

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 629.561.5; 629.54; 656.61

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-200-207

НЕСИММЕТРИЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ В «УЗКОМ» ЛЕДОВОМ КАНАЛЕ

А.А. ДОБРОДЕЕВ¹, Н.Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА¹, К.Е. САЗОНОВ^{1,2}*

¹ — *Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия*

² — *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия*

**kirsaz@rambler.ru*

A SKEWED MOVEMENT OF LARGE-SIZE SHIPS IN “NARROW” ICE CHANNEL

A.F. DOBRODEEV¹, N.Y. KLEMENTYEVAI, K.E. SAZONOV^{1,2}*

¹ — *Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia*

² — *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia*

**kirsaz@rambler.ru*

Received June, 06, 2018

Accepted July, 04, 2018

Keywords: Arctic, ice channel, ice resistance, large ship, stability.

Summary

This work investigates a previously unknown phenomenon taking place when a large carrier ship moves in a channel made by an icebreaker narrower than the carrier ship. Usually, the studies of these movement conditions assumed the center line of the ship to coincide with the channel axis and the interaction of ship sides with channel edges to be symmetric. However, the observations made in Ice Basin and in real conditions have shown that in most of cases interaction of ship sides with channel edges is not symmetric. The ship moving in the channel breaks ice only with one of her sides, the other side only rubbing against the edge. The numerical assessments of ship position stability in the channel given in this paper made it possible to understand how this interaction becomes asymmetric. The study also yielded ice resistance assessments for a large carrier ship moving along the channel in these asymmetric conditions.

Поступила 06 июня 2018 г.

Принята к печати 04 июля 2018 г.

Ключевые слова: крупнотоннажное судно, ледовое сопротивление, ледовый канал, устойчивость.

Citation: *Dobrodeev A.F., Klementyeva N.Y., Sazonov K.E. A skewed movement of large-size ships in “narrow” ice channel. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (2): 200–207. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-200-207.*

В работе описан ранее неизвестный эффект нарушения симметрии движения крупнотоннажного судна в канале, проложенном ледоколом, ширина которого меньше ширины проводимого судна. Выполнены численные оценки устойчивости положения судна в канале, результаты которых позволили объяснить механизм нарушения симметрии. Выполнены приближенные оценки ледового сопротивления крупнотоннажного судна при несимметричном движении по каналу, показавшие повышенную эффективность такого движения по сравнению с симметричным случаем.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной чертой современного этапа развития мореплавания в арктических морях РФ является все более широкое использование крупнотоннажных судов при проведении транспортных операций. В ближайшем будущем планируется увеличение доли использования крупнотоннажных судов в Арктике в основном для обеспечения вывоза углеводородов из районов их добычи. Сейчас активно обсуждается вопрос о возможности вывоза сжиженного газа не только в западном направлении, но и в восточном [1]. Причем при рассмотрении различных транспортных систем, ориентированных на восток, особое внимание уделяется необходимости обеспечения высоких средних скоростей движения по трассе [2].

Возможность вывоза углеводородного сырья на восток влечет за собой изменения в требованиях, предъявляемых к крупнотоннажному судну. При создании таких судов, ориентированных на транспортные операции из Карского моря в западном направлении, основной упор делался на обеспечение возможности самостоятельного плавания крупнотоннажного судна во льдах без использования ледокольной поддержки. Поэтому новые крупнотоннажные газовозы типа «Кристоф де Маржери» построены исходя из концепции судов «двойного действия», которая предполагает активное движение судна во льдах кормой вперед. Ориентация на самостоятельное плавание возможна лишь при плавании в западном секторе Арктики, при движении в восточном направлении без ледокольной поддержки не обойтись. Поэтому вопросы проводки крупнотоннажных судов ледоколами являются весьма актуальными.

ТАКТИКА ПРОВОДКИ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ЛЕДОКОЛАМИ

В настоящее время используется две тактики проводки крупнотоннажных судов ледоколами: двумя или одним. Наиболее эффективной является проводка двумя ледоколами, которые могут создать широкий канал, превышающий ширину проводимого судна. При движении по такому каналу у судна практически не возникает никаких затруднений, несмотря на ряд отличий от ранее применявшейся тактики (наличие в канале крупнобитого льда, необходимость взаимодействия ледоколов при прокладке широкого канала и т.п. [3]). Основным недостатком этого тактического приема является его высокая стоимость из-за использования двух ледоколов, а также практическая невозможность применения при существенном увеличении грузопотока, связанная с отсутствием необходимого числа ледоколов.

Поэтому в современной практике часто используется проводка крупнотоннажного судна одним ледоколом. В этом случае судно вынуждено двигаться по «узкому» ледовому каналу, ширина которого меньше его ширины. Двигаясь по такому каналу, судно вынуждено доламывать его кромки бортами. При теоретическом рассмотрении такого сценария проводки крупнотоннажного судна ледоколом обычно предполагается, что проводимое судно располагается таким образом, чтобы его диаметральная



Рис. 1. Проводка танкера «Пропонтистер» атомным ледоколом типа «Таймыр» [4]

Fig. 1. Pilotage of Propontistanker by a Taimyr-class nuclear icebreaker [4]

плоскость совпадала с осью канала (см., например, [3]). При этом наблюдается симметрия взаимодействия бортов с кромками ледового канала.

Во время проведения экспериментальных исследований в ледовом бассейне Крыловского центра с целью возможности увеличения скорости движения крупнотоннажных судов, которые проводятся различными ледоколами, был обнаружен неожиданный результат. При проведении опытов самоходные модели судов при движении по каналу, проложенному моделью ледокола, стремились расположиться в нем так, чтобы симметрия взаимодействия бортов была нарушена. В большинстве экспериментов диаметральной плоскости модели судна смещалась на некоторую величина от оси канала, при этом один из бортов модели разрушал кромку, а другой терся о противоположную кромку, не разрушая ее. По сообщениям капитанов атомных ледоколов, аналогичный эффект наблюдается и при проводках крупнотоннажных судов в Арктике, подтверждением этому служит фотография (рис. 1), заимствованная из работы [4]. На этой фотографии хорошо видно, что крупнотоннажный танкер движется по каналу, проложенному атомным ледоколом «Таймыр», со смещением от его оси и разрушает кромку льда только одним бортом. Можно предположить, что такой режим движения может реализовываться только при выполнении условия $B_c \geq 0,5B_s$, где B_s — ширина судна, B_c — ширина ледового канала, для различных толщин льда. При нарушении этого неравенства в несимметричной ситуации с кромкой канала будут взаимодействовать оба борта судна, что приводит к невозможности реализации такого движения.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОГО ПОЛОЖЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНОГО СУДНА В «УЗКОМ» КАНАЛЕ

Для выяснения причин, вызывающих нарушение симметрии движения крупнотоннажного судна в «узком» канале, была осуществлена численная оценка. Для ее выполнения использовались простые математические модели: метод расчета ледового сопротивления судна Б.П. Ионова [5] и коэффициенты Ю.А. Шиманского [6]. Полуэмпирический метод Б.П. Ионова позволяет легко учесть при расчете ледового сопротивления

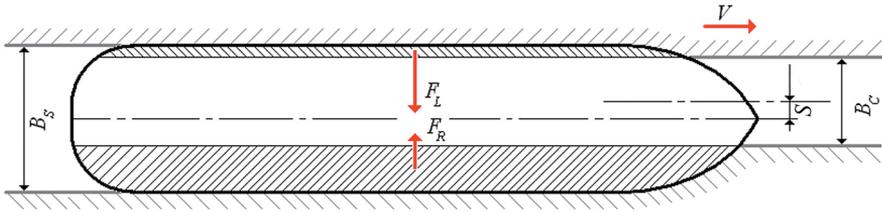


Рис. 2. Расчетная схема задачи

Fig. 2. Calculation layout of the problem

наличие ледового канала, а также смещение судна относительно его оси. Коэффициенты Ю.А. Шиманского, рассчитываемые по теоретическому чертежу судна, дают возможность по вычисленной силе ледового сопротивления определить величину боковой силы.

Приводимые ниже результаты расчетов были получены для гипотетического крупнотоннажного судна длиной по ватерлинии 240 м, длиной цилиндрической вставки 140 м и шириной 50 м. У рассматриваемого судна наклон бортов в районе расположения цилиндрической вставки отсутствовал. Расчеты проводились при варьировании ширины ледового канала, проложенного ледоколом. Скорость движения судна во всех расчетах принималась постоянной и составляла 3 узла. В ходе их выполнения определялись ледовое сопротивление и суммарная боковая сила, представляющая собой разность между поперечными силами, возникающими на левом и правом бортах судна. Расчетная схема, в соответствии с которой рассчитывались силовые параметры движения судна при заданном смещении S диаметральной плоскости s от оси канала в сторону правого борта, для одного из возможных положений крупнотоннажного судна в «узком» канале представлена на рис. 2.

На приводимых ниже графиках (рис. 3) представлена величина суммарной боковой силы, отнесенная к величине ледового сопротивления судна при движении по ледовому каналу в симметричном положении. Относительные величины выбраны для простоты анализа, т.к. в данной работе основной задачей является выяснение причин, приводящих к нарушению симметрии движения судна по каналу.

Анализ данных, приведенных на рис. 3, позволяет следующим образом описать механизм нарушения симметрии движения крупнотоннажного судна по «узкому» каналу. Симметричное движение является устойчивым. Об этом свидетельствуют результаты расчета при малых смещениях диаметральной плоскости от оси канала (рис. 3б). При таких смещениях возникает восстанавливающая сила, которая препятствует дальнейшему нарастанию возмущений. Однако эта сила реализуется только при небольших смещениях. При возникновении большего смещения, например, из-за локального изменения толщины льда и/или его прочностных свойств, судно попадает в зону действия возмущающей силы (рис. 3а), которая увеличивается при дальнейшем увеличении смещения. Такое положение судна будет неустойчивым, смещение увеличивается, и судно очень быстро занимает несимметричное положение в канале. В этом положении суммарная боковая сила равна нулю. Несимметричное положение судна является устойчивым, причем для выведения судна из этого положения необходимо прикладывать довольно большие усилия.

Описанная выше ситуация возможна, если выполняется условие, при котором ледовое сопротивление входящего в лед правого борта судна оказывается ниже ледового сопротивления выходящего из льда левого борта. Сформулированное условие

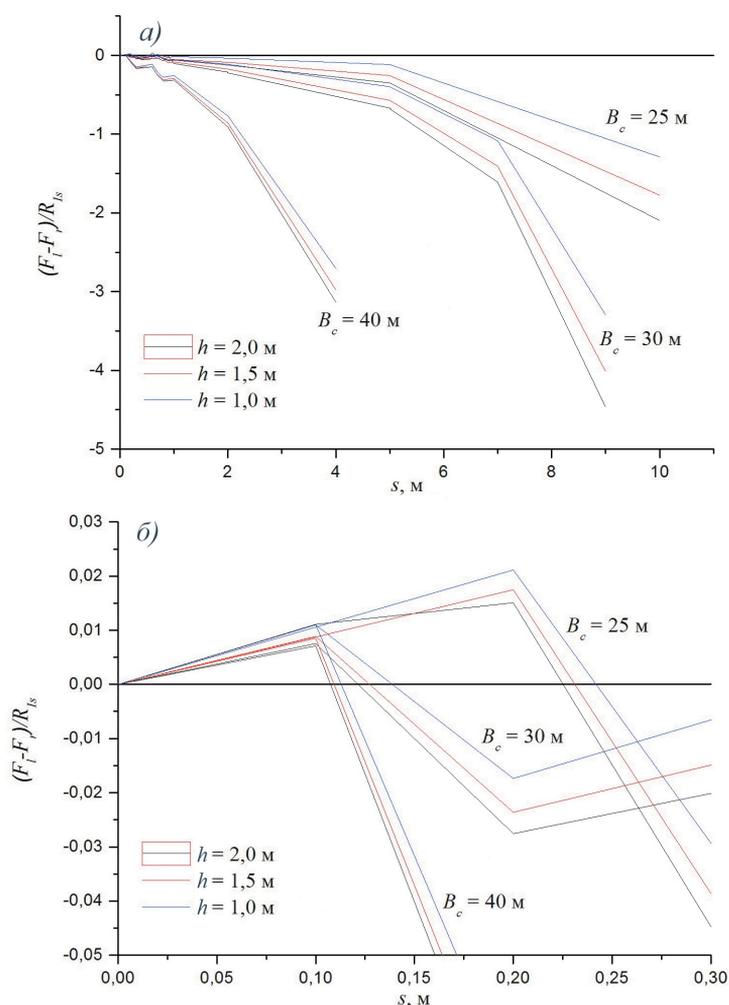


Рис. 3. Зависимость относительной суммарной боковой силы от смещения диаметральной плоскости судна от оси канала, ширины канала и толщины льда.

a — полный вид зависимости; *б* — начальный участок зависимости при малых смещениях

Fig. 3. Relative total side force versus ship CL shift from the channel axis, channel width and ice thickness.

a — complete curve; *б* — initial part of the curve at small shifts

выглядит довольно парадоксальным, тем не менее такая возможность легко может реализоваться у крупнотоннажных судов, имеющих прямостенные борта в районе цилиндрической вставки. При заданных главных размерениях судна его ледовое сопротивление зависит от формы носовой оконечности, которая характеризуется углами наклона ватерлинии, теоретических шпангоутов и батоксов. У большинства крупнотоннажных судов переход от носового заострения к цилиндрической вставке характеризуется очень малыми значениями углов наклона ватерлинии и шпангоутов. Если судно взаимодействует с ледяным покровом этими участками борта, то ледовое

сопротивление возрастает. Смещение же начала взаимодействия со льдом в сторону форштевня заметно улучшает ледокольные способности судна. Из приведенных рассуждений следует, что вполне может существовать такая форма корпуса крупнотоннажного судна, для которой описанный выше эффект не будет проявляться. Возможно, эффект будет отсутствовать у судов, цилиндрическая вставка которых имеет наклон борта 10 и более градусов.

Данные рис. 3 дают возможность проанализировать влияние на проявление эффекта нарушения симметрии таких факторов, как ширина канала и толщина льда. Можно констатировать, что эти факторы не оказывают заметного влияния. При уменьшении ширины канала процесс смены положения судна в канале происходит медленнее, что связано со скоростью возрастания суммарной поперечной силы, которая при небольших смещениях изменяется относительно медленно. При уменьшении ширины канала происходит также некоторое увеличение зоны действия восстанавливающей силы, приводящее к увеличению устойчивости симметричного движения. Указанные особенности также связаны с формой носовой оконечности судна. При уменьшенной ширине канала корпус судна вначале взаимодействует с кромками участками бортов, которые обладают достаточной ледокольной способностью. Толщина льда не влияет на характер сохранения и потери устойчивости положения судна в канале. Она лишь приводит к незначительному увеличению суммарной поперечной силы.

СОПРОТИВЛЕНИЕ КРУПНОТОННАЖНОГО СУДНА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ДВИЖЕНИИ ПО КАНАЛУ

Приближенный расчет ледового сопротивления судна при несимметричном движении по «узкому» каналу можно также выполнить с использованием формулы Б.П. Ионова. Для этого необходимо определить сопротивление некоторого условного корпуса, который может быть получен модификацией исходного корпуса. Для этого из общей ширины судна вычитается ширина ледового канала $B_s - B_c$. Полученная величина задает ординату точки ватерлинии, в которой борт судна начинает взаимодействовать с кромкой канала при несимметричном движении. Эта точка считается носовой точкой для модифицированного корпуса. Для модифицированного корпуса углы наклона ватерлинии к диаметральной плоскости и наклона шпангоутов сохраняют свои значения, они используются как для расчета сопротивления, так и для нахождения коэффициента Шиманского. Ширина модифицированного корпуса равна $B' = B_s - 2Y_c$. Длина носового заострения L_m' модифицированного корпуса определяется по формуле:

$$L_m' = X_c - L_{pm} / 2,$$

где L_{pm} — длина цилиндрической вставки исходного корпуса; X_c , Y_c — абсцисса и ордината точки ватерлинии, в которой борт судна начинает взаимодействовать с кромкой канала при несимметричном движении.

Ледовое сопротивление модифицированного корпуса рассчитывается по методу Б.П. Ионова с исходными данными, которые были определены выше. Результаты расчетов делятся на 2, т.к. разрушение льда происходит только одним бортом. На другой борт крупнотоннажного судна действует сила трения о кромку ледового канала. Она может быть определена с помощью коэффициента Шиманского. Итоговая формула для расчета сопротивления крупнотоннажного судна при несимметричном движении по ледовому каналу может быть записана следующим образом:

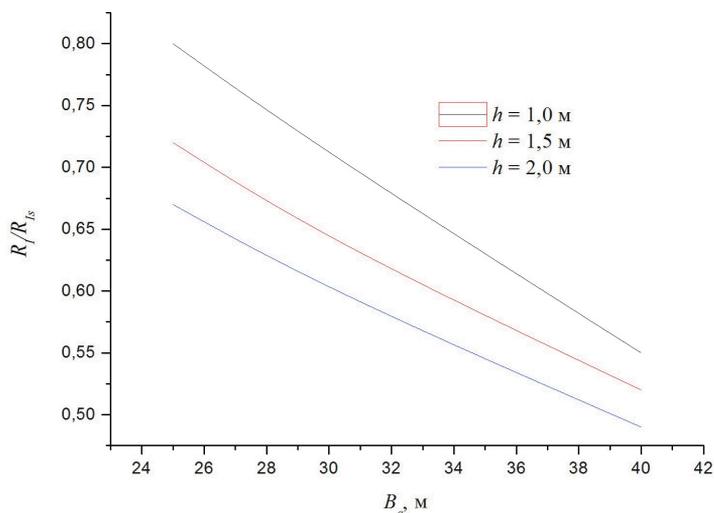


Рис. 4. Зависимость относительного сопротивления судна от ширины канала при несимметричном движении

Fig. 4 Relative resistance of asymmetrically moving ship versus channel width

$$R_l = (R_{m1}/2)(1 + f_{ld}\eta_{m2}),$$

где R_l — ледовое сопротивление модифицированного с учетом несимметричного движения по каналу корпуса; f_{ld} — коэффициент трения льда об обшивку корпуса судна; η_{m2} — коэффициент Шиманского для модифицированного корпуса.

По приведенной выше формуле были выполнены расчеты, результаты которых приведены на рис. 4. в виде зависимости отношения сопротивления при несимметричном движении R_l к сопротивлению в симметричном случае R_{ls} .

Результаты расчета показывают, что несимметричное движение крупнотоннажного судна по «узкому» каналу происходит при меньшем уровне ледового сопротивления, чем симметричное движение. Причем эффект увеличивается по мере возрастания толщины преодолеваемого льда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано объяснение эффекту нарушения симметрии при движении крупнотоннажного судна по «узкому» ледовому каналу. На основании результатов оценочных расчетов было показано, что симметричное движение обладает устойчивостью, которая тем не менее может быть достаточно легко нарушена действием различных внешних факторов, таких как локальные изменения толщины и прочностных свойств преодолеваемого льда. Действие этих факторов может привести к самопроизвольному смещению диаметральной плоскости судна относительно оси канала. Если это смещение превысит некоторую величину, то положение судна в канале становится неустойчивым и оно переходит в другое устойчивое положение, при котором один борт судна разрушает кромку канала, а другой трется о противоположную кромку. Возможность такого перехода из одного устойчивого положения в другое определяется особенностями формы корпуса крупнотоннажного судна в районе носового заострения и цилиндрической вставки.

Выполненные оценки ледового сопротивления судна при несимметричном режиме движения показали, что такой режим является более выгодным. Ледовое сопротивление может снижаться на величину до 50 % по отношению к симметричному движению в зависимости от толщины преодолеваемого льда и ширины ледового канала.

Описанный в работе эффект нарушения симметрии движения необходимо учитывать при планировании транспортных операций по проводке крупнотоннажных судов ледоколами. С одной стороны, снижение ледового сопротивления при несимметричном движении позволяет увеличить скорость проводки судна. С другой стороны, снижение сопротивления увеличивает тормозной путь судна, что может привести к аварийным ситуациям. По мнению авторов, описанный эффект должен быть более детально исследован в дальнейшем.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству ФГУП «Атомфлот» за стимуляцию исследовательских работ по обеспечению проводки крупнотоннажных судов ледоколами. Исследование выполнено при частичном финансировании Российским научным фондом (проект № 17-79-20162).

Acknowledgements. The authors are grateful to the management of FSUE Atomflot for encouragement of research studies on icebreaker-assisted operation of large-size vessels in Arctic waters. The research was partly supported by RSF (project No.17-79-20162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рукша В.В., Головинский С.А., Белкин М.С. Ледокольное обеспечение крупнейших национальных углеводородных проектов // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4 (24). С. 109–113.
2. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 103–110. doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
3. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017. 122 с.
4. Рукша В.В., Белкин М.С., Смирнов А.А., Арутюнян В.Г. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4 (20). С. 104–110.
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001. 512 с.; 2-е изд. СПб.: Судостроение. 2013. 504 с.
6. Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972, 286 с.

REFERENCES

1. Ruksha V.V., Golovinsky S.A., Belkin M.S. Icebreaker support for the largest national Arctic hydrocarbon projects. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2016, 4 (24): 109–113. [In Russian].
2. Pustoshny A.V., Sazonov K.E. Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round Arctic operations. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2017, 3 (27): 103–110. doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110. [In Russian].
3. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. *Ledovaya khodkost krupnotonnnykh sudov*. Propulsion performance in ice of large-size vessels. St. Petersburg: FGUP “Krylovskiy gosudarsyvennyi nauchnyiy centr”, 2017: 122 p. [In Russian].
4. Ruksha V.V., Belkin M.S., Smirnov A.A., Arutyunyan V.G. Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2015, 4 (20): 104–110. [In Russian].
5. Ionov B.P., Gramuzov E.M. *Ledovaya khodkost sudov*. Propulsion performance in ice of vessels. St. Petersburg: Sudostroenie 2001, 512 p.; 2nd edition. St. Petersburg: Sudostroenie, 2013: 504 p. [In Russian].
6. Kachtelyan V.I., Ryvlin A.Ya., Faddeev O.V., Yagodkin V.Ya. *Ledokoly*. Icebreakers. Leningrad: Sudostroenie, 1972: 286 p. [In Russian].