

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-68-78  
УДК 532.58:629.5.035.8+551.321.81

К.Е. Сазонов<sup>1, 2</sup> 

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

## ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВОГО МОМЕНТА НА ДВИЖИТЕЛЕ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования являются методы определения ледового момента на гребном винте, возникающего при фрезеровании им льда. Цель работы – рассмотрение существующих способов определения ледового момента на движителе, их критический анализ и определение направлений исследований, позволяющих получить адекватное его описание.

**Материалы и методы.** Материалом служат ранее опубликованные работы, а также данные модельных экспериментов по фрезерованию льда и натурные замеры, выполненные на гребных валах ледоколов и судов ледового плавания.

**Основные результаты.** В настоящее время существует целый ряд методов определения ледового момента: теоретический, модельного эксперимента, натуральных измерений на валопроводе судна и нормативный. Анализ нормативных требований, содержащихся в рекомендациях классификационных обществ, выявил существенные недостатки в используемых расчетных формулах. В исследовании обосновывается, что наиболее перспективным методом определения ледового момента на движителе может стать разработка его восстановления по данным натуральных измерений на валопроводе.

**Заключение.** Используемые методы определения ледового момента на движителе не дают возможности его полного описания. Наиболее перспективным является проведение натуральных испытаний с последующим анализом.

**Ключевые слова:** движитель, гребной винт, ледовый момент, фрезерование льда, гребной вал, натурные измерения, правила классификационных обществ.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-68-78  
UDC 532.58:629.5.035.8+551.321.81

К.Е. Sazonov<sup>1, 2</sup> 

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## DETERMINATION OF ICE-INDUCED ANTI-TORQUE OF PROPELLER

**Object and purpose of research.** This paper discusses the methods for determination of propeller anti-torque in ice milling conditions. The purpose of the study was to investigate existing methods for propeller anti-torque determination, analyse their respective pros and cons and to trace out the paths of further studies towards a satisfactory description of propeller anti-torque.

**Materials and methods.** This study relies on previous publications and experimental ice milling data from both laboratory tests and field measurements, as well as on full-scale measurement data obtained on propulsion shafts of real icebreakers and ice-going ships.

**Main results.** Currently, there is a wide variety of methods for obtaining anti-torque data: regulatory, theoretical, model testing and full-scale measurements on ship shafting. Analysis of the regulations given in the recommendations of various class societies has shown considerable drawbacks in the calculation formulae used in them. This paper proves

*Для цитирования:* Сазонов К.Е. Проблема определения ледового момента на движителе. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 68–78.

*For citations:* Sazonov K.E. Determination of ice-induced anti-torque of propeller. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 68–78 (in Russian).

that the most viable method for propeller anti-torque determination is its reconstruction as per the results of full-scale measurements on shaft line.

**Conclusion.** Current methods for determination of anti-torque do not describe this phenomenon exhaustively. The most promising solution here would be to perform full-scale trials and analyse their results.

**Keywords:** propeller, anti-torque, ice milling, propulsion shaft, full-scale trials, class rules.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Эксплуатация судов в ледовых условиях неизбежно приводит к механическому воздействию льда на гребной винт. Из-за этого возникают дополнительные, по отношению к гидродинамическим, ледовые моменты и силы, действующие на движитель. Эти усилия оказывают существенное влияние на работу пропульсивного комплекса судна, которое проявляется прежде всего в снижении частоты вращения валопровода.

Эксплуатация первых ледоколов и судов ледового плавания показала, что их движители взаимодействуют со льдом и что это может привести к серьезным неприятностям. Однако изучение указанных процессов началось только во второй половине прошлого века [1–3]. Эти исследования продолжают до настоящего времени. Необходимо отметить, что наибольшее внимание уделялось вопросам обеспечения прочности лопастей гребного винта. Влияние воздействия ледовых нагрузок на работу ЭУ изучено менее подробно.

Сейчас, когда перед промышленностью стоит задача расширить поставку отечественного энергетического оборудования для ледоколов и судов ледового плавания, стал актуальным вопрос совершенствования энергетических систем, включая электродвижение, с целью обеспечения более надежной, безопасной и эффективной их эксплуатации во льдах. Одним из вариантов его решения стало предложение о создании специализированного стенда, на котором можно проводить отладку энергетического оборудования [4]. Для реализации этого предложения необходимо иметь адекватное описание ледового момента на гребном винте.

В данной работе проанализированы известные методы определения ледового момента. Их можно условно разделить на расчетные, экспериментальные (модельный эксперимент и данные натурных измерений) и, как их некоторое следствие, нормативные. Дается краткий разбор указанных методов, при этом особое внимание уделяется проблемам, которые возникают при использовании данных методов по отдельности или в совокупности. В какой-то мере эти вопросы рассмотрены в работе [5].

## Расчетные методы

### Calculation methods

Как говорилось выше, расчетные модели появились одними из первых. Авторы этих разработок пытались дать теоретическое описание процессам, наблюдаемым в условиях эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания. Дальнейшее развитие этих методов во многом стало базироваться на результатах специально поставленных экспериментальных исследований.

Теоретическое описание рассматривает взаимодействие лопасти со льдом. Часто это рассмотрение ограничивается плоской задачей взаимодействия профиля лопасти со средой [6, 7]. Для изучения прочности гребного винта обычно используется трехмерная модель конечных элементов, при этом ледовые нагрузки задаются в соответствии с рекомендациями нормативных документов [8].

Основная трудность при разработке теоретических моделей взаимодействия лопасти винта со льдом заключается в адекватном описании процесса разрушения льда. К сожалению, общая теория разрушения льда до сих пор не разработана, хотя на решение этой проблемы в последние полвека было потрачено много усилий исследователей.

В этой связи каждый разработчик теоретической модели в соответствии со своими знаниями и опытом выбирает ту или иную модель разрушения. Очевидно, что такой выбор весьма заметно влияет на получаемые при расчетах результаты. Кроме этого на результаты сопоставления расчетных величин и экспериментальных данных оказывают серьезное влияние погрешности (иногда весьма существенные) в определении физико-механических свойств льда, а также их изменчивость.

## Модельные исследования взаимодействия движителей со льдом

### Model ice interaction tests

Появление в середине XX века ледовых бассейнов, позволивших проводить исследования взаимодействия инженерных объектов со льдом с использова-

нием физических моделей, открыло возможность изучения процессов фрезерования льда гребными винтами в модельном масштабе. На рис. 1 представлена фотография эксперимента по фрезерованию моделированного льда моделью гребного винта, которая расположена на установке свободной воды. Подробно методы проведения таких экспериментов изложены в монографии [9], некоторые из полученных результатов – например, в работах [8, 10].

Результаты таких экспериментов, которые проводились во многих ледовых бассейнах мира, позволили установить ряд важных закономерностей процесса фрезерования льда. Было выяснено влияние основных геометрических характеристик гребных винтов (шагового и дискового отношений, характеристики профиля и т.п.) на величину ледовых нагрузок. Не менее важным было установление характера влияния на нагрузки кинематических параметров, прежде всего – поступи движителя.

При анализе и использовании результатов подобных экспериментов необходимо учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, подавляющее большинство таких экспериментов выполнялось по ряду технических причин на воздухе, а не в воде. В результате получали чистый ледовый упор и момент, но влияние процесса фрезерования на гидродинамические характеристики гребного винта не исследовалось.

Во-вторых (что наиболее важно), указанные эксперименты проводятся при постоянном значении частоты вращения винта. В эксплуатационных условиях процесс фрезерования всегда связан со снижением частоты вращения, часто весьма значи-



**Рис. 1.** Фрезерование куска льда с помощью установки свободной воды

**Fig. 1.** Ice milling at open-water test rig

тельным. Как сказывается изменение частоты вращения на величине ледовых воздействий на движители, в таких экспериментах изучить нельзя.

Кроме этого гребной вал экспериментальной установки является «жестким», и в нем при фрезеровании не возникают заметные крутильные колебания. Наиболее интересную информацию при проведении модельного эксперимента по фрезерованию можно было бы получить, используя динамометр, позволяющий измерять компоненты ледовой нагрузки на отдельной лопасти. Однако таких приборов у российских исследователей уже не осталось.

## Данные натуральных измерений

### Full-scale measurement data

Казалось бы, что наиболее полную информацию, по крайней мере, о ледовом моменте относительно легко получить при проведении непосредственных измерений на гребном валу натурального судна. Такие измерения проводятся довольно часто и практически сводятся к регистрации деформации скручивания вала [11]. На рис. 2 приведены примеры таких записей, которые заимствованы из работы [4].

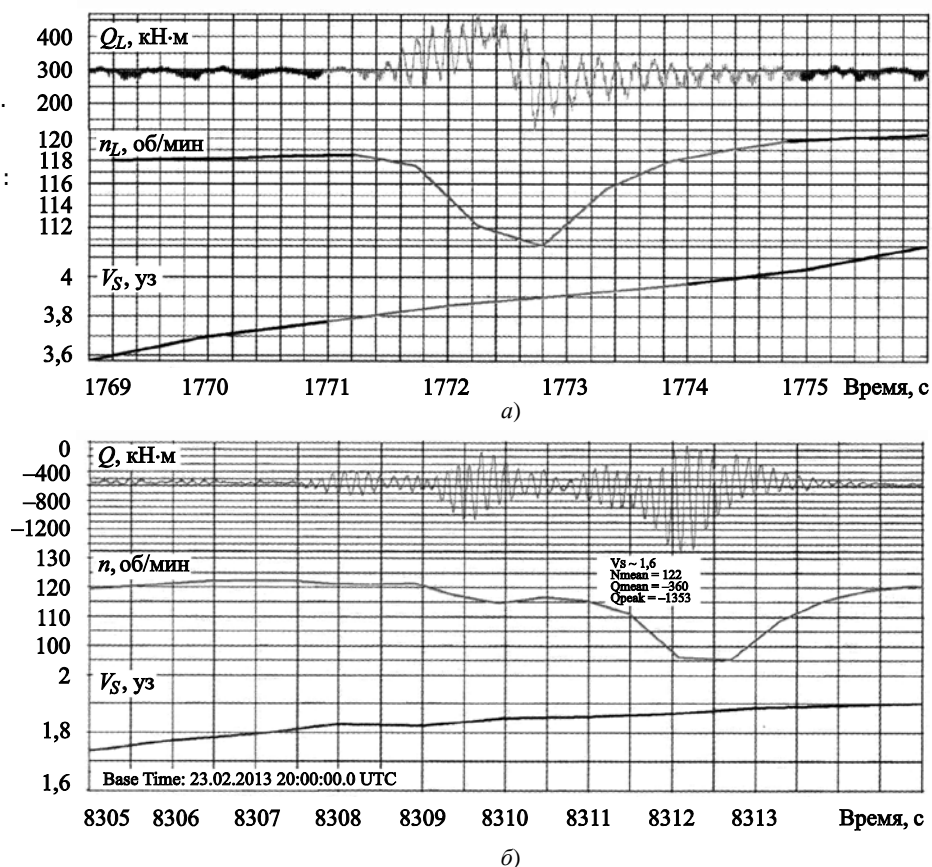
На приведенных графиках хорошо видно, что натурные данные содержат два процесса. Первый – это вынужденные крутильные колебания вала под действием ледового момента и изменяющегося момента двигателя. Второй процесс – свободные затухающие крутильные колебания, происходящие после прекращения действия ледового момента. Необходимо отметить, что оба процесса являются фактически более сложными, т.к. происходят при постоянном изменении частоты вращения вала.

Представленные записи демонстрируют временную реализацию момента, действующего в сечении валопровода в месте установки измерительного преобразователя (современные методы проведения подобных измерений подробно изложены в работах [12, 13]). Совершенно очевидно, что измеренный момент вызван ледовым моментом на гребном винте. Однако восстановление ледового момента по таким измерениям представляет собой сложную задачу.

Дело в том (и это хорошо известно), что валопроводы судов обладают небольшой жесткостью на кручение. Это обстоятельство приводит к возникновению в валопроводе крутильных колебаний. Собственная частота этих колебаний часто близка или совпадает с частотой воздействия ледового момента, т.е. с лопастной частотой. Поэтому регистрируемый на валопроводе сигнал является записью резонансных или близких к резонансным колебаний, что делает крайне

**Рис. 2.** Типичные записи регистрации ледовых моментов при проведении измерений на гребном валу. Научно-исследовательское судно (НИС) «Академик Трешников». Антарктика [4]: а) случайные взаимодействия движителя со льдом при движении по каналу в толстом льду; б) выход из собственного канала задним ходом

**Fig. 2.** Typical time histories of anti-torques during full-scale measurements on propulsion of *Akademik Treshnikov* research vessel in the Antarctic [4]: а) random ice interaction of the propeller as ship moved in thick-ice channel; б) channel breakout (astern running)



трудоемкой процедуру восстановления временной зависимости ледового момента на движителе.

Дополнительным усложняющим обстоятельством является изменение частоты вращения вала в процессе взаимодействия винта со льдом, а это означает, что положение равновесия, относительно которого происходят крутильные колебания, постоянно изменяется. При решении традиционных задач о крутильных колебаниях обычно принимается, что изменения частоты вращения не происходит [14]. В настоящее время ряд исследователей предпринимают попытки решения этой задачи [5, 15, 16].

Имеется ряд затруднений и с гидродинамической частью возмущающего момента. Обычно под ледовым моментом на движителе понимают превышение момента над гидродинамическим при заданной частоте вращения. Такой подход предполагает, что гидродинамика движителя не изменяется при фрезеровании лопастями льда. Правомерность такого подхода, к сожалению, никем не проверялась. Более того, в последнее время появились работы, демонстрирующие существенное изменение гидродинамики винта при фрезеровании [17]. В работе [18] показано, что

при фрезеровании льда могут возникать кавитационные явления. В первом приближении традиционный подход, по-видимому, применим. Однако в дальнейшем необходимо уточнить описание гидродинамической нагрузки на гребной винт, фрезерующий лед.

С гидродинамикой связано еще одно затруднение, возникающее при любых расчетах, кроме использования методов вычислительной гидродинамики. Речь идет об определении величины присоединенного момента инерции движителя. Уже для воды, свободной ото льда, вычисление этой характеристики вызывает трудности – хотя бы потому, что в литературе приводятся отличающиеся друг от друга формулы. В качестве примера приведем формулу, которая использовалась в работе [13].

$$I_{pa} = 0,0703g \frac{\rho D^5}{\pi Z} \left( \frac{P_{0,7}}{D} \right)^2 \left( \frac{A_E}{A_0} \right)^2, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр движителя;  $\rho$  – плотность воды;  $Z$  – число лопастей движителя;  $P_{0,7}/D$  – шаговое отношение движителя на относительном радиусе равном 0,7;  $A_E/A_0$  – дисковое отношение движителя.

Заключая рассмотрение возможностей натурно-го эксперимента, можно констатировать, что именно такой эксперимент позволяет получить наиболее представительные данные о процессах, возникающих в пропульсивной установке судна при взаимодействии его движителей со льдом. Представляется перспективной дальнейшая разработка методов восстановления временных зависимостей ледового момента по данным измерений, выполняемых на валопроводе.

## Требования классификационных обществ

### Requirements of class societies

Ряд классификационных обществ, например DNV [19], Финско-шведские правила [20] и IACS (International Association of Classification Societies) [21], содержат формулы для определения ледовой нагрузки на движители. Требования датской компании DNV и Финско-шведских правил совпадают, при этом наиболее полно требования к заданию расчетного ледового момента на гребном винте изложены в требованиях DNV. В соответствии с ними максимальный ледовый момент  $Q_{\max}$ , который воспринимает в процессе фрезерования отдельная лопасть, задается следующими соотношениями:

$$Q_{\max} = 10,9 \left(1 - \frac{d}{D}\right) \left(\frac{P_{0,7}}{D}\right)^{0,16} (nD)^{0,17} D^3, \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad (2)$$

$$D \geq D_{\lim},$$

$$Q_{\max} = 20,7 \left(1 - \frac{d}{D}\right) \left(\frac{P_{0,7}}{D}\right)^{0,16} (nD)^{0,17} D^{1,9} h_{ice}^{1,1}, \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad (3)$$

$$D < D_{\lim},$$

$$D_{\lim} = 1,8h_{ice}, \quad (4)$$

где  $d$ ,  $D$  – диаметр ступицы и гребного винта соответственно;  $P_{0,7}/D$  – шаговое отношение движителя

на относительном радиусе, равном 0,7;  $n$  – частота вращения движителя на швартовном режиме, об/с;  $h_{ice}$  – толщина льда, в котором происходит движение судна.

Ледовый момент, возникающий в результате удара одиночной лопасти об лед, как функция угла поворота гребного винта  $\varphi$ , тогда равен

$$Q_{ice}(\varphi) = C_p Q_{\max} \sin\left(\varphi \frac{180}{\alpha_i}\right), \quad (5)$$

где  $C_p$  – коэффициент;  $\alpha_i$  – продолжительность процесса фрезерования одной лопастью, выраженная в угле поворота движителя.

Эти величины задаются таблично (табл. 1). Очевидно, что  $\alpha_i$  характеризует также глубину прорезания льда лопастью.

На рис. 3 представлены временные реализации момента на 4-лопастном винте. Суммарный ледовый момент получается суммированием крутящего момента одиночных лопастей с учетом фазового сдвига  $360/Z$ ;  $Z$  – число лопастей. Дополнительно в правилах рекомендуют в начале и конце процесса фрезерования использовать линейную функцию на участке длиной  $270^\circ$  для задания амплитуды ледового момента. Так, на начальном этапе фрезерования для первого и второго случаев имеем три взаимодействия лопасти, для которых необходимо снизить величину  $Q_{\max}$ . Т.е. расчет должен выполняться по формуле:

$$Q_{ice}(\varphi) = C_p k Q_{\max} \sin\left(\varphi \frac{180}{\alpha_i}\right), \quad \varphi \leq 270^\circ. \quad (6)$$

Величина коэффициента  $k$  представлена в табл. 2.

Правила DNV предлагают определять число полных оборотов гребного винта при фрезеровании  $N_Q$  по следующей формуле

$$N_Q = 2h_{ice}, \quad (7)$$

а число ударов лопастями – как  $ZN_Q$ .

**Таблица 1.** Значения  $C_p$  и  $\alpha_i$

**Table 1.** Values of  $C_p$  and  $\alpha_i$

Сценарий взаимодействия	Характер взаимодействия	$C_p$	$\alpha_i$
Случай 1	Взаимодействие с одним блоком льда	0,75	90
Случай 2	Взаимодействие с одним блоком льда	1,0	135
Случай 3	Взаимодействие с двумя блоками льда	0,5	45

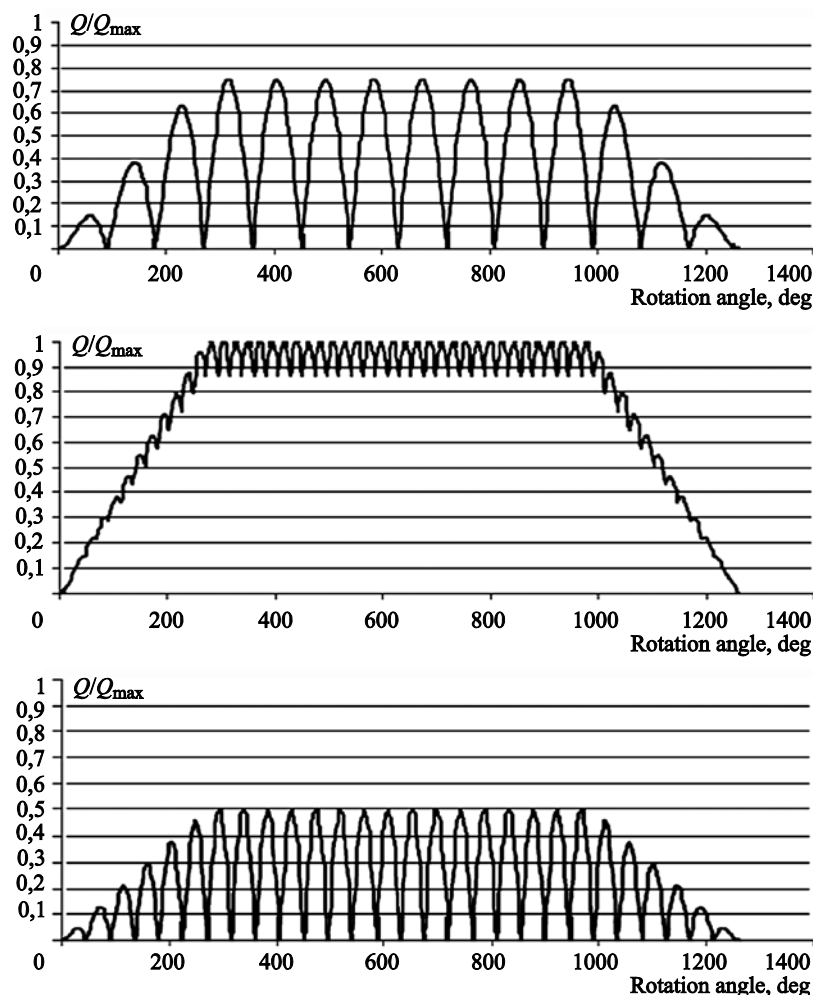
Правила IACS по структуре похожи на выражения (2)–(4), хотя имеют некоторые отличия:

$$Q_{\max} = 74S_{q_{ice}} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \left(\frac{P_{0,7}}{D}\right)^{0,16} \left(\frac{t_{0,7}}{D}\right)^{0,6} \times (nD)^{0,17} D^3, \text{ кН}\cdot\text{м}; D \geq D_{\text{lim}}, \quad (8)$$

$$Q_{\max} = 141S_{q_{ice}} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \left(\frac{P_{0,7}}{D}\right)^{0,16} \left(\frac{t_{0,7}}{D}\right)^{0,6} \times (nD)^{0,17} D^{1,9} h_{ice}^{1,1}, \text{ кН}\cdot\text{м}; D < D_{\text{lim}}, \quad (9)$$

здесь  $t_{0,7}/D$  – относительная толщина профиля на относительном радиусе 0,7;  $S_{q_{ice}}$  – индикатор прочности льда для ледового момента, величина которого зависит от ледового класса судна и задается таблично (табл. 3).

В этих правилах дополнительно учитывается такая геометрическая характеристика движителя, как относительная ширина профиля на одном из несущих радиусов. Еще одним отличием правил IACS является отсутствие линейного сглаживания в начале и конце процесса фрезерования. Начиная



**Рис. 3.** Временные реализации ледового момента на лопасти для различных случаев взаимодействия гребного винта со льдом

**Fig. 3.** Time histories of blade anti-torque for different scenarios of ice interaction

**Таблица 2.** Значения коэффициента  $k$

**Table 2.** Values of coefficient  $k$

Сценарий взаимодействия	1 лопасть	2 лопасть	3 лопасть
Случай 1	0,167	0,5	0,833
Случай 2	0,25	0,583	0,917

**Таблица 3.** Значения коэффициента  $S_{q_{ice}}$

**Table 3.** Values of coefficient  $S_{q_{ice}}$

Ледовый класс судна	Толщина льда, м	$S_{q_{ice}}$
PC1	4,0	1,15
PC2	3,5	1,15
PC3	3,0	1,15
PC4	2,5	1,15
PC5	2,0	1,15
PC6	1,75	1
PC7	1,5	1

**Таблица 4.** Значения  $C_p$  и  $\alpha_i$

**Table 4.** Values of  $C_p$  and  $\alpha_i$

Сценарий взаимодействия	Характер взаимодействия	$C_p$	$\alpha_i$
Случай 1	Взаимодействие с одним блоком льда	0,5	45
Случай 2	Взаимодействие с одним блоком льда	0,75	90
Случай 3	Взаимодействие с одним блоком льда	1,0	135
Случай 4	Взаимодействие с двумя блоками льда	0,5	45

с первого удара лопасти момент на ней достигает максимальной величины. Таблица расчетных случаев в правилах IACS также расширена, она содержит еще два случая по сравнению с DNV (табл. 4).

## Анализ требований

### Analysis of requirements

Оценивая описанную выше параметризацию ледового момента как довольно значительное достижение, необходимо тем не менее высказать ряд замечаний.

Анализ структуры формул (2)–(9) указывает, что они несут эмпирический характер. В этих формулах предпринята попытка учесть лишь некоторые геометрические особенности ледового движителя. Вся механика процесса фрезерования льда спрятана в эмпирических коэффициентах. В начале работы рассмотрены различные методы определения ледового момента, на основании чего сделан вывод о том, что эти методы пока позволяют получить лишь приближенную информацию о ледовом моменте. Поэтому построение на базе такой информации обобщающих эмпирических формул может привести к существенным погрешностям.

Важнейшим недостатком рассматриваемых формул является отсутствие зависимости величины

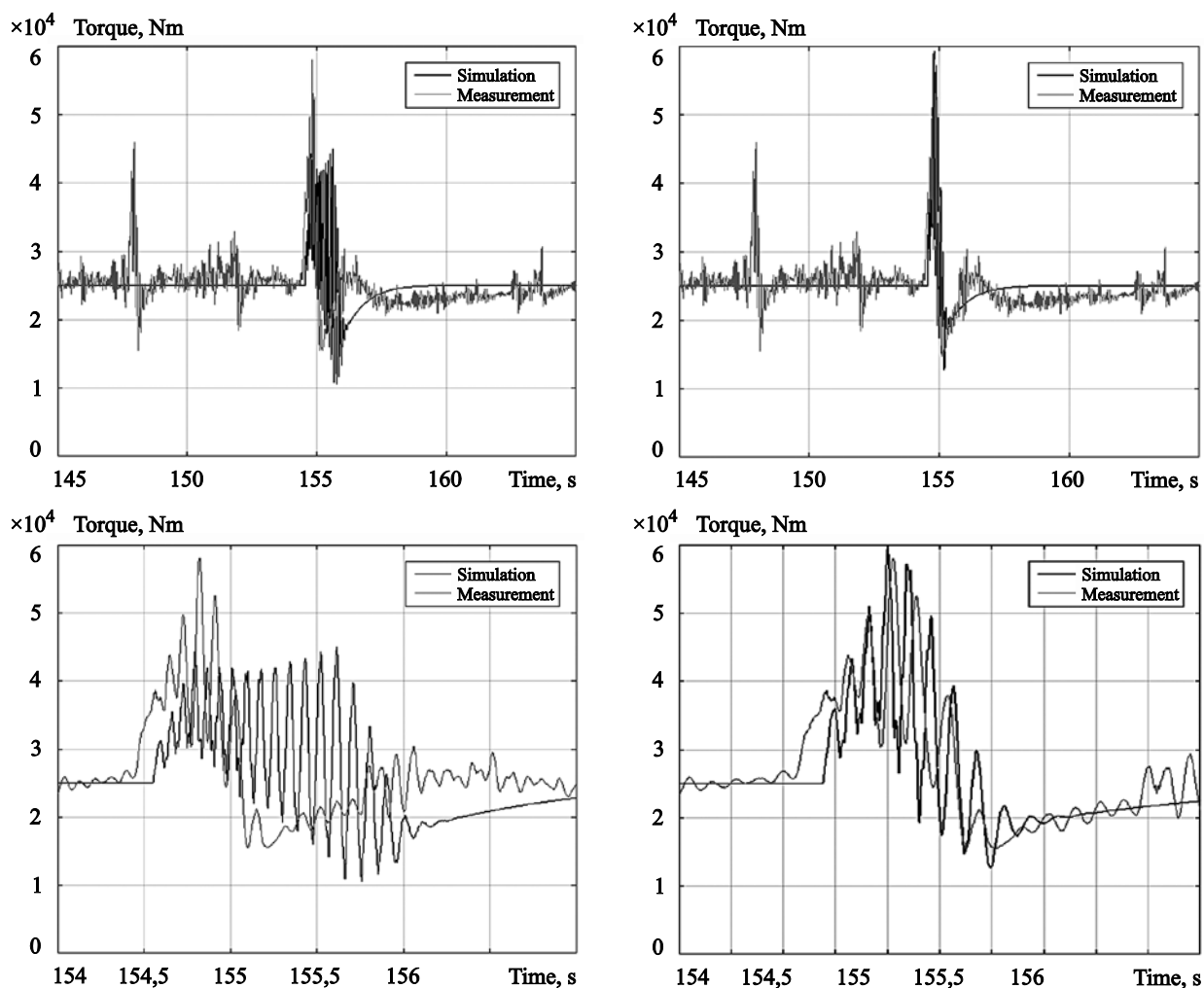
ледового момента от частоты вращения гребного вала. В соответствии с теоретическими моделями при изменении частоты вращения изменяется характер разрушения льда лопастью и, следовательно, ледовый момент, действующий на движитель. По данным В.А. Беляшова [22], ледовый момент увеличивается при возрастании относительной поступи. При фрезеровании относительная поступь движителя всегда увеличивается, т.к. частота его вращения уменьшается, а скорость движения судна практически не изменяется. По всей видимости, принимать ледовый момент постоянным в активной фазе фрезерования (рис. 3) нельзя.

Указанный недостаток отмечают и зарубежные авторы. Так, в работе [23] предпринята попытка учета влияния изменения частоты вращения гребного вала на величину суммарного момента (ледового и гидродинамического) на гребном винте. К сожалению, из указанной работы неясно, каким образом определялась временная зависимость частоты вращения в процессе фрезерования, хотя эти зависимости приведены в виде графиков. Кроме этого непонятно, как вводились поправки на изменение частоты вращения в величину ледового момента, действующего на отдельную лопасть, т.к. эта величина определялась по правилам IACS и DNV.

По-видимому, авторы использовали формулы (2)–(3) и (8)–(9), положив в них текущие значения частоты вращения вместо частоты, реализуемой на швартовном режиме. В результате выполненных действий получен результат, заключающийся в том, что учет снижения частоты вращения приводит к заметному снижению суммарного момента на двигателе, причем это снижение в основном определяется уменьшением гидродинамического момента. По мнению исследователей, ледовый момент в процессе фрезерования может незначительно уменьшаться. Автор данной работы не согласен с таким выводом. Выше уже отмечалось, что анализ механики процесса фрезерования пока-

зывает, что при снижении частоты вращения ледовый момент должен возрастать.

Также вызывает большие сомнения наличие в Финско-шведских правилах и DNV линейного возрастания/падения ледового момента на начальной и конечной стадиях фрезерования. Если с некоторыми оговорками линейное возрастание момента в начале взаимодействия еще можно принять, то такой же процесс в конце мало вероятен. Наблюдения за льдинами, которые подверглись фрезерованию, в натуральных условиях убеждают, что этот процесс обычно заканчивается внезапно, т.к. винт достигает края льдины. Поэтому подход, принятый в правилах IACS, на наш взгляд, является предпочтительным.



**Рис. 4.** Сопоставление результатов расчета с натурными данными. Левый столбец – расчет по формулам DNV. Правый столбец – формулы DNV откорректированы

**Fig. 4.** Calculation results vs full-scale data. Left column: calculation as per DNV expressions. Right column: updated DNV expressions



Интересное сопоставление результатов сравнения расчетов по математической модели, в которой для задания ледового момента использовались формулы DNV, и данных натурных измерений приведены в [24]. В этой работе создана конечно-элементная модель валолинии (Z-образная передача на винторулевую колонку (ВРК)), с помощью которой выполнен расчет, причем ледовый момент задавался по правилам DNV. Результаты сопоставлены с данными натурных измерений (рис. 4).

Непосредственный расчет по формулам DNV существенно разошелся с натурными измерениями. После того как авторы внесли корректировку в эти формулы, а именно снизили на 50 % продолжительность процесса и увеличили на 75 % амплитуду, сходимость результатов существенно улучшилась. Приведенный пример показывает, что формулы классификационных обществ далеки от совершенства и нуждаются в существенной доработке. В то же время в работе [11] указывается, что наблюдается хорошее совпадение результатов расчетов с данными натурального эксперимента.

Необходимо сделать еще одно замечание. При изучении зарубежных работ, посвященных рассматриваемому в статье вопросу, у автора создалось впечатление, что в них часто неправильно трактуется процесс фрезерования льда. В подавляющем большинстве работ за продолжительность процесса фрезерования принимают период, который начинается с падения частоты вращения вала, а заканчивается, когда частота примерно вернулась к первоначальному значению. Все это время продолжает действовать ледовый момент.

Выше, при анализе рис. 2, было указано, что натурные данные содержат два участка: вынужденные крутильные колебания под действием ледового момента и свободные затухающие крутильные колебания. По нашему мнению, действие ледового момента на движитель заканчивается в точке, которая характеризуется минимальным значением частоты вращения гребного вала.

## Заключение

### Conclusion

В работе рассмотрены различные способы определения ледового момента, который действует на движитель судна, эксплуатируемого в ледовых условиях. Наличие адекватного описания этого момента крайне важно для целого ряда практических задач проектирования судов, тем не менее эта задача еще далека от полного решения.

Анализ, проведенный в данной работе, показал, что все рассмотренные методы по тем или иным причинам не позволяют достаточно точно, чтобы удовлетворить потребности практики, описать ледовое воздействие на гребной винт. Предложенная рядом классификационных обществ параметризация ледового момента на движителе далеко не всегда позволяет описать получаемые в натуральных условиях данные. По всей видимости, эти параметризации нуждаются в изменениях и дополнениях.

Наиболее перспективным представляется концентрация усилий на проведении натурных измерений на ледоколах и судах, эксплуатируемых в ледовых условиях. При этом необходимо продолжить разработку методов восстановления временных зависимостей ледового момента по данным непосредственных измерений на валолиниях.

## Список использованной литературы

1. *Игнатьев М.А.* Гребные винты судов ледового плавания. Ленинград : Судостроение, 1966, 114 с.
2. *Ягодкин В.Я.* Аналитическое определение момента сопротивления вращению гребного винта при его взаимодействии со льдом // Проблемы Арктики и Антарктики. 1963. Вып. 13. С. 79–88.
3. *Янковский С.В.* Внешние силы, действующие на лопасть гребного винта при работе во льдах, их зависимость от геометрических и кинематических параметров винта // Материалы по обмену производственно-техническим опытом проектирования морских судов. 1967. Вып. 3. С. 37–124.
4. О моделировании нагрузки гребных электродвигателей ледоколов при проведении стендовых и виртуальных испытаний систем электродвижения / *Н.В. Васильев, И.М. Калинин, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко, К.Е. Сазонов* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1(399). С. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30.
5. *Polic D., Ehlers S., Æsøy V.* Inverse modeling approach for transformation of propeller shaft angular deformation and velocity to propeller torque load // Marine Structures. 2019. Vol. 67. P. 102614. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.04.002.
6. *Беляшов В.А., Шнаков В.С.* О механизме разрушения льда лопастями гребных винтов // Механика и физика льда : [Сб. ст.]. Москва : Наука, 1983. С. 21–29.
7. *Koskinen P., Soiminen H., Jussila M.* New propeller ice load models // Integrated numerical and experimental methods in ship design. Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 1996. P. 21–34. (VTT Symposium ; № 168).

8. Numerical investigation of propeller-ice interaction effects / *A.G. Khan, Q. Hissette, H. Streckwall, P. Liu* // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 216. P. 107716 (30 p.). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107716.
9. *Сазонов К.Е.* Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. Санкт-Петербург: ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 2021. 306 с.
10. Ледовые нагрузки для расчета прочности ледокольных гребных винтов / *А.В. Андрияшин, О.Н. Беззубик, А.В. Бицуля, М.А. Ганноев* // Научно-технический сборник РМРС. 2000. № 23. С. 162–179.
11. *Kinnunen A.* Dynamic response of propulsion shaft line systems to propeller ice torque excitation. Espoo, 2017. 22 p. (Research report / Winter Navigation Research Board ; № 97).
12. A Measurement system to monitor propulsion performance and ice-induced shaftline dynamic response of icebreakers / *A. Zambon, L. Moro, J. Brown, A. Kennedy, D. Oldford* // *Journal of Marine Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 10, № 4. P. 522 (p. 1–22). DOI: 10.3390/jmse10040522.
13. *Zambon A.* Transient torsional vibration analysis of polar-class propulsion shafting systems under ice-propeller interaction loads : PhD Thesis / *A. Zambon* ; Memorial University of Newfoundland, Faculty of Engineering and Applied Science. St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 2022. 292 p. DOI: 10.48336/0FY1-B424.
14. *Истомин П.А.* Крутильные колебания в судовых ДВС. Ленинград : Судостроение, 1968. 306 с.
15. *Nickerson B.M., Bekker A.* A comparison of inverse models for the estimation of ice-induced propeller moments on a polar vessel // *Proceedings of the 40<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2021)*. New York : ASME 2021. Vol. 7: Polar and Arctic Sciences and Technology. P. OMAE2021-62755. DOI: 10.1115/OMAE2021-62755.
16. *Polić D.* [et al.]. Transient simulation of the propulsion machinery system operating in ice – Modeling approach // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 124. P. 437–449. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.011.
17. Experimental investigation of the effect of ice blockage on propeller hydrodynamic performance / *C.Y. Guo, P. Xu, C. Wang, W.P. Xiong* // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. P. 1–19. DOI: 10.1155/2019/3712012.
18. Cavitation and induced excitation force of ice-class propeller blocked by ice / *P. Xu, C. Wang, L. Ye* [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, № 6. P. 674 (p. 1–25). DOI: 10.3390/jmse9060674.
19. Ice Strengthening of Propulsion Machinery / *Den Norske Veritas. Høvik*, 2011. 63 p. (Classification Notes ; № 51.1).
20. Ice Class Regulations and the Application Thereof (Finnish-Swedish Ice Class Rules 2017) : ad. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016 / Finnish Transport Safety Agency. Helsinki, 2017. 65 p.
21. Requirements Concerning Polar Class: Rev. 1 / International Association of Classification Societies. London : IACS, 2011. 39 p.
22. *Беляшов В.А.* Исследование физических процессов взаимодействия гребных винтов со льдом и разработка метода прогнозирования действующих на них ледовых нагрузок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.08.01 / *В.А. Беляшов* ; ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2000. 25 с.
23. Propulsion machinery operating in ice – A modelling and simulation approach / *D. Polic, S. Ehlers, V. Æsøy, E. Pedersen* // *Proceedings of the 27<sup>th</sup> Conference on Modelling and Simulation*. Dudweiler : Digitaldruck Pirrot, 2013. P. 191–197. DOI: 10.7148/2013-0191.
24. Propulsion shaft line ice-induced dynamic torque response calculation and comparison to full scale / *A. Kinnunen, T. Turunen, P. Koskinen, J. Heinonen* // *Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'17)*. Red Hook : Curran, 2017. Vol. 2. P. POAC17-061, p. 1151–1158.

## References

1. *Ignatyev M.A.* Propellers of ice-going ships. Leningrad : Sudostroeniye, 1966. 114 p. (*in Russian*).
2. *Yagodkin V.Ya.* Analytical determination of antitorque moment of the propeller interacting with ice // *Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research)*. 1963. Vol. 13. P. 79–88 (*in Russian*).
3. *Yankovsky S.V.* External forces acting on propeller blade in ice and their relationship with propeller geometry and kinematics // *Materials on exchange with industrial and technical experience of sea-going ship design*. 1967. Vol. 3. P. 37–124 (*in Russian*).
4. *Vasilyev N., Kalinin I., Polovinkin V., Pustoshny A., Savchenko O., Sazonov K.* Load simulation of icebreaker propulsion motors at laboratory and virtual tests of electric propulsion systems // *Transactions of the Krylov State Research Centre 2022*. Vol. 1(399). P. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30 (*in Russian*).
5. *Polic D., Ehlers S., Æsøy V.* Inverse modeling approach for transformation of propeller shaft angular deformation and velocity to propeller torque load // *Marine Structures*. 2019. Vol. 67. P. 102614. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.04.002.
6. *Belyashov V.A., Shpakov V.S.* On mechanism of ice failure with propeller blades // *Physics and mechanics*

- of ice : Compendium of papers. Moscow : Nauka, 1983. P. 21–29 (in Russian).
7. Koskinen P., Soininen H., Jussila M. New propeller ice load models // Integrated numerical and experimental methods in ship design. Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 1996. P. 21–34. (VTT Symposium ; № 168).
  8. Numerical investigation of propeller-ice interaction effects / A.G. Khan, Q. Hisette, H. Streckwall, P. Liu // Ocean Engineering. 2020. Vol. 216. P. 107716 (30 p.). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107716.
  9. Sazonov K.E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. (in Russian).
  10. Ice-induced loads for strength calculations of icebreaker propellers / A.V. Andryushin, O.N. Bezzubik, A.V. Bitsulya, M.A. Gappoev // Research Bulletin of Russian Maritime Registry of Shipping. 2000. No. 23. P. 162–179 (in Russian).
  11. Kinnunen A. Dynamic response of propulsion shaft line systems to propeller ice torque excitation. Espoo, 2017. 22 p. (Research report / Winter Navigation Research Board ; № 97).
  12. A Measurement system to monitor propulsion performance and ice-induced shaftline dynamic response of icebreakers / A. Zambon, L. Moro, J. Brown, A. Kennedy, D. Oldford // Journal of Marine Sciences and Engineering. 2022. Vol. 10, № 4. P. 522 (p. 1–22). DOI: 10.3390/jmse10040522.
  13. Zambon A. Transient torsional vibration analysis of polar-class propulsion shafting systems under ice-propeller interaction loads : PhD Thesis / A. Zambon ; Memorial University of Newfoundland, Faculty of Engineering and Applied Science. St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 2022. 292 p. DOI: 10.48336/OFY1-B424.
  14. Istomin P.A. Torsional vibrations of marine internal combustion engines. Leningrad : Sudostroyeniye, 1968. 306 p. (in Russian).
  15. Nickerson B.M., Bekker A. A comparison of inverse models for the estimation of ice-induced propeller moments on a polar vessel // Proceedings of the 40<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2021). New York : ASME 2021. Vol. 7: Polar and Arctic Sciences and Technology. P. OMAE2021-62755. DOI: 10.1115/OMAE2021-62755.
  16. Polić D. [et al.]. Transient simulation of the propulsion machinery system operating in ice – Modeling approach // Ocean Engineering. 2016. Vol. 124. P. 437–449. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.011.
  17. Experimental investigation of the effect of ice blockage on propeller hydrodynamic performance / C.Y. Guo, P. Xu, C. Wang, W.P. Xiong // Mathematical Problems in Engineering. 2019. P. 1–19. DOI: 10.1155/2019/3712012.
  18. Cavitation and induced excitation force of ice-class propeller blocked by ice / P. Xu, C. Wang, L. Ye [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, № 6. P. 674 (p. 1–25). DOI: 10.3390/jmse9060674.
  19. Ice Strengthening of Propulsion Machinery / Den Norske Veritas. Høvik, 2011. 63 p. (Classification Notes ; № 51.1).
  20. Ice Class Regulations and the Application Thereof (Finnish-Swedish Ice Class Rules 2017) : ad. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016 / Finnish Transport Safety Agency. Helsinki, 2017. 65 p.
  21. Requirements Concerning Polar Class: Rev. 1 / International Association of Classification Societies. London : IACS, 2011. 39 p.
  22. Belyashov V.A. Ice interaction of propellers and development of ice load prediction method : Author's Cand. Sci. (Eng.) abstract : 05.08.01 / V.A. Belyashov ; Krylov Central Research Institute. St. Petersburg, 2000. 25 p. (in Russian).
  23. Propulsion machinery operating in ice – A modelling and simulation approach / D. Polić, S. Ehlers, V. Æsøy, E. Pedersen // Proceedings of the 27<sup>th</sup> Conference on Modelling and Simulation. Dudweiler : Digitaldruck Pirrot, 2013. P. 191–197. DOI: 10.7148/2013-0191.
  24. Propulsion shaft line ice-induced dynamic torque response calculation and comparison to full scale / A. Kinnunen, T. Turunen, P. Koskinen, J. Heinonen // Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'17). Red Hook : Curran, 2017. Vol. 2. P. POAC17-061, p. 1151–1158.
- 
- Сведения об авторе**  
Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.
- About the author**  
Kirill Ye. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Поступила / Received: 01.02.23  
Принята в печать / Accepted: 31.05.23  
© Сазонов К.Е., 2023