположенных на глубинах, исключающих применение стационарных платформ (на уровне современных технологий критической в этом смысле считается глубина моря порядка 150 м), на повестку дня выносятся вопросы технической осуществимости применения плавучих сооружений. Одной из основных задач, требующих решения для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации плавучего сооружения, является позиционирование при ледовых воздействиях (см., например, [1, 2] и ссылки внутри).

В целом с точки зрения формы сооружения в плане все плавучие ледостойкие сооружения, применяемые в морской нефтегазодобыче, могут быть поделены на две большие группы: 1) судового формы, когда один линейный размер (длина) в несколько раз превышает другой (ширину), и 2) осесимметричной (или циклически симметричной) формы, когда размеры сооружения в плане одного порядка. Применительно к представителям первой группы обычно используют термин «технологическое судно» (ТС), второй – «морская платформа». На уровне концептуальных проработок предлагаются смешанные варианты сооружений – типа «обрубленного судна», когда корпус имеет судовые обводы, но его длина того же порядка, что и ширина [3, 4].

Одно из принципиальных отличий представителей двух указанных групп заключается в том, что значения ледовой нагрузки на морскую платформу обычно слабо зависят от ориентации платформы относительно направления дрейфа льда, в то время как для ТС нагрузка при ориентации корпуса перпендикулярно направлению дрейфа льда может в разы превышать нагрузку при ориентации навстречу дрейфующему льду. Поэтому при проектировании ТС отдельного исследования требует вопрос, насколько эффективно заякоренное судно способно совершать разворот на месте в данных ледовых условиях.

Известно, что в ледовитых морях достаточно часто наблюдается резкое изменение направления дрейфа льда [1, 5]. В качестве характерного примера можно привести ситуацию в Печорском море. Согласно данным наблюдений [1] события, заключающиеся в смене направления дрейфа льда на 135° и больше за отрезок времени, не превышающий 15 мин, фиксируются там в среднем 1,5 раза в сутки. Разворот может быть активным, когда крутящий момент создается в основном тягой движителей, и пассивным – крутящий момент создается без участия движителей судна лишь за счет воздействия надвигающегося льда. В силу отсутствия в русскоязычной технической литературе общепринятых аналогов англоязычных терминов *weather-vaning* и *ice-vaning*, которые дословно переводятся на русский как «разворачивание против ветра (или волны)» и «разворачивание против дрейфа льда» соответственно, далее будем использовать для обозначения способности судна совершать пассивный разворот в условиях переменного дрейфа не вполне устоявшийся по причине новизны термин «флюгирование» [6].

Перспективным с точки зрения решения задачи удержания ТС на месте в условиях дрейфующего льда является применение технологии динамического позиционирования при помощи набора движителей различной конструкции с соответствующей системой управления. В последние годы для изучения возможностей и ограни-

чений данного технологического направления реализован целый ряд трудоемких экспериментальных исследований в ледовых бассейнах, а также проведено математическое моделирование [7–9]. В настоящее время считается, что технологии динамического позиционирования имеют ограниченные возможности в условиях тяжелых льдов. В работе [2] указывается, что предельное значение толщины льда для эффективного применения систем динамического позиционирования определяется массогабаритными характеристиками судна и параметрами движительной установки, а также свойствами системы управления движителями. Утверждается, что на современном уровне развития технологии можно ожидать, что предельное значение толщины льда находится в диапазоне 0,5–1 м даже при условии, что лед был обработан ледоколами. Поэтому задача моделирования пассивного разворота в тяжелых льдах остается актуальной. Особую опасность порождают ситуации сжатия, даже в битом льду, поскольку существенно затрудняются процессы очищения пространства ото льда в окрестности бортов судна [2].

Задача о пассивном развороте исследовалась в ледовых бассейнах и в рамках численного моделирования [4, 10, 11]. Отметим, что критической характеристикой в задаче является максимальное значение удерживающей силы, реализуемое в процессе разворота.

В задаче имеется несколько важных параметров, влияющих – в различной степени – на это значение. В число таких параметров входят: давление льда на борта судна; скорость дрейфа; жесткость системы якорного позиционирования; массогабаритные характеристики судна, включая расположение внутренней турели. Трудоемкость экспериментов в ледовых бассейнах не позволяет выполнить полноценный параметрический анализ данной задачи. То же относится и к моделированию с использованием метода дискретных элементов, поскольку основное время расчетного процесса приходится на анализ взаимодействия обломков льда друг с другом [10, 12].

В настоящей работе в рамках относительно простых инженерных моделей представлена аналитическая оценка мощности движителей, требуемой для совершения активного разворота ТС в ледовых условиях, а также максимального значения восстанавливающей силы, возникающей в системе удержания в процессе пассивного разворота судна в условиях сплошного дрейфующего льда.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу о развороте судна с внутренней турелью и одноточечной системой заякорения (рис. 1) под действием дрейфующего льда (пассивный разворот, см. рис. 1а), а также, возможно, сил, создаваемых движителями

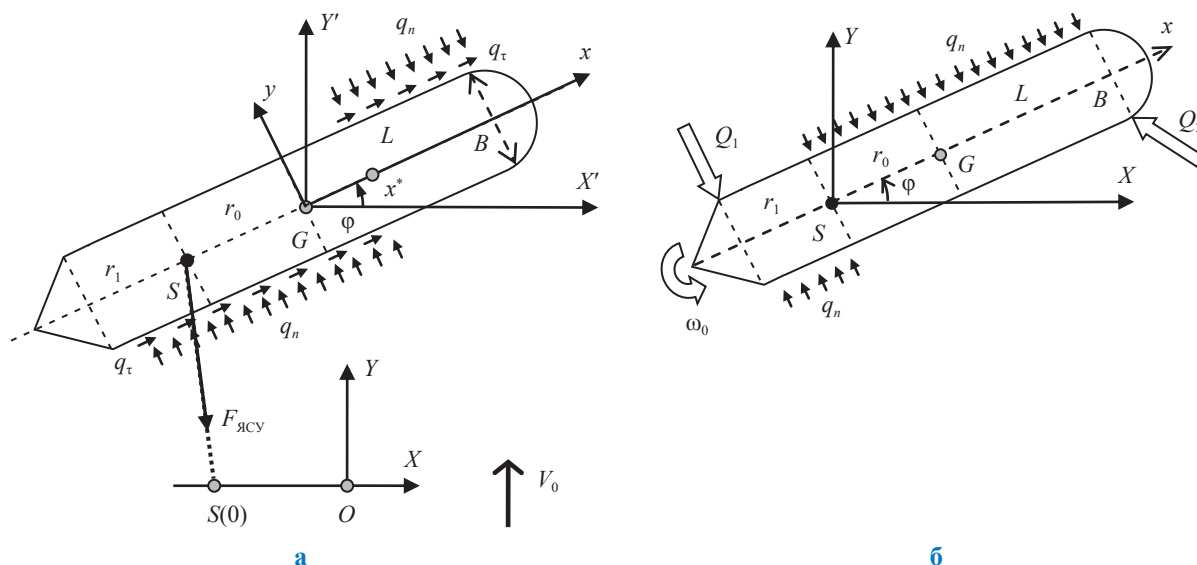


Рис. 1. Расчетная схема пассивного (а) и активного (б) разворотов заякоренного судна в ледовых условиях:

$2L$ – длина судна; B – ширина судна (на уровне ватерлинии);
 r_0 – расстояние между турелью и центром тяжести G ; m – полная масса судна

(активный разворот, см. рис. 1б). Ограничимся плоской постановкой задачи: исключим из рассмотрения возможную вертикальную, бортовую и килевую качку. Пусть турель (точка S) смещена в носовую часть относительно середины судна G (в целях упрощения рассматривается случай, когда центр тяжести судна расположен в средней точке). Далее, предполагаем, что дрейф льда происходит со скоростью V_0 в направлении оси Y неподвижной системы координат OXY . Под воздействием надвигающегося льда корпус судна начинает смещаться, а также вращаться вследствие возникновения и роста восстанавливающей силы $F_{ясу}$ со стороны якорной системы удержания (ЯСУ). Для удобства поместим начало неподвижной системы координат O в точку, совпадающую с начальным расположением турели (точка $S(0)$ на рис. 1а). В последующих численных расчетах будем использовать следующие характерные для ТС (см., например, [13, 14]) значения основных характеристик судна: $L = 150$ м; $B = 50$ м; осадка судна $T = 15$ м; $r_0 = 90$ м; $m = 200$ тыс. т.

Вначале рассмотрим задачу об активном развороте. Используется упрощенная постановка, которая, тем не менее, позволяет получить оценки необходимой мощности двигательной установки ТС.

Активный разворот

Рассмотрим задачу об активном развороте судна на месте (см. рис. 1б): предполагаем, что судно вращается вокруг некоторой фиксированной точки (в данном случае вокруг точки S , где расположена турель и в которой осуществляется закрепление всех якорных линий системы удержания) под действием двигателей. Для эффективного создания закручивающего момента необходимо применение устройств с азимутальным вращением, например, винторулевых колонок (ВРК) или, возможно, других подруливающих устройств. Применение ВРК, например типа «азипод» (Azipod), позволяет создавать тягу в произвольном направлении. Соответствующие суммарные усилия в носовой и кормовой частях судна показаны на рис. 1б как Q_1 и Q_2 .

В условиях наличия ледяного покрова лед оказывает сопротивление смещению бортов судна, что обычно описывается в терминах нормального давления льда (q_n) и касательных сил (q_τ): $q_\tau = \mu q_n$, где μ – коэффициент трения льда по корпусу судна. Для судов прини-

мается $\mu = 0,1 \dots 0,15$. Отметим, что q_n и q_τ являются погонными нагрузками и имеют размерности [Н/м]. В случае однородного распределения льда по борту судна можно считать, что $q_n = p_n h$, где p_n – давление льда на борт, а h – эффективная толщина ледяного покрова.

Если точка размещения турели S , вокруг которой судно должно совершать разворот, не совпадает с центром тяжести судна, то движители в носовой и кормовой частях судна должны быть ориентированы специальным образом, чтобы исключить трансляционное смещение судна. Ограничимся пока рассмотрением простейшего случая, когда ось вращения судна проходит через центр тяжести судна ($r_0 = 0$ на рис. 1б); при этом считаем, что системы носовых и кормовых движителей расположены на одинаковом расстоянии L от точки G . Предполагаем, что $Q_1 = Q_2 = Q_0$; в этом случае создаваемый движителями закручивающий момент (Mom_0) равен $2LQ_0$.

Согласно информации производителей азиподов компании ABB Marine [15], график зависимости тяги движителя при испытаниях на швартовых от мощности гребного винта для различных типоразмеров близок к линейной функции и может быть аппроксимирован как $P \approx 10Q$, где Q – предельная тяга одного азипода, МН; P – мощность азипода, МВт (в настоящее время доступны азиподы мощностью до 20 МВт). Известны несколько отличающиеся оценки соотношения между данными характеристиками: например, в работе [2] приводится более выигрышное соотношение $P \approx 5Q$.

Получим оценки потребной мощности для разворота ТС на месте в двух постановках:

1) *случай фиксированной ледовой нагрузки на борт судна* (схема 1). Предполагаем, что судно совершает разворот с постоянной угловой скоростью ω_0 и что погонная нагрузка от воздействия льда на борт при этом постоянна и характеризуется значением q_n . Нагрузкой от трения льда по бортам судна пренебрегаем.

При смещении бортов судна движители совершают работу по разрушению ледяного покрова. Для целей настоящего исследования ограничимся интегральным подходом, а именно: будем оценивать затраты работы δA на преодоление сопротивления льда с помощью соотношения $\delta A(dx) = q_n dx d\mathbf{u}$, где dx – длина участка корпуса судна, контактирующего со льдом; $d\mathbf{u}$ – элементарное смещение корпуса по нормали за время δt . Учитывая, что судно взаимо-

действует с ледяным покровом по обоим бортам, и выполняя интегрирование по всей длине корпуса, находим

$$\delta A = 2 \int_0^L q_n \delta u dx,$$

где $\delta u = x\omega_0 \delta t$. Так как мощность $W = \delta A / \delta t$, находим $W = q_n \omega_0 L^2$. Положим $\omega_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ рад/с (при этом поворот на 90° произошел бы за время $T_{\pi/2} = \pi / (2\omega_0) \approx 25$ мин), тогда $W \approx 22,5 q_n$.

Таким образом, даже при $q_n \sim 1$ МН/м необходимая мощность составляет порядка 22,5 МВт, что в силу приведенных выше оценок не представляется чрезмерно большой величиной. Однако выясняется, что проблема состоит в другом: в величине закручивающего момента, который должны создавать двигатели судна. Действительно, как нетрудно видеть, результирующий момент от сопротивления льда ($M_{\text{лед}}$) составит:

$$M_{\text{лед}} = q_n L^2 = 2,25 \cdot 10^4 q_n,$$

а закручивающий момент, создаваемый двигателями, ($M_{\text{движ}}$) –

$$M_{\text{движ}} = 2Q_0 L = 300Q_0. \quad (1)$$

Поэтому даже при весьма умеренном давлении льда $q_n = 0,1$ МН/м и при тяге двигателей $Q_0 \sim 1$ МН сопротивление льда на порядок превышает эффект действия двигате-

лей. Из приведенных оценок следует, что более или менее эффективно активный разворот может совершаться в условиях только достаточно слабого ледяного покрова, когда погонная нагрузка от льда не превышает значения порядка $q_n = 0,01$ МН/м;

2) *случай возрастающей ледовой нагрузки на борт судна* (схема 2). Результаты приведенного ранее анализа говорят, в частности, о том, что эффективность «флюгирования» в условиях дрейфа ледяного покрова в существенной степени может определяться ожидаемым уровнем ледового давления на борту судна. Представляется очевидным, что использовать в этих целях значение ледового сопротивления судов ледового класса не корректно, так как при поступательном движении сопротивление льда значительно снижено благодаря форме носа судна (рис. 2). Угол наклона шпангоута β на уровне ватерлинии WL в средней части корпуса, или на миделе, (C_L) не может иметь больших значений (см. рис. 2а). Например, требованиями Российского морского регистра судоходства [16] устанавливается, что для судов арктических классов Arc8, Arc9 угол наклона шпангоута на миделе должен составлять не менее 15° ; при этом для ледоколов рекомендованы значения $\beta = 15 \dots 20^\circ$. В то же время, например, для ТС Terra Nova, эксплуатируемого на одноименном месторождении на Ньюфаундленской банке, угол β близок к нулю (форма сечения корпуса данного ТС показана

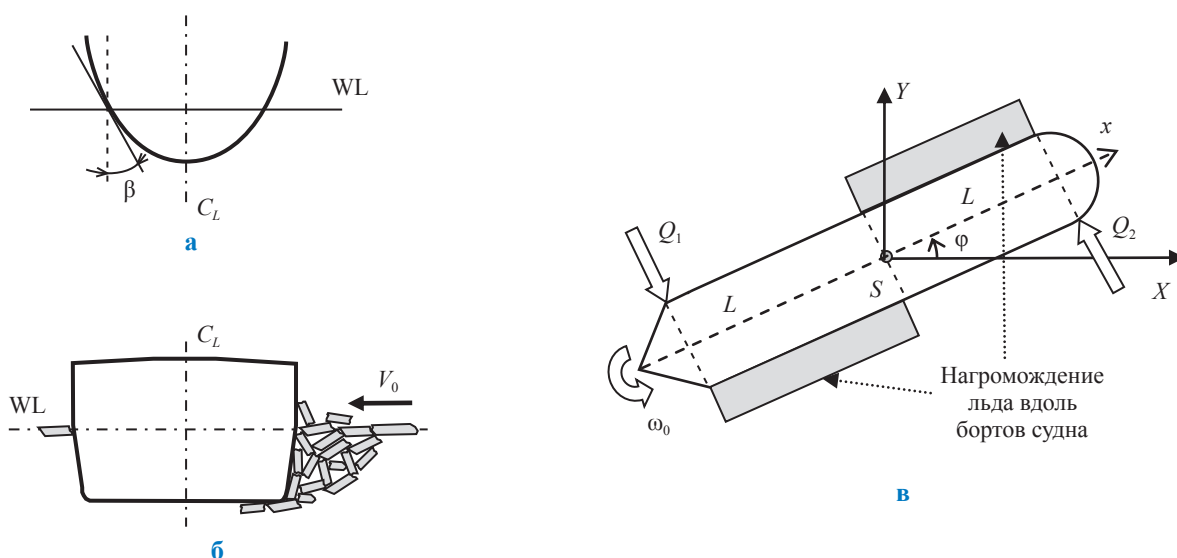


Рис. 2. Нагромождение льда вдоль бортов судна при малых значениях углов наклона β шпангоутов корпуса: а – угол наклона шпангоута β на миделе; б – форма сечения корпуса судна Terra Nova; в – формирование нагромождений льда в процессе разворота ТС

на на рис. 2б [13]). Практически вертикальный вход борта судна в воду в средней части корпуса с большой вероятностью будет провоцировать образование нагромождений льда и, кроме того, порождать довольно высокий уровень нагрузок при воздействии ровного льда, который может разрушаться как изгибом, так и смятием. Характерные свидетельства такой картины получены, например, при выполнении модельных испытаний в ледовом бассейне [10].

Формирование нагромождений льда у бортов сооружения может наблюдаться и при достаточно небольших углах наклона бортов. Например, в работах [9, 17] отмечается, что при эксплуатации буровой баржи (платформы) «Куллу» (*англ.* Kulluk) в случаях, когда имели место сжатия в ледяном покрове, иногда наблюдалось формирование нагромождений льда перед передней гранью платформы и именно в таких ситуациях ледовые нагрузки достигали наибольших значений. Имеются также свидетельства возникновения схожих ситуаций при условии предварительной обработки льда ледоколами [18].

При развороте ТС на месте нагромождения льда формируются у обоих бортов судна (см. рис. 2в). Чтобы оценить нагрузки, соответствующие такому сценарию, можно воспользоваться результатами работы [19], где изучались процессы строительства торосов при сжатиях в ледяном покрове. Было показано, что линейная нагрузка (усилие сжатия на единицу длины контакта двух льдин) может быть определена с помощью следующего соотношения:

$$q_n = 2\rho_{\text{лед}} g \mu_{\text{л/л}} U (1 + k^2)^{-1}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{лед}}$ – плотность льда; g – ускорение свободного падения; $\mu_{\text{л/л}}$ – коэффициент трения льда по льду; U – удельный объем нагромождения (приходящийся на единицу длины тороса); k – отношение осадки киля тороса к высоте паруса (по результатам натурных наблюдений можно принять $k = 4$ в предположении, что парус и киль тороса находятся в гидростатическом равновесии). Следует отметить, что нарушение условия гидродинамического равновесия паруса и киля (такая ситуация может иметь место в силу достаточно высокой изгибной жесткости неразрушенного ледяного покрова), вообще говоря, приводит к росту нагрузки [20].

При развороте судна на месте картина образования нагромождений обломков неодно-

родна вдоль бортов судна. Объем льда, из которого формируется нагромождение в точке x (см. рис. 3в), очевидно, зависит от длины дуги окружности, которую описывает точка x в процессе разворота ТС. Таким образом, $U(x) = hx\varphi$, откуда следует, что

$$q(x, \varphi(t)) = 2\rho_{\text{лед}} g \mu_{\text{л/л}} hx\varphi(t)(1 + k^2)^{-1},$$

где $\varphi(t)$ – текущее значение угла поворота судна, достигнутое к моменту времени t от начала разворота. Тогда закручивающий момент может быть вычислен по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Mom}_{\text{лед}}(\varphi(t)) &= 2 \int_0^L q_n(x, \varphi(t)) x dx = \\ &= \frac{4}{3} \rho_{\text{лед}} g \mu_{\text{л/л}} h L^3 (1 + k^2)^{-1} \varphi(t), \end{aligned}$$

откуда при $\rho_{\text{лед}} = 920$ кг и $\mu_{\text{л/л}} = 0,3$ получаем следующую оценку крутящего момента при угле поворота $\varphi = \pi/4$, препятствующего развороту ТС:

$$\text{Mom}(\pi/4) = 562h, \text{ МН}\cdot\text{м},$$

(здесь и ниже значение h берется в метрах). Видно, что когда толщина надвигающегося на ТС льда составляет 1 м, найденное значение $\text{Mom}(\pi/4)$ существенно превосходит значение момента $\text{Mom}_{\text{движ}}$ (см. (1)), создаваемого движителями, откуда следует, что при сделанных предположениях активный разворот ТС будет достаточно быстро заблокирован льдом.

В то же время линейная нагрузка на борта судна оказывается весьма умеренной: в районе носа и кормы, где она максимальна, ее значение составляет $q(L; \pi/4) \sim 0,028h$, МН/м, что соответствует не полностью развитому нагромождению. Можно предположить, что максимальное значение нагрузки достигается в момент времени, когда осадка нагромождения сравнивается с осадкой судна. Удельный объем нагромождения можно оценить по формуле $U \approx h_k^2 / (2 \tan \theta)$, где θ – угол ската нагромождения и h_k – осадка киля. Полагая $\theta \approx 30^\circ$ (типичное значение) и $h_k \approx T = 15$ м, можно найти, что $U \approx 195 \text{ м}^2$. Из соотношения (2) теперь следует, что оценка максимального давления на корпус ТС исходя из сценария торосения приводит к значению $q_n = 0,062$ МН/м.

Сопоставим значения нагрузки на корпус ТС, полученные из разных источников.

Поскольку, как показано ранее, уровень ледовой нагрузки на борта судна имеет определяющее значение с точки зрения его возможности совершать активный разворот в ледовых условиях, выполним сопоставление соответствующих данных, как экспериментальных (натурных и модельных), так и полученных путем математического моделирования.

В таблице представлены данные из различных источников, характеризующие ледовую нагрузку на сооружение с наклонной гранью. В частности, в работе [17] представлены натурные данные, полученные для плавучей буровой платформы «Куллу», имеющей на уровне ватерлинии форму обратного конуса с углом наклона к горизонту порядка 30° , диаметр 70 м и осадку 11 м.

Можно отметить близость значений, показанных в 4- и 5-м столбцах. Это позволяет предположить, что значения, показанные в 3-м столбце, соответствуют нагрузке на платформу «Куллу», создаваемой вследствие нагромождения обломков льда. Указанные значения ниже значений, приведенных в столбцах 6, 7 и 8, но тем не менее существенно выше значения $q_n \sim 0,01$ МН/м, которое мы приняли как пороговое для возможности реализации активного разворота ТС с помощью движителей. Основываясь на представленных результатах, можно предположить, что в условиях битого сплоченного льда значения линейной нагрузки на борта протяженного ТС при его развороте на месте могут находиться в диапазоне $q_n \sim 0,1 \dots 0,3$ МН/м.

Оценка силы удержания при пассивном развороте

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что в условиях сплоченного льда закручивающий момент от действия льда на борта ТС значительно превышает закручивающий момент, создаваемый движителями. Отсюда следует, что в случае начала дрейфа льда в направлении, перпендикулярном борту судна, вклад движителей в обеспечение разворота судна является незначительным – по крайней мере до того момента, когда около бортов судна не начнут появляться зоны, свободные ото льда. Поэтому на начальном этапе будет реализовываться схема пассивного разворота ТС в условиях плотного контакта корпуса со льдом (рис. 3).

Можно предположить, что в течение некоторого отрезка времени корпус судна смещается вместе со льдом поступательно вдоль оси Y (см. рис. 3а) без видимого вращения. Эта гипотеза подтверждается следующей оценкой ускорения, которое ледовая нагрузка способна придать судну. Так как максимальное значение ледовой нагрузки на борт равно $2q_n L = 30 \dots 90$ МН и присоединенная масса $m_{пр} \approx m$ в ситуации поперечного смещения судна, то ускорение $a = 2q_n L / (m + m_{пр})$ может составить $0,075 \dots 0,225$ м/с. Поэтому, если скорость льда составляет порядка $0,1 \dots 0,5$ м/с, то даже с учетом сил гидродинамического сопротивления судно достаточно быстро достигнет скорости дрейфа льда. Таким образом, можно заключить, что поток льда как бы «подхватывает» судно и переносит его без вращения.

Горизонтальная нагрузка (на метр ширины преграды), действующая на грань сооружения с углом наклона к горизонту 30° , МН/м

h , м	Платформа «Куллу», натурные измерения ¹			Изгибное разрушение льда (теория) ^{2,3} , $\mu = 0,1/0,15$	«Куллу», численное моделирование ⁴	Платформа типа Sevan (концепция) ⁵	Торошение (теория) ⁶
	ровный лед	обработанный лед, очистка затруднена	разность значений в столб. 2 и 3				
1	2	3	4	5	6	7	8
1,0	0,034	0,025	0,009	0,011/0,012	0,086/0,069	–	0,062
1,5	0,049	0,032	0,017	0,018/0,020	0,19/0,14	–	0,062
2,0	0,064	0,038	0,026	0,025/0,028	0,32/0,23 ⁷	0,20	0,062

Примечания:

¹ [17], показаны значения силы удержания;

² [21];

³ [22];

⁴ [23], приведены значения нагрузки на корпус / силы удержания (случай ровного льда);

⁵ [24], модельные испытания (ровный лед толщиной $h = 1,9$ м);

⁶ [19], предельное значение силы при торошении;

⁷ экстраполированные значения.

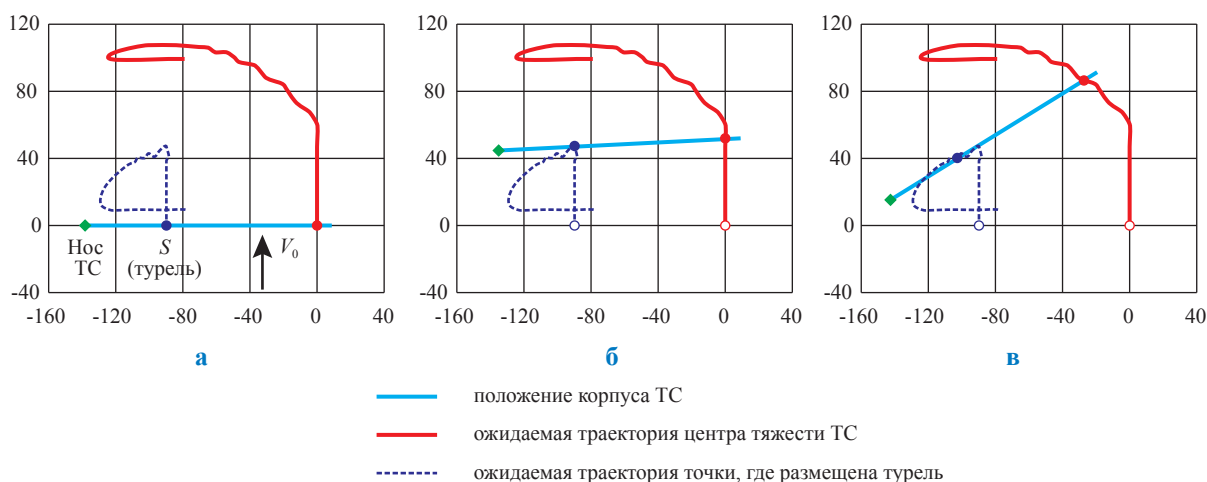


Рис. 3. Начальная стадия процесса пассивного разворота ТС в сплоченном льду:

по горизонтальной и вертикальной осям отложены расстояния в метрах;

а – поступательное смещение корпуса на начальном этапе, $t = 0$;

б – промежуточный этап, $t = t_1$; в – этап вращения ТС, $t = t_2$

По мере смещения судна будет постепенно возрастать удерживающая сила $F_{\text{ЯСУ}}$, а следовательно, и создаваемый ею закручивающий момент. Но разворот судна сможет начаться лишь тогда, когда удерживающая сила достигнет определенного значения и создаст закручивающий момент, превышающий момент, создаваемый давлением льда (см. рис. 3б). Оценим это значение, после достижения которого можно ожидать наступления этапа вращения ТС (см. рис. 3в).

Предположим, что в точке x^* расположен текущий мгновенный центр вращения ТС. В этой точке происходит смена борта, на который активно воздействует лед: при $x < x^*$ лед воздействует на левый борт, а при $x > x^*$ – на правый (см. рис. 1а). Найдем такое значение силы удержания $F_{\text{ЯСУ}}$, при котором еще возможно квазистатическое равновесие сил, действующих на корпус, – силы удержания и ледовой нагрузки (силами демпфирования здесь пренебрегаем). Запишем равенство сил, действующих вдоль оси Y , и равенство моментов относительно центра тяжести (точки G):

$$\begin{cases} 2x^* q_n = F_{\text{ЯСУ}}; \\ (L^2 - x^{*2}) q_n = F_{\text{ЯСУ}} r_0. \end{cases}$$

Решая эту систему, находим положение точки x^* –

$$x^* = -r_0 + \sqrt{L^2 + r_0^2} \approx 85 \text{ м} -$$

и критическое значение удерживающей силы, при достижении которого можно ожидать начала активного разворота –

$$F_{\text{ЯСУ}}^* \approx 170 q_n,$$

что составляет 17, 34 и 51 МН при $q_n = 0,1; 0,2; 0,3$ МН/м соответственно. Отметим, что по состоянию на 2011 г. самая мощная во всем мире ЯСУ для проектируемого ТС (Scarv, норвежский континентальный шельф) характеризовалась предельным значением восстанавливающей силы около 53 МН.

Заметим также, что полученное выше значение $F_{\text{ЯСУ}}^*$ примерно в 2 раза ниже максимально возможного квазистатического значения ледовой нагрузки $2Lq_n = 300q_n$ (реализуемого в случае, когда судно сохраняет самое невыгодное положение поперек дрейфа льда), но принципиально выше значения ледовой нагрузки, когда судно ориентировано носом против дрейфа:

$$F_{\text{ЯСУ},0} = Bq_{n,0},$$

где $q_{n,0}$ – характеристика ледового сопротивления, которая определяется геометрией носовой части судна. В любом случае, $q_{n,0} \ll q_n$.

Полученные оценки позволяют предположить, что при пассивном развороте в условиях сплоченного льда усилия в ЯСУ потенциально могут достигать достаточно больших значений,

на порядок и больше превышающих значения, реализуемые при расположении ТС носом против дрейфа льда.

В работе рассмотрены инженерные модели для задачи о пассивном и активном развороте технологического судна в условиях дрейфующего льда. Используется подход, в рамках которого воздействие льда описывается непрерывной моделью, в отличие от моделей, где лед имитируется совокупностью дискретных объектов. При построении моделей учитываются условия сплоченного льда, когда при развороте судна процессы очищения пространства около его бортов ото льда затруднены. По результатам исследования могут быть сделаны следующие выводы.

1. В условиях сплоченного льда помощь движителей при совершении разворота ТС на месте может быть эффективной лишь в условиях достаточно слабого льда, когда давление льда на борт судна составляет порядка 0,01 МН/м.

2. При возобновлении дрейфа льда из состояния покоя при расположении ТС перпендикулярно направлению дрейфа возможна реализация явления «захвата» судна дрейфующим ледяным покровом. На этом этапе наблюдается трансляционное смещение судна в направлении дрейфа льда без изменения его ориентации (отсутствует вращательная компонента).

3. Разворот начинается только после смещения ТС на определенное расстояние, соответствующее некоторому критическому значению силы удержания. Согласно полученным оценкам это значение существенно превышает величину ледового сопротивления ТС при его ориентации носом против дрейфа льда и составляет более 50 % статического значения, соответствующего положению судна бортом к направлению дрейфа льда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 15-55-20003 Норв_а и при поддержке Исследовательского совета Норвегии (Research Council of Norway) в рамках проекта 243930 (FIMA).

Список литературы

1. Bonnemaire B. Challenges related to station-keeping in ice / B. Bonnemaire, A. Jensen, O.T. Gudmestad, T. Lundamo, S. Løset // Proc. of 9th annual INTSOK Conference. – Houston, Texas, 2007.
2. Riska K. Station keeping in ice – challenges and possibilities / K. Riska, E. Coche // Proc. of 22nd Int. POAC Conf. – Espoo, Finland, 2013.
3. Blagovidov L.B. Ice-resistant turret-based mobile drilling unit with the wedge-shaped hull approximating ship form (wedge-shaped ship) / L.B. Blagovidov, M.V. Kovalyov, I.L. Blagovidova, L.V. Kolchenko, V.F. Lensky // Proc. of 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2013). – Nantes, France, 2013.
4. Kovalyov M.V. Model testing of turret-based drill ship in ice conditions / M.V. Kovalyov, A.A. Dobrodeev, I.L. Blagovidova, K.E. Sazonov, L.V. Kolchenko, N.Yu. Klementieva, L.B. Blagovidov // Proc. 22nd Int. POAC Conf. – Espoo, Finland, 2013.
5. Rossiter C. Drift direction changes and implications for sea ice management / C. Rossiter, R. McKenna // Proc. of 22nd Int. POAC Conf. – Espoo, Finland, 2013.
6. Таровик В. Суда технологического флота нефтегазовых месторождений: буровое судно / В. Таровик // Neftegaz.ru. – 2013. – Вып. 3. – С. 46–48.
7. Haase A. DYPIC – dynamic positioning in ice – first phase of model testing / A. Haase, S. van der Werff, P. Jochmann // Proc. of OMAE 2012. – Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
8. Metrikin I. Experimental and numerical investigation of dynamic positioning in level ice / I. Metrikin, S. Kerkeni, P. Jochmann, S. Løset // Proc. of OMAE 2013. – Nantes, France, 2013.
9. Neville M. Influence of modeling full scale based managed ice conditions in DP ice model tests / M. Neville, J. Brown, E. Martin, A. Keinonen, F. Efraimsson, G. Liljeström // Proc. of 22nd Int. POAC Conf. – Espoo, Finland, 2013.
10. Aksnes V. Analysis of the behavior of a moored ship in variable ice drift / V. Aksnes, B. Bonnemaire // Proc. of 20th Int. Conf. POAC. – Lulea, Sweden, 2009.
11. Tsarau A. Numerical studies of floating structures in broken ice / A. Tsarau, R. Lubbad, S. Løset // Proc. 22nd Int. POAC Conf. – Espoo, Finland, 2013.
12. Lubbad R. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction / R. Lubbad, S. Løset // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – № 65. – P. 111–127.

13. Ewida A. Terra Nova structural design approach, model testing and computer models / A. Ewida, G. Lever, S. Power // Proc. of 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. – Montréal, Québec, Canada, 2002.
14. Штокмановский проект. Самоходное ледостойкое технологическое судно (FPU) – уникальные технологии будущего // SOZVEZDYE review. – 2011. – Вып. 13. – С. 12–13.
15. Движители Azipod® серии VI. – Хельсинки: ABB Oy, Marine, 2010. – <http://www.abb.com/marine>.
16. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: PMPC, 2015.
17. Wright B. Full scale experience with kulluk stationkeeping operations in pack ice: PERD/CHC Report 25–44 / B. Wright. – Ottawa, Canada: Canadian Hydraulics Centre: National Research Council of Canada: B. Wright & Associates Ltd., 2000. – 142 p.
18. Palmer A. Arctic offshore engineering / A. Palmer, K. Croasdale. – Singapore: World Scientific, 2013. – 357 p.
19. Marchenko A. A dynamic model of ice ridge build up / A. Marchenko, A. Makshtas // Cold Regions Science and Technology. – 2005. – V. 41/3. – P. 175–188.
20. Marchenko A.V. Modelling of ice piling up near offshore structures / A.V. Marchenko // Proc. of 20th IAHR Symposium on Ice. – Lahti, Finland, 2010. – CD paper 014.
21. Croasdale K.R. Ice forces on fixed rigid structures / K.R. Croasdale // IAHR Working Group On Ice Forces On Structures: CRREL Special Report 80–26 / T. Carstens (Ed.). – Hanover, N.H.: CRREL, 1980. – P. 34–106.
22. Goldstein R.V. Ice rubbles. Modeling of the process: preprint / R.V. Goldstein, D.A. Onishchenko, N.M. Osipenko, P.S. Shushpannikov, M.A. Naumov. – Moscow: IPMech RAN, 2013. – № 1055. – 51 p.
23. Lawrence K.P. Load prediction for a moored conical drillship in level unbroken ice: a discrete element and experimental investigation: PhD in Civil Engineering Thesis / K.P. Lawrence. – Ontario, Canada: University of Waterloo, 2009. – 329 p.
24. Løset S. Icebreaking buoy in arctic waters / S. Løset, J.V. Aarsnes // Труды 9-й Межд. конф. RAO/CIS Offshore, 15–18 сент. 2009 г. – СПб.: Химиздат, 2009. – Т. 1. – С. 138–143.