

## ДВИЖЕНИЕ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ПРИ ДРЕЙФЕ ЛЬДА

А. А. Добродеев

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

К. Е. Сазонов

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 31 января 2020 г.

*Представлены результаты теоретических исследований, выполненных в лаборатории исследований ледотехники Крыловского государственного научного центра и относящихся к изучению движения крупнотоннажных судов при дрейфе ледяного покрова. Продемонстрировано перераспределение сил, воздействующих на корпус судна при асимметричном движении во льдах. Даны рекомендации по компенсации воздействующих на корпус судна ледовых сил при движении с углом дрейфа за счет работы движительно-рулевого комплекса. Полученные результаты позволяют оценить возможность движения таких судов с углом дрейфа для сохранения выбранного курса. Также полученные данные могут быть использованы для разработки требований в области ледовой ходкости к проектируемым ледоколам и крупнотоннажным судам ледового плавания.*

**Ключевые слова:** Арктика, крупнотоннажное судно ледового плавания, дрейф льда, ледяной канал, ледокол.

### Введение

Большая часть времени эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания, включая крупнотоннажные, происходит в дрейфующих морских льдах. В подавляющем большинстве случаев дрейф льда, скорость которого в море лежит в пределах 0,1—0,3 м/с, а максимальная скорость дрейфа иногда может достигать 1—1,5 м/с [1], не оказывает существенного влияния на характеристики движения судна. Это связано с тем, что, как правило, скорость движения судна во льдах существенно превышает скорость дрейфа льда. Однако в некоторых ситуациях, обычно характеризующихся наличием нави-

гационных опасностей, учет влияния дрейфа льда на параметры движения судна необходим. Здесь речь не идет об экстремальных ситуациях, например о попадании судна в зону действия «ледовых рек» [2]. Рассматривается влияние дрейфа льда на движение судна при отсутствии воздействия экстремальных ледовых условий.

В дрейфующих льдах движение судна может осуществляться в различных ледовых условиях: сплошной ровный лед, крупно- и мелкобитый лед. Если судно движется в дрейфующем ледяном поле или его обломках, то взаимодействие его корпуса со льдом происходит так же, как и при движении в припайных льдах. Из-за наличия дрейфа происходит небольшое и достаточно медленное изме-

нение курса, которое можно компенсировать периодическими воздействиями органа управления. Движение судна в таких условиях представляет наименьший интерес, так как скорость дрейфа ледяных полей и их обломков достаточно мала. Более высокие скорости дрейфа обычно наблюдаются в крупно- и мелкобитых льдах, поэтому такие ледовые условия представляют больший интерес. Само же движение судна в указанных ледовых условиях может происходить как самостоятельно, так и под проводкой леодокола. В случае использования леодокольной проводки крупнотоннажные суда ледового плавания будут двигаться по «узкому» каналу, взаимодействуя бортами с его кромками. Это происходит потому, что ширина крупнотоннажных судов существенно превышает ширину любого из существующих ныне леодоколов [3].

В работе представлено описание метода расчета ледовых воздействий на корпус судна, движущегося с углом дрейфа во льдах. Этот метод является универсальным, его использование не зависит ни от ледовых условий, в которых движется судно, ни от характера его движения (самостоятельное или под проводкой леодокола). Численные примеры приведены для случая движения судна в мелкобитых льдах для самостоятельного движения и при плавании по «узкому» ледяному каналу за леодоколом. Сопротивление мелкобитого льда определяется в соответствии с расчетным методом А. Я. Рыблина [4]. Аналогичные расчеты могут быть выполнены и для условий движения судна в сплошных ровных и крупнобитых льдах. При этом для определения ледового сопротивления должны быть использованы соответствующие ледовым условиям математические модели [5; 6 и др.].

### Метод расчета

В [7] описана методика расчета ледовых воздействий на судно, движущееся по криволинейной траектории во льдах. Методика базируется на определении распределения ледовой нагрузки по длине зон контакта корпуса судна со льдом. Она может быть адаптирована на случай движения судна с углом дрейфа. В приводимой ниже методике не учитываются гидродинамические позиционные силы и момент на корпусе судна, которые неизбежно возникают при его движении с углом дрейфа. Отказ от их учета связан с тем, что они существенно меньше величины ледовых сил, особенно при рассматриваемых далее небольших углах дрейфа и скорости движения судна. При необходимости учет этих сил может быть выполнен по методике, изложенной в [12].

При движении судна с углом дрейфа во льдах наблюдается нарушение симметрии взаимодействия бортов судна со льдом, выражающееся в различной длине зон контакта корпуса и ледяного покрова. Для определения длины этих зон принимается, что корпус контактирует со льдом, если проекция скорости рассматриваемой точки ватерлинии на внеш-

нюю нормаль к корпусу больше нуля. Определение нормалей осуществляется в связанной с судном декартовой системе координат  $OXY$ , начало которой расположено в центре тяжести судна. Ось  $OX$  направлена в нос, а ось  $OY$  — на левый борт. Нормальная скорость для внешнего борта судна  $v_n^{ex}$ , в сторону которого направлен вектор скорости, и внутреннего борта  $v_n^{in}$  задается выражениями

$$\begin{aligned} v_n^{ex} &= v_s \sin(\alpha + \beta), \\ v_n^{in} &= -v_s \sin(-\alpha + \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v_s$  — скорость центра тяжести судна;  $\beta$  — угол дрейфа;  $\alpha = \alpha(x)$  — угол наклона ватерлинии к диаметральной плоскости судна в рассматриваемой точке корпуса.

Эта зависимость может быть получена по теоретическому чертежу судна в системе координат  $OXY$ . Для нахождения абсциссы точки конца внешней  $x_1$  (отрицательная величина) и внутренней  $x_2$  зон контакта корпуса со льдом выражения (1) должны быть приравнены к нулю и численно решены.

Для нахождения закона распределения ледовой нагрузки по длине зоны контакта предполагается, что величина нормальной к борту погонной ледовой нагрузки в каждой точке ватерлинии состоит из двух составляющих: статической и динамической. Это предположение базируется на часто используемом в ледовой ходности представлении ледового сопротивления в виде суммы статической и динамической составляющих [4]. Тогда можно записать, что первая из них пропорциональна некоторой эффективной полуширине корпуса в данной точке, а вторая пропорциональна нормальной скорости к борту:

$$q_l = k_s B_{ef} + k_d v_n, \quad (2)$$

где  $k_s$  — статический коэффициент пропорциональности;  $k_d$  — динамический коэффициент пропорциональности;  $B_{ef}$  — эффективная полуширина корпуса в данной точке.

Под эффективной шириной понимается величина, характеризующая фиктивное (кажущееся) увеличение (уменьшение) полуширины внешнего (внутреннего) по отношению к направлению движения судна. Очевидно, что на части внешней зоны контакта, расположенной в кормовой части судна, реализуются наибольшие ледовые усилия. Увеличение ледовой нагрузки в кормовой части внешнего борта получается и в результате численных расчетов по методу, предложенному Линдстремом [8; 9]. Это увеличение ледовой нагрузки в формуле (2) учитывается введением эффективной ширины корпуса.

Эффективная ширина определяется как величина перпендикуляра, опущенного из рассматриваемой точки внешнего или внутреннего борта на прямую, проходящую через форштевень, в направлении, совпадающем с направлением вектора пол-

ной скорости рассматриваемой точки борта. Она рассчитывается по формулам

$$\begin{aligned} B_{ef}^{ex} &= \frac{|y|}{\cos \beta} + \left( \frac{L}{2} - x - y \operatorname{tg} \beta \right) \sin \beta, \\ B_{ef}^{in} &= \frac{|y|}{\cos \beta} - \left( \frac{L}{2} - x + y \operatorname{tg} \beta \right) \sin \beta, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты рассматриваемой точки корпуса в связанной системе координат.

Для определения коэффициентов пропорциональности в формуле (2) используются данные о ледовом сопротивлении судна при движении в заданных ледовых условиях. Само же ледовое сопротивление судна при прямолинейном движении представляется в виде линейной функции от скорости движения  $R_I = R_{IS} + A v_S$ , где  $R_{IS}$  — «прямое» ледовое сопротивление. Это предположение можно считать полностью справедливым при изучении движения судна во льдах, толщина которых превышает половину от предельной ледопроеходимости судна. Там, где это не выполняется, можно применять кусочно-линейную аппроксимацию зависимости ледового сопротивления от скорости движения. Третья гипотеза позволяет провести определение коэффициентов пропорциональности по имеющимся данным о ледовом сопротивлении с помощью формул

$$\begin{aligned} k_S &= \frac{R_{IS}}{2 \int_0^{L/2} y(x) (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) dx}, \\ k_d &= \frac{A}{2 \int_0^{L/2} \sin \alpha (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) dx}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $y(x)$  — уравнение ледовой ватерлинии в связанной с центром тяжести системе координат;  $f_{ld}$  — динамический коэффициент трения обшивки корпуса о лед;  $L$  — длина судна;  $\beta'$  — угол наклона шпангоута в нормальном к борту сечении;  $\varphi$  — угол наклона батокса.

Выражения (2) и (4) являются универсальными, они позволяют использовать для расчета ледовых сил и момента при движении судна во льдах с углом дрейфа как расчетные, так и экспериментальные данные о ледовом сопротивлении. Этот же подход позволяет определять ледовые силы и моменты при произвольном движении судна в битых льдах, а также при других условиях плавания, которые оказывают влияние на величину ледового сопротивления, например на мелководье. При задании ледового сопротивления судна в формулах (4) автоматически учитываются физико-механические свойства льда, а также его толщина.

Ледовые силы и момент при заданных скорости движения судна на циркуляции  $v_S$  и угле дрейфа  $\beta$  рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X &= \int_{x_1}^{L/2} (k_S B_{ef}^{ex} + k_d v_n^{ex}) (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) dx + \\ &+ \int_{x_2}^{L/2} (k_S B_{ef}^{in} + k_d v_n^{in}) (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) dx, \\ Y &= \int_{x_1}^{L/2} (k_S B_{ef}^{ex} + k_d v_n^{ex}) (\cos \beta' \cos \alpha - f_{ld} \cos \varphi \sin \alpha) dx - \\ &- \int_{x_2}^{L/2} (k_S B_{ef}^{in} + k_d v_n^{in}) (\cos \beta' \cos \alpha - f_{ld} \cos \varphi \sin \alpha) dx, \\ M &= - \int_{x_1}^{L/2} (k_S B_{ef}^{ex} + k_d v_n^{ex}) (\cos \beta' \cos \alpha - f_{ld} \cos \varphi \sin \alpha) x dx + \\ &+ \int_{x_1}^{L/2} (k_S B_{ef}^{ex} + k_d v_n^{ex}) (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) y dx + \\ &+ \int_{x_2}^{L/2} (k_S B_{ef}^{in} + k_d v_n^{in}) (\cos \beta' \cos \alpha - f_{ld} \cos \varphi \sin \alpha) x dx - \\ &- \int_{x_2}^{L/2} (k_S B_{ef}^{in} + k_d v_n^{in}) (\cos \beta' \sin \alpha + f_{ld} \cos \varphi \cos \alpha) y dx. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь при вычислении ледового момента учитывается, что в его формировании участвует не только поперечная сила, но и сила сопротивления,  $x_1$  и  $x_2$  границы зон контакта корпуса со льдом для внешнего и внутреннего бортов соответственно, определенные с помощью выражений (1).

Приведенные соотношения справедливы для случая автономного плавания судна во льдах. При движении же по каналу, проложенному ледоколом, эти формулы должны быть незначительно изменены. Способ учета наличия канала при расчете ледового сопротивления описан в [10; 11]. Этот способ базируется на построении новой ватерлинии для некоторого корпуса. При симметричном расположении судна относительно оси канала ширина нового корпуса уменьшается на величину ширины канала за ледоколом. При этом угол притыкания к форштевню действующей ватерлинии определяется углом наклона реальной ватерлинии судна в точке ее касания с кромкой канала, а функции, зависящие от углов наклона теоретических шпангоутов, вычисляются на участке от точки контакта борта с кромкой канала до места расположения максимальной ширины корпуса. Соответствующие поправки вносятся в значения длины носовой оконечности судна. После этого рассчитывается ледовое воздействие на корпус. При несимметричном расположении судна относительно оси канала, что наблюдается при движении с углом дрейфа, по описанной выше процедуре рассчитывается сопротивление каждого борта в отдельности, при этом результат расчета по методу необходимо уменьшить в два раза, так как расчет осуществляется по формулам, которые учитывают наличие двух бортов.

При проведении расчетов ледовое сопротивление сначала определяется для прямолинейного движения судна по каналу, а затем рассчитывается ледовая нагрузка при наличии угла дрейфа. В этом случае зоны контакта корпуса со льдом определяются в соответствии с расположением судна в ледяном канале (рис. 1).

**Условия осуществимости движения с углом дрейфа**

Вне зависимости от того, в каких условиях осуществляется движение судна с углом дрейфа — автономно или под проводкой ледокола, необходимо выполнение ряда условий. При движении судна с углом дрейфа на него действует момент внешних сил  $M$ , а также продольная и поперечная составляющие главного вектора внешних сил:  $R$  — сила сопротивления движению и  $Y$  — боковая сила. Все действующие на судно внешние силы и момент содержат гидродинамическую [12] и ледовую составляющие. Общее условие осуществимости движения судна с углом дрейфа задается следующими соотношениями:

- для судов с традиционными органами управления (рулями)

$$R = \sum_{i=1}^{N_i} T_{Ei}, \quad Y = \sum_{i=1}^N F_{Ri}, \quad M = \sum_{i=1}^N F_{Ri} l_i; \quad (6)$$

- для судов, оборудованных винто-рулевыми колонками (ВРК),

$$R = \sum_{i=1}^N T_{Ei} \cos \delta_i, \quad Y = \sum_{i=1}^N T_{Ei} \sin \delta_i, \quad M = \sum_{i=1}^N T_{Ei} l_i, \quad (7)$$

где  $T_{Ei}$  — тяга  $i$ -го движителя судна;  $N_i$  — число движителей судна;  $F_{Ri}$  — поперечная сила на  $i$ -м руле;  $l_i$  — плечо силы, возникающей на органе управления, относительно центра тяжести судна;  $N$  — число органов управления судном;  $\delta_i$  — угол поворота органа управления.

Поперечная сила на руле определяется на основании гидромеханических экспериментов и расчетов по известным методикам [12; 13].

Из приведенных выражений следует, что для осуществления установившегося движения судна с углом дрейфа необходимо с помощью движительно-рулевого комплекса судна компенсировать все внешние воздействия. Возможность выполнения этого маневра существенным образом зависит от состава и компоновки движительно-рулевого комплекса. Так, судно, оборудованное одним традиционным рулем, практически не имеет возможности устойчиво двигаться с постоянным углом дрейфа. Это происходит потому, что одним органом управления невозможно одновременно компенсировать внешнее воздействие по боковой силе и моменту. Если же такое судно имеет два и более валов, то, используя метод работы гребных винтов «враздрай»

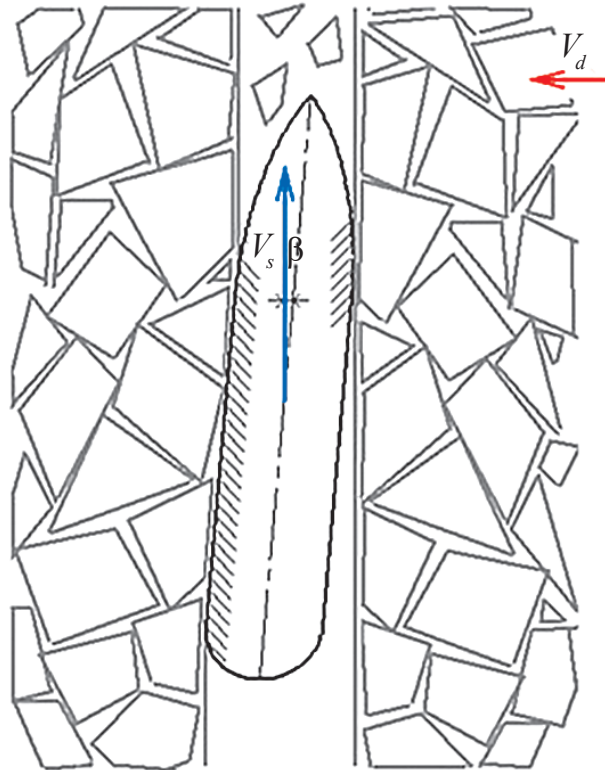


Рис. 1. Расположение крупнотоннажного судна, двигающегося с углом дрейфа  $\beta$  по каналу, проложенному ледоколом в сплошных битых льдах. Зоны контакта корпуса со льдом заштрихованы.  $V_d, V_s$  — скорость дрейфа льда и скорость судна соответственно;  $\beta$  — угол дрейфа

Fig. 1. The location of a large-tonnage vessel moving with a drift angle  $\beta$  along a channel laid by an icebreaker in solid broken ice. The contact zones of the hull with ice are shaded.  $V_d, V_s$  — ice drift velocity and ship speed, accordingly;  $\beta$  — ice drift angle

[14; 15], возможно создать некоторый момент, с помощью которого в ряде случаев можно выполнить маневр. Судно, на котором установлены две ВРК, относительно легко может компенсировать внешние воздействия. Однако скорость его движения будет однозначно определяться углами поворота ВРК и ледовыми условиями.

**Результаты расчетов и их обсуждение**

По изложенной выше математической модели были выполнены расчеты для определения силового воздействия льда на корпус крупнотоннажного судна, двигающегося с углом дрейфа. В качестве объекта расчета было выбрано гипотетическое судно, обладающее следующими основными характеристиками:

- длина — 290 м;
- длина цилиндрической вставки — 145 м;
- ширина — 50 м;
- осадка — 14 м;
- угол наклона ватерлинии на нулевом теоретическом шпангоуте — 70°;
- угол наклона форштевня — 30°.

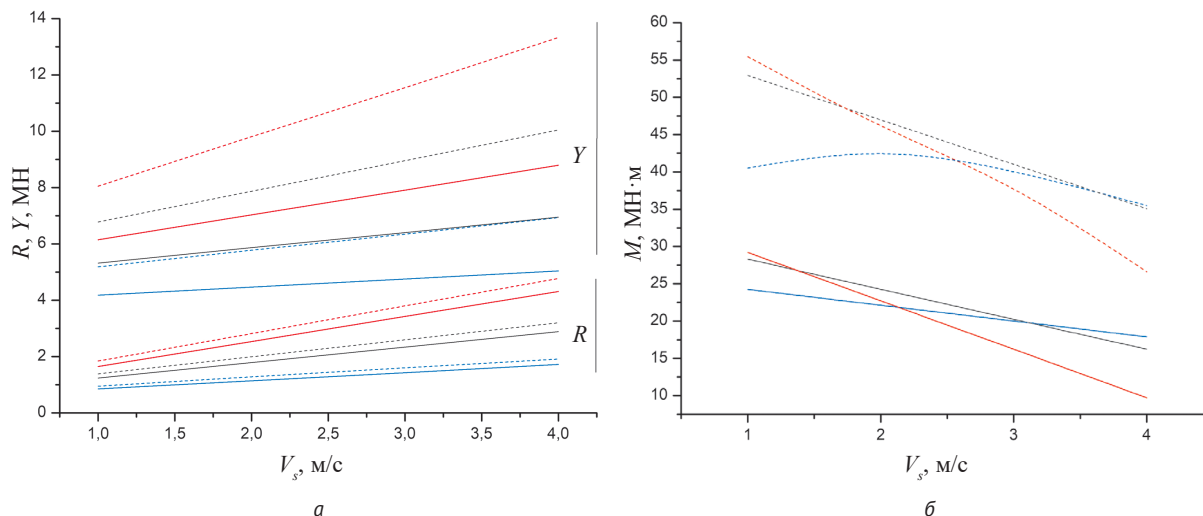


Рис. 2. Ледовые силы (а) и момент (б), действующие на крупнотоннажное судно, движущееся в битых льдах с углом дрейфа:  $R$  – сила сопротивления,  $Y$  – поперечная сила,  $M$  – ледовый момент; сплошные линии соответствуют углу дрейфа  $\beta = 2^\circ$ , пунктирные –  $\beta = 4^\circ$ ; синий цвет линии соответствует толщине льда 1 м, черный – 1,5 м, красный – 2 м  
 Fig. 2. Ice Forces (a) and moment (b) on a heavy-tonnage vessel moving in broken ice with a drift angle:  $R$  – resistance force,  $Y$  – transverse force,  $M$  – ice moment; The solid lines correspond to the drift angle  $\beta = 2^\circ$ , dash lines –  $\beta = 4^\circ$ ; The blue lines correspond to the ice thickness of 1 m, black lines – 1,5 m, red lines – 2 m

Форма ватерлинии и распределение углов наклона шпангоутов были приняты в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7].

На первой стадии расчетов было определено ледовое сопротивление судна при движении в битых льдах. Расчет выполнялся без учета и с учетом наличия ледяного канала, проложенного ледоколом. Относительная ширина канала  $B_c/B_s$  варьировалась от 0 до 0,8 с шагом 0,2. Данные о ледовом сопротивлении были использованы для определения неизвестных коэффициентов математической модели по формулам (4). Далее были выполнены расчеты силового воздействия льда на корпус крупнотоннажного судна, двигающегося с углом дрейфа.

Результаты расчетов для судна, осуществляющего одиночное плавание, показаны на рис. 2. Анализ данных, представленных на этом рисунке, позволяет отметить некоторые особенности движения крупнотоннажного судна с углом дрейфа. Очевидно, что при наличии угла дрейфа существенно возрастает ледовое воздействие на корпус судна. При этом ледовое сопротивление возрастает в наименьшей степени. Наиболее критичным является увеличение поперечной силы, которая при прямолинейном движении равна нулю. Поперечная ледовая сила возникает из-за асимметрии взаимодействия корпуса с дрейфующим ледяным покровом. Для крупнотоннажных судов асимметрия усугубляется наличием протяженной цилиндрической вставки, которая с одного из бортов полностью взаимодействует со льдом, а на другом борту это взаимодействие практически отсутствует. Указанной асимметрией также объясняется возникновение момента ледовых сил, который определялся относительно центра тяжести судна. С точки зрения выполнения критериев (6)

и (7) наибольшие трудности могут возникнуть при компенсации поперечной ледовой силы.

Данные рис. 2 убедительно показывают, что в случае автономного движения судна увеличение угла дрейфа приводит к увеличению ледовых воздействий на его корпус. При возрастании толщины льда ледовые силы также увеличиваются. Ледовый момент имеет более сложную зависимость от толщины льда, так как от нее зависит форма эпюры ледового давления, действующего на корпус судна в пределах зон контакта. С ростом скорости движения судна ледовые силы имеют тенденцию к увеличению, а ледовый момент – к снижению, что также связано с изменением распределения ледового давления по корпусу.

Дальнейшие расчеты проводились только для двух значений угла дрейфа –  $2^\circ$  и  $4^\circ$ . Выбор этих значений объясняется следующими причинами. Исходя из условия, что поперечная скорость судна должна быть равна скорости дрейфа льда, можно получить следующее соотношение:  $V_d = V_s \operatorname{tg} \beta$ , где  $V_d, V_s$  – скорость дрейфа льда и скорость судна соответственно. Расчет с помощью этой формулы для диапазона скорости движения судна до 4 м/с показывает, что углы дрейфа, не превышающие  $4^\circ$ , соответствуют скоростям дрейфа льда  $V_d < 0,25$  м/с. Полученные скорости дрейфа хорошо соответствуют обычно наблюдаемому дрейфу льда. Другой причиной ограничения рассматриваемых углов дрейфа являются результаты расчета (см. рис. 2), которые показывают, что при  $\beta > 4^\circ$  ледовое воздействие на корпус значительно возрастает и такие углы не могут быть реализованы при эксплуатации судна.

Целью следующей части исследования было выяснение влияния наличия канала во льдах, проложенного ледоколом, на величину ледового воздействия

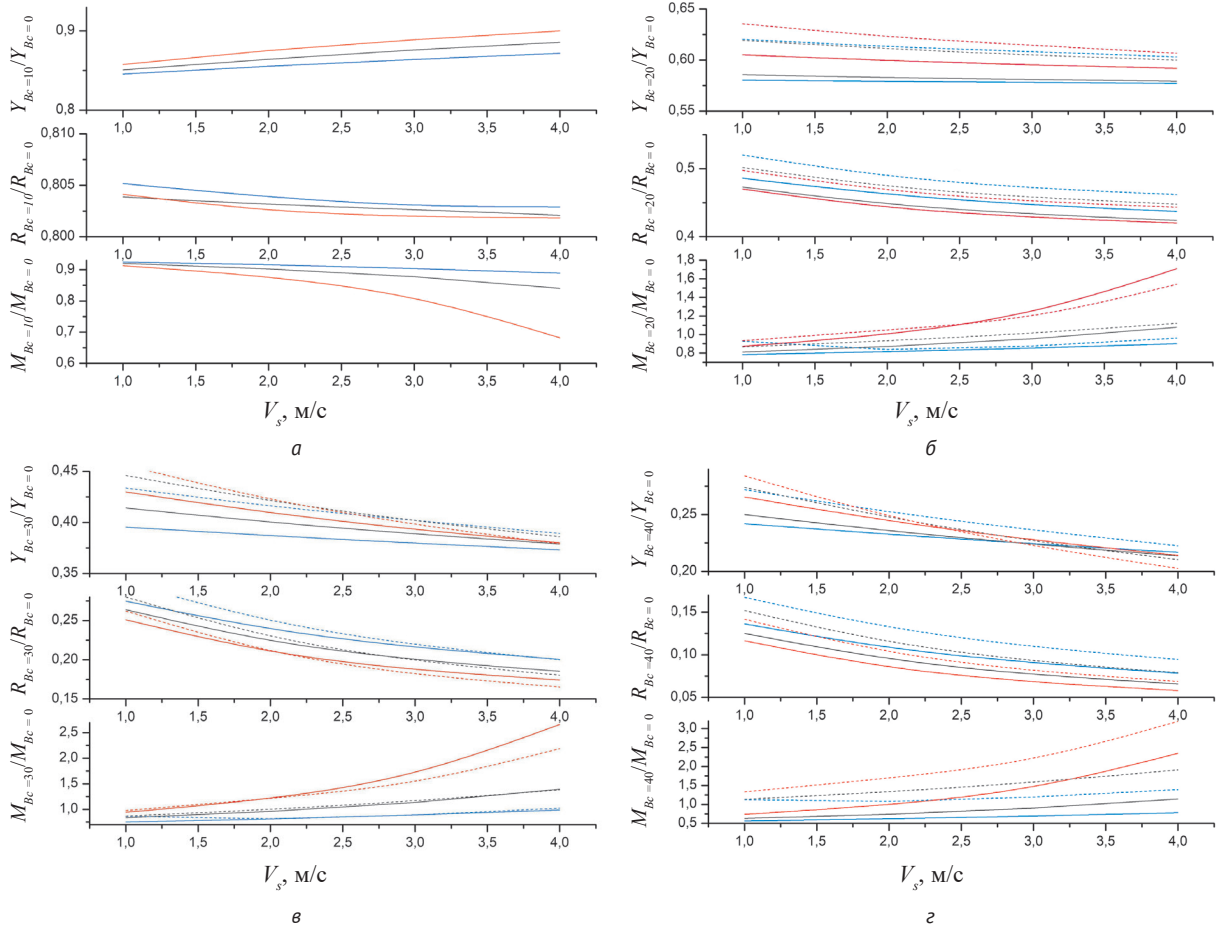


Рис. 3. Ледовые силы и момент, действующие на крупнотоннажное судно, движущееся в битых льдах с углом дрейфа в канале за ледоколом: а –  $B_c/B_s = 0,2$ ; б –  $B_c/B_s = 0,4$ ; в –  $B_c/B_s = 0,6$ ; г –  $B_c/B_s = 0,8$

Fig. 3. Ice forces and moment on a heavy-shipment vessel, moving in broken ice with a drift angle in the channel behind the icebreaker: а –  $B_c/B_s = 0,2$ ; б –  $B_c/B_s = 0,4$ ; в –  $B_c/B_s = 0,6$ ; г –  $B_c/B_s = 0,8$

на корпус судна. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Для удобства представления результаты приведены в виде относительных величин, которые позволяют оценить, в какой степени изменяется ледовое воздействие на корпус из-за наличия ледяного канала. Поэтому все полученные в расчетах при наличии ледяного канала величины отнесены к аналогичным величинам, полученным при автономном плавании. При определении величины ледовых сил и момента по формулам (5) интегрирование осуществлялось в пределах зон контакта корпуса со льдом. Эти зоны определялись не только с помощью формул (1), но и с учетом наличия канала во льдах (см. рис. 1).

Рассмотрим влияние различных факторов на величину ледовых сил и момента. Так же, как и при автономном плавании, увеличение толщины льда и угла дрейфа приводят к возрастанию ледового сопротивления и поперечной ледовой силы. При этом в зависимости от относительной ширины канала происходит общее снижение величины этих сил. Причем это довольно существенное снижение. При относительной ширине канала, равной  $B_c/B_s = 0,8$ ,

ледовое сопротивление может составлять до 0,1 от сопротивления при автономном движении, а поперечная сила — до 0,2—0,25.

Характер изменения ледового момента существенным образом изменяется в зависимости от относительной ширины канала. При относительной ширине канала  $B_c/B_s = 0,2$  ледовый момент имеет тенденцию к уменьшению с ростом скорости движения так же, как и при автономном плавании судна. При дальнейшем увеличении относительной ширины канала зависимость ледового момента от скорости изменяется на противоположную. С ростом скорости ледовый момент начинает возрастать, причем это возрастание увеличивается с увеличением толщины дрейфующего льда. Причина наблюдаемого эффекта заключается в асимметрии взаимодействия корпуса судна со льдом, на которую дополнительно влияет наличие канала. Из-за его наличия носовая часть ватерлинии крупнотоннажного судна оказывается свободной от взаимодействия с битым льдом. При автономном плавании взаимодействие этой части ватерлинии со льдом

приводило к возникновению ледового момента, действие которого способствовало увеличению угла дрейфа и, следовательно, снижало требуемый для удержания судна в заданном положении момент, развиваемый органами управления. Таким образом, можно сделать вывод, что при движении крупнотоннажного судна с углом дрейфа при наличии ледяного канала в дрейфующих льдах одной из первоочередных задач судоводителя является компенсация возросшего ледового момента. Оценки величины этого момента позволяют заключить, что благодаря достаточно большой длине крупнотоннажных судов компенсация момента возможна.

### Заключение

В работе выполнен теоретический анализ возможностей движения постоянным курсом крупнотоннажного судна в дрейфующих льдах. Такое движение должно осуществляться с некоторым углом дрейфа, наличие которого позволяет компенсировать боковой снос за счет дрейфа льда. Особую важность возможность осуществления такого движения приобретает при прохождении судном районов с навигационными опасностями, например, мелководных участков, для прохождения которых существует достаточно узкий фарватер.

Теоретический анализ показывает, что при движении судна с углом дрейфа происходит весьма значительное перераспределение ледового давления на корпус, вызванное асимметрией контакта со льдом. Возникшая асимметрия приводит к увеличению ледового сопротивления, а также к появлению поперечной ледовой силы и ледового момента, которые должны быть компенсированы работой органов управления судна. При автономном плавании возможность движения с углом дрейфа ограничена конструктивными особенностями винто-рулевого комплекса и тяговыми характеристиками судна. Наличие этих ограничений может привести к возникновению аварийной ситуации при движении судна на акваториях с навигационными опасностями.

Одним из возможных путей снижения уровня возникновения опасных ситуаций является движение судна под проводкой ледокола. Выполненный теоретический анализ показывает, что создание ледоколом канала позволяет в зависимости от его ширины существенно снизить уровень ледовых сил, действующих на корпус судна. При движении с углом дрейфа по каналу возрастает ледовый момент, однако это возрастание для крупнотоннажных судов не является критическим. Поэтому движение крупнотоннажных судов на участках трассы с навигационными опасностями необходимо осуществлять под проводкой ледоколов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20162 «Разработка технологии тактического и оперативного планирования и управления работой ледоколов и су-

дов ледового плавания в условиях круглогодичной навигации по трассам Северного морского пути»).

### Литература

1. Сазонов К. Е. Морская ледотехника: Учебное пособие. — СПб.: СПбГМТУ, 2019. — 311 с.
2. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е. У. Миронова. — СПб.: ААНИИ, 2010. — 319 с.
3. Сазонов К. Е., Добродеев А. А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. — СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2017. — 122 с.
4. Каштелян В. И., Позняк И. И., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
5. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.; 2-е изд. — СПб.: Судостроение, 2013. — 504 с.
6. Сазонов К. Е., Добродеев А. А. Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2011. — Вып. 63 (347). — С. 73—80.
7. Сазонов К. Е. Ледовая управляемость судов. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2006. — 252 с.
8. Lindstrom C.-A. Numerical estimation of ice forces acting on inclined structures and ships in level ice // The 22nd Annual Offshore Technology Conference. Houston, Texas, May 7—10, 1990. — P. 209—216.
9. Lindstrom C.-A. Numerical simulation of ship manoeuvring motion in level ice // Proc. Int. Conf. On Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region, Polartech'90, Copenhagen, Denmark, 1990. — P. 198—208.
10. Добродеев А. А., Клементьева Н. Ю., Сазонов К. Е. Несимметричное движение крупнотоннажных судов в «узком» канале // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 200—207.
11. Dobrodeev A. A., Klementyeva N. Y., Sazonov K. E. Large ship motion mechanics in «narrow» ice channel // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. — 2018. — 193 (1). — 012017.
12. Справочник по теории корабля: В 3 т. — Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 544 с.
13. Маковский А. Г., Немзер А. И., Юркканский А. В. Управление движительно-рулевым комплексом при позиционировании тральщиков // Труды Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях», секция А, т. 2. — СПб., 1996.
14. Каштелян В. И., Рывлин А. Я., Фаддеев О. В., Ягодкин В. Я. Ледоколы. — Л.: Судостроение, 1972. — 288 с.
15. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. — Л.: Судостроение, 1983. — 272 с.

### Информация об авторах

**Добродеев Алексей Алексеевич**, кандидат технических наук, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru.

**Сазонов Кирилл Евгеньевич**, доктор технических наук, начальник лаборатории, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Движение крупнотоннажных судов при дрейфе льда // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 68—76. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-68—76.

---

## MOTION OF HEAVY-TONNAGE VESSELS IN THE ICE DRIFT CONDITIONS

Dobrodeev A. A.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Sazonov K. E.

Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on January 31, 2020

### Abstract

The authors present the results of theoretical studies of the heavy-tonnage vessels motion under ice drift conditions. The research is performed in the Ice Research Laboratory of Krylov State Research Centre. The shifting of ice forces acting on the hull during the asymmetrical motion in ice conditions is demonstrated. Recommendations are given on compensating the ice forces by the propulsion and steering complex controlling. The results make it possible to evaluate the possibility of such vessels motion with a drift angle in order to maintain the chosen course. Also, the obtained data can be used to develop requirements in the field of ice performance for designed icebreakers and heavy-tonnage ice-going vessels.

**Keywords.** *The Arctic, ice-going heavy-tonnage vessel, ice drift, ice channel, icebreaker.*

The research was supported by the Russian Science Foundation (project № 17-79-20162 “Development of technology for tactical and operational control of icebreakers and ice-going vessels under the conditions of year-round navigation along the Northern Sea Route”).

### References

1. Sazonov K. E. *Morskaya ledotekhnika: Uchebnoe posobie*. [Marine Ice Technics]. St. Petersburg, SPbGMTU, 2019, 311 p. (In Russian).
2. *Opasnye ledovye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike*. [Ice hazards for Arctic ships navigation]. Pod. red. E. U. Mironova. St. Petersburg, AANII, 2010, 319 p. (In Russian).
3. Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. *Ledovaya khodkost' krupnotonnazhnykh sudov*. [Ice performance of heavy-tonnage vessels]. St. Petersburg, Krylov. gos. nauch. tsentr, 2017, 122 p. (In Russian).
4. Kashatelyan V. I., Poznyak I. I., Ryvlin A. Ya. *Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudna*. [Ships ice resistance]. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 238 p. (In Russian).
5. Ionov B. P., Gramuzov E. M. *Ledovaya khodkost' sudov*. [Ships ice performance]. St. Petersburg, Sudostroenie, 2001, 512 p.; 2nd ed. St. Petersburg, Sudostroenie, 2013, 504 p. (In Russian).
6. Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. *Metod rascheta ledovogo soprotivleniya sudna pri ego dvizhenii v krupnobitykh l'dakh i oblomkakh ledyanykh polei*. [The method of ships ice resistance calculation when it moves in



ice floes]. Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2011, iss. 63 (347), pp. 73—80. (In Russian).

7. Sazonov K. E. Ledovaya upravlyaemost' sudov. [Ice maneuverability of ships]. St. Petersburg, TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2006, 252 p. (In Russian).

8. Lindstrom C.-A. Numerical estimation of ice forces acting on inclined structures and ships in level ice. The 22nd Annual Offshore Technology Conference. Houston, Texas, May 7—10, 1990, pp. 209—216.

9. Lindstrom C.-A. Numerical simulation of ship manoeuvring motion in level ice. Proc. Int. Conf. On Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region, Polartech'90, Copenhagen, Denmark, 1990, pp. 198—208.

10. Dobrodeev A. A., Klement'eva N. Yu., Sazonov K. E. Nesimmetrichnoe dvizhenie krupnotonnazhnykh sudov v "uzkom" kanale. [Unsymmetrical movement of heavy-tonnage vessels in "narrow" channel]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 200—207. (In Russian).

11. Dobrodeev A. A., Klementyeva N. Y., Sazonov K. E. Large ship motion mechanics in "narrow" ice chan-

nel. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2018, 193 (1), 012017.

12. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. Vol. 3. Upravlyaemost' vodoizmesthayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. [A handbook on ship theory: in three volumes. Vol. 3. Maneuverability of a displacement-type ships. The hydrodynamic of dynamically positioned vessels]. Pod red. Ya. I. Voitkenskogo. Leningrad, Sudostroenie, 1985, 544 p. (In Russian).

13. Makovskii A. G., Nemzer A. I., Yurkanskii A. V. Upravlenie dvizhitel'no-rulevym kompleksom pri pozitsionirovani tral'shchikov. [The operation by propulsion and steering system during the positioning of minesweepers]. Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Voenno-morskoi flot i sudostroenie v sovremennykh usloviyakh", section A, vol. 2. St. Petersburg, 1996.

14. Kashtelyan V. I., Ryvlin A. Ya., Faddeev O. V., Yagodkin V. Ya. Ledokoly. [The icebreakers]. Leningrad, Sudostroenie, 1972, 288 p. (In Russian).

15. Pershits R. Ya. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom. [The maneuverability and steering of a vessel]. Leningrad, Sudostroenie, 1983, 272 p. (In Russian).

### Information about the authors

*Dobrodeev Aleksei Alekseevich*, PhD of Engineering Science, Head of Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru.

*Sazonov Kirill Evgen'evich*, Doctor of Engineering Science, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

### Bibliographic description

*Dobrodeev A. A., Sazonov K. E.* Motion of heavy-tonnage vessels in the ice drift conditions. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 68—76. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76. (In Russian).

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., 2020