Теория корабля и строительная механика

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-1>
УДК 629.12.001.2

А.С. Ковров, В.В. Новиков

КОВРОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – инженер-технолог, kovrov.andrey@mail.ru

Дальневосточный завод «Звезда»

г. Большой Камень, Россия

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент

(автор, ответственный за переписку), SPIN: 7257-7822,

ScopusID: 5641710410, leka1551@rambler.ru

Политехнический институт (Школа)

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Расчетный анализ давлений на корпус танкера при ударах о льдину

Аннотация: Представлены примеры ледовых повреждений транспортных судов ледового класса при плавании во льдах и результаты расчета ударных нагрузок на корпус при столкновении танкера категории Ice3 и льдины с различным очертанием кромки. Приведены зависимости контактных давлений на борт в носовой оконечности, глубины смятия льда, времени соударения, протяженности линии соприкосновения корпуса и льдины при разной скорости судна, полученные с использованием расчетной методики строительной механики корабля. Впервые установлен значительный рост интенсивности контактных давлений льдины с угловой кромкой на борт при малом увеличении скорости танкера. По результатам 3D моделирования процесса удара льдины в корпус танкера выполнен анализ давлений на борт в средней части судна. Проведено сравнение значений интенсивности контактных давлений с расчетными регламентируемыми величинами в носовой оконечности и середине судна. Полученные результаты указывают на необходимость при проектировании ледовых усилений учитывать превышение нормируемых нагрузок для носовой оконечности в эксплуатационном диапазоне скоростного режима во льдах.

Ключевые слова: удар льдины, контактное давление, время соударения, интенсивность нагрузки

Введение

В ближайшем будущем ледокольный флот России пополнится не только современными ледоколами, но и грузовыми судами, предназначенными для эксплуатации в Арктике и северных широтах. Особая роль отводится развитию танкерного флота, который в настоящее время интенсивно строится для плавания в акватории Северного морского пути. Так, на верфи дальневосточного судостроительного комплекса «Звезда» заложено несколько танкеров «Афрамекс», один из которых с ледовым классом Ice-1A в мае 2020 г. уже спущен на воду.

Практика эксплуатации показывает, что на транспортных судах во время следования в канале за ледоколом при маневрировании и при столкновении с дрейфующими льдинами довольно часто возникают повреждения в виде гофрировок, вмятин, трещин и разрывов [1, 2, 7]. Они появляются и на судах, имеющих достаточно высокий ледовый класс (рис. 1) [13].

Подкрепления конструкций, устанавливаемых в соответствии с ледовой категорией судна, не всегда обеспечивают надежную защиту, что свидетельствует о необходимости уточнения рекомендуемых скоростей движения и расчетных контактных нагрузок на корпус при ударе его о лед.

Во льдах скорость движения танкеров ледового класса обычно не превышает 2–4 уз., проводка судов с ледоколами позволяет в некоторых случаях увеличить ее до экономически более выгодной – 10–12 уз. [1]. Однако при этих скоростях нагрузки от взаимодействия корпуса с дрейфующими льдинами, а также от отраженных ударов в канале за ледоколом могут быть предельно высокими [5].

Рис. 1. Повреждения судов, полученные при маневрировании в многолетних льдах и при взаимодействии с дрейфующими льдинами:

а – гофрировка наружной обшивки на танкере (дедвейт 16420 т; класс IA Super);

б – вмятины и бухтины на балкере (дедвейт 3900 т, класс IA Super);

в – разрывы наружной обшивки корпуса танкера ледового класса [13].

В России исследование ледовых нагрузок и прочности конструкций велось методами строительной механики корабля, 3D моделированием процесса удара и экспериментально. В [2–6, 8, 9 и др.] представлены методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус и принципы расчетов местной прочности при принятых допущениях. В [11, 12 и др.] отмечается необходимость обеспечения надлежащих ледовых качеств крупнотоннажных судов ледового плавания в связи с созданием в российской Арктике скоростной круглогодичной трассы. Однако при проектировании ледовых усилений конструкций необходимо знать и учитывать, как увеличивается интенсивность контактных давлений от столкновения со льдиной танкера, следующего в канале с более высокой скоростью, например 6–10 уз., когда это по условиям эксплуатации возможно. В [10] и, насколько нам известно, в других источниках не рассматриваются и не даются подобные рекомендации. Для решения такой важной для практики задачи требуются дополнительные исследования. Проблема заключается в сложном, зависящем от множества факторов процессе прохождения судном ледяного покрова, в частности в определении импульса соударения, расчетных нагрузок от ударов льда, векторов приложения сил в различных районах корпуса и т.д. [5, 8]. Известно также, что процесс и параметры удара зависят от физико-механических характеристик льда, которые могут существенно изменяться [1, 2, 5, 9 и др.]. В нашем исследовании оценка их влияния на изучаемые факторы не выполнялась.

Цель настоящей статьи – выяснить, как влияет скорость танкера ледового класса на величину контактных давлений при ударе о льдину с различным очертанием кромки, время соударения, глубину смятия льда, длину контакта соприкосновения и в конечном итоге – на ин-

тенсивность ледовой нагрузки в более уязвимой носовой части корпуса. Для этого нам необходимо решить следующие задачи. Определить допустимые регламентируемые ледовые нагрузки и сравнить их с расчетной интенсивностью. Определить также контактное давление в средней части судна и сопоставить с регламентируемой величиной интенсивности нагрузки в этом районе.

Прежде всего нам необходимо с помощью методов строительной механики корабля провести анализ ударного воздействия льдины с закругленной и угловой кромкой на борт в носовой оконечности при различной скорости танкера. А для средней части корпуса этот же анализ выполнить с помощью модуля Simulation SolidWorks при относительно небольших скоростях соударения корпуса со льдом. После чего сравнить расчетные контактные давления с ледовыми нагрузками, допускаемыми «Правилами...» Российского морского регистра [10].

Мы рассмотрим танкер с ледовой категорией Ice3 водоизмещением 11000 т.

Исследование ударных нагрузок на борт в носовой части танкера

Расчетные предпосылки. Численный анализ ударного взаимодействия корпуса со льдиной выполнен нами по зависимостям (см. [9]), основанным на рассмотрении кинетической энергии движущегося в направлении удара судна, которая включает работу сил смятия льда и потенциальную энергию деформации изгиба полубесконечной ледяной пластины в конце удара. В основу метода положено уравнение энергетического баланса, а весь процесс удара и разрушения льда рассматривается поэтапно. По этой схеме в районе контакта борта судна со льдом сначала происходит местное смятие верхней кромки льда, после чего ледяной покров разрушается от изгиба, вызываемого вертикальной составляющей контактного усилия (рис. 2). При этом величина разрушающего усилия зависит главным образом от толщины льда и угла наклона борта к вертикали, а также от свойств льда [9, с. 50].

Основные допущения, принятые при разработке этой методики, следующие: судно рассматривается как твердое тело; силы сопротивления воды, вызванные перемещениями судна и льдины во время удара, считаются малыми по сравнению с контактными усилиями; перемещения судна и льдины в процессе удара малы; податливость борта о льдину не учитывается, а удар судна о льдину считается неупругим, поскольку в процессе удара происходит дробление льда.

Рис. 2. Схема удара льдины о борт [9].

Нами в аналитических расчетах приняты следующие характеристики морского льда (см. [9]): предел прочности на изгиб $\sigma_p = 0,9$ МПа; предел прочности на смятие $\sigma_c = 4,0$ МПа; модуль нормальной упругости $E = 3 \cdot 10^9$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,34$; удельный вес $\gamma = 0,85$ т/м³.

При ударе льдины о борт происходит смятие льда и его разрушение, после чего давление P передается некоторое время t на корпус по линии контакта льдины b_0 . Соударение судна и льдины не является мгновенным. Соприкосновение длится хотя и малый, но конечный промежуток времени. Эти факторы зависят от массы, конфигурации и механических характеристик льда, формы корпуса, скорости движения судна и пр.

Проследим влияние отмеченных параметров на рассматриваемом примере удара корпуса танкера о льдину для двух случаев конфигурации льдины с учетом зависимостей, приведенных в [9, с. 35]:

для льдины с закругленной кромкой:

$$\zeta_{\max} = \left(\frac{5}{4} \frac{M_n \cdot v_n^2}{\sigma_c \cdot A} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{и} \quad P_{\max} = 1,14 (M_n \cdot v_n^2)^{\frac{3}{5}} \cdot (A \cdot \sigma_c)^{\frac{2}{5}}; \quad (1)$$

$$t^1 = 1,61 \cdot (A \cdot \sigma_c)^{-\frac{2}{5}} \cdot M_n^{\frac{2}{5}} \cdot v_n^{-\frac{1}{5}} \quad \text{и} \quad b_0 = 2 \sqrt{\frac{2R\zeta_{\max}}{\cos \beta}}; \quad (2)$$

для льдины с угловой кромкой:

$$\zeta_{\max} = 1,15 \left(\frac{M_n \cdot v_n^2}{\sigma_c \cdot A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{и} \quad P_{\max} = 1,31 (M_n \cdot v_n^2)^{\frac{2}{3}} \cdot (A \cdot \sigma_c)^{\frac{1}{3}}; \quad (3)$$

$$t_1 = 1,61 \cdot (A \cdot \sigma_c)^{-1/3} \cdot M_n^{1/3} \cdot v_n^{-1/3} \quad \text{и} \quad b_0 = \sqrt{\frac{\tan \varphi \cdot \zeta_{\max}}{\cos \beta}}. \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения:

M_n – приведенная масса системы соударяющихся корпуса судна и льдины; v – скорость движения судна; $\zeta_{\max}$ – максимальная глубина смятия льда при ударе; $P_{\max}$ – максимальное контактное усилие при ударе о льдину; β – угол наклона касательной к борту в точке удара по отношению к вертикали; A – коэффициент, зависящий от геометрических параметров судна и льдины; σ_c – предел прочности льда на смятие; R – радиус закругления кромки льдины; φ – угол заострения кромки льдины. Кроме того, в расчетах используются цилиндрическая жесткость льдины, ее масса и толщина.

Для данной расчетной схемы борт судна принимается абсолютно жестким, а податливость льда не учитывается. Пренебрежение упругими деформациями конструкций несколько завышает величину контактных усилий [4].

Анализ результатов. Расчеты контактных давлений, максимальной глубины смятия льда, длительности удара и протяженности участка соприкосновения борта со льдиной в носовом районе выполнялись по разработанной нами в Microsoft Excel программе. Результаты представлены ниже в таблице и на графиках.

Предварительный расчетный анализ показал, что увеличение массы льдины в 10 раз (например, от 100 до 1000 т) при движении судна со скоростью 4–8 уз. приводит к росту ударного давления в 3,6–4,1 раза и времени соударения в ~2,3 раза. В дальнейших расчетах нами приняты масса льдины 1000 т, а ее толщина – 1,0 м.

В табл. 1 приведены значения максимальных контактных давлений, возникающих в носовом районе танкера при ударе корпуса о льдину для двух случаев: когда разрушение льда происходит в результате смятия сразу, без изгиба, а также с изгибом ледяной пластины. Расчетные величины определены по зависимостям [9, с. 40] методом последовательных приближений с уточнением вводимых данных.

Ледяное поле при ударе корпуса судна сминается и, изгибаясь, разрушается. В зависимости от толщины льда степень его изгиба и, соответственно, ударные контактные усилия будут различными. Если лед разрушается без изгиба, величина $P_{\max}$ в носовой оконечности по результатам расчета оказывается несколько больше (на ~15%), чем при его изгибе. Для более тонкого льда с меньшей изгибной жесткостью контактные давления уменьшаются прямо пропорционально уменьшению его толщины.

По длине носовой части судна с изменением обводов изменяются углы наклона борта к вертикали β и наклона касательной к ватерлинии α в точке удара к ДП. Каждый из них в разной степени оказывает влияние на величину P_{max} . Однако в целом изменение контактных давлений в данном районе по длине для рассматриваемого корпуса оказывается незначительным.

Таблица 1

Контактное давление при ударе корпуса о льдину при скорости движения судна 4 уз.

Величины		Теоретический шпангоут, №		
		1	2	3
А – угол между касательной к ватерлинии в точке удара и ДП, град.		18	16	15
α_0 – угол между нормалью к борту в точке удара и направлением движения, град.		72	74	75
l_l – косинус α_0		0,31	0,28	0,25
β – угол наклона касательной к вертикали, град.		19	16	13
P_{max} – контактное давление при ударе, кН	с учетом изгиба льда	3,49	3,64	3,72
	смятие без изгиба	4,27	4,29	4,33

Графические зависимости (рисунки 3, 4) показывают, что с увеличением скорости судна в 2 раза максимальное контактное давление на корпус и глубина смятия льда в районе теоретического шпангоута № 1 в рассматриваемом диапазоне скоростного режима (от 4 до 8 уз.) возрастают приблизительно в 1,7–2,2 раза. При встрече судна со льдиной, у которой кромка закруглена, данные параметры оказываются более чем в 2 раза выше, чем для льда с заостренным очертанием кромки. В то же время продолжительность соударения для угловой кромки, наоборот, больше (в ~2,5 раза), хотя ее уменьшение с ростом скорости относительно невелико.

Рис. 3. Изменение контактных давлений P_{max} в районе теоретического шпангоута № 1 при движении судна: 1 – для льдины с закругленной кромкой; 2 – для льдины с угловой кромкой.

Рис. 4. Диаграмма изменения глубины смятия z_{max} и времени соударения t от скорости движения судна: 1 – для льдины с закругленной кромкой; 2 – для льдины с угловой кромкой.

Очевидно, что длина линии контакта с корпусом b_0 этой льдины меньше в несколько раз по сравнению со случаем, когда кромка льдины имеет закругленное очертание (рис. 5), а значит, и интенсивность контактного давления будет существенно больше. Несложно получить зависимость интенсивности давлений от скорости судна $P=P_{max}/b_0$ перестроением графика P_{max} (см. рис. 3) с учетом протяженности контакта льда с корпусом. Такая зависимость распределения интенсивности давления по длине (кН/м) для более опасного случая (льдина с угловой кромкой) носит линейный характер (рис. 6).

Рис. 5. Изменение протяженности линии контакта льда b_0 с корпусом во время удара при движении судна:
1 – для льдины с закругленной кромкой; 2 – для льдины с угловой кромкой.

Рис. 6. Интенсивность контактных давлений в районе теоретического шпангоута № 1 при столкновении движущегося танкера с льдиной (кромка льдины имеет угловую форму).

По «Правилам...» [10], расчетная интенсивность нагрузки в носовом районе А корпуса определяется по формуле (5) и для данного танкера составляет:

$$P_A = 2500 \cdot a_1 \cdot v_m \sqrt[6]{\frac{\Delta}{1000}} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ кПа}, \quad (5)$$

где a_1 – коэффициент давлений для данного ледового класса, 0,61; v_m – коэффициент формы корпуса, 0,7; Δ – водоизмещение судна, 11000 т.

Сравнение расчетного значения $P_A = 1,6 \cdot 10^3$ кПа с графической зависимостью интенсивности P возможно, если принимать, что ледовая нагрузка распределена по условной площади $f = 1 \text{ м} \cdot b_0$ (м²). В этом случае, как иллюстрирует график на рис. 6, интенсивность нагрузки при ударе корпуса о льдину толщиной 1 м превысит значения P_A при движении танкера со скоростью более 4 уз. Для рассматриваемого примера увеличение скорости хода судна на 2 уз. приводит к росту контактных давлений в носовом районе корпуса на ~25%.

Таким образом, при скорости танкера 8–10 уз. можно ожидать роста интенсивности ударного давления до $P=(2,6-2,7) \cdot 10^3$ кПа. Это превысит расчетную величину P_A [10] более чем в ~1,5 раза. Отмеченное обстоятельство указывает на необходимость при проектировании конструкций учитывать возможное превышение нормируемых ледовых нагрузок в эксплуатационном диапазоне скоростного режима.

3D моделирование процесса удара льдины о бортовое перекрытие

Исходные данные. Прежде всего мы должны рассмотреть взаимодействие бортового перекрытия при ударном контакте со льдом, дать оценку интенсивности давления на борт, сравнив ее с расчетными величинами, регламентируемыми «Правилами...» [10], и определить напряженное состояние перекрытия. Рассмотрим грузовой отсек танкера с двойным дном и бортами в средней части судна, в которой интенсивность ледовых нагрузок менее значительна по сравнению с носовой оконечностью (рис.7,а). Бортовое перекрытие в районе наружного борта имеет поперечную систему набора, а внутренний борт набран по продольной. Между бортами установлены рамные шпангоуты, диафрагмы и стрингеры (рис. 7,б).

Решение задачи осуществляется с помощью модуля Simulation SolidWorks как нелинейное динамическое исследование. При моделировании удар корпуса о льдину считается упругопластичным, поскольку в процессе удара происходит смятие кромки льда и деформация конструкций [4]. Судно рассматривается как податливое упругопластичное твердое тело управляемой жесткости. Условия перемещения льдины определены направлением, перпендикулярным к борту. Задача расчета состоит в определении силы реакции, приложенной к перекрытию со стороны льда, ударного импульса и напряженно-деформированного состояния связей конструкции.

Рис. 7. Модели:
а – грузового танка, б – бортовой секции
(здесь настил второго борта скрыт).

На величину напряжений и деформаций в конструкции оказывают влияние параметры и характеристики льдины, размеры зоны контакта, а также скорость соударения судна о лед. На данном этапе исследования нами выбрана льдина в виде параллелепипеда со скоростью движения 4 уз. и приняты для расчета параметры и величины, представленные в табл. 2.

Сборка 3D модели осуществлена путем создания взаимосвязей между соответствующими конструктивными элементами отсека и льдины. Сетка системы «перекрытие–льдина» показана на рис. 8. Характеристики ее следующие: сетка на твердом теле; качество высокое; принятые размеры элемента (см. табл. 2) обеспечивают приемлемые продолжительность и точность расчетов [4].

Таблица 2

Основные расчетные данные

Характеристика	Значение	Размерность
Габаритные размеры секции (длина × высота × ширина двойного борта)	4200 × 8992 × 1000	мм × мм × мм
Масса секции перекрытия	10526	кг
Габаритные размеры льдины (длина × ширина × высота)	4200 × 2000 × 600	мм × мм × мм
Толщина (высота) льда	600	мм
Масса льдины	4586	кг
Скорость движения льдины	4 (2,06)	уз. (м/с)
Плотность льда	910	кг/м ³
Коэффициент демпфирования, α	0,02	—
Коэффициент демпфирования, β	0,05	—
Рассматриваемое время удара	0,5	с
Число итераций сходимости	20	—
Размер элемента сетки	65,12 × 325,60	мм × мм

Рис. 8. Сетка системы тел исследования (секции бортового перекрытия и льдины).

Расчетный анализ. Основными параметрами, определяющими процесс удара, являются продолжительность, амплитуда и форма ударного импульса. От крутизны фронта и среза графика зависимости ударной нагрузки от времени зависит «жесткость» удара. Максимальная результирующая сила, приложенная к бортовому перекрытию со стороны льда, достигает значения $F = 4,8 \cdot 10^5$ Н в момент ударного импульса 0,05 с, а затем медленно уменьшается. Продолжительность контактного импульса в данном случае составляет 0,40 с, а удар льдины представляется достаточно жестким (рис. 9).

Для рассматриваемой льдины интенсивность распределения давлений по площади контакта с бортом при ударе составляет $P = 190$ кПа.

По «Правилам...» [10], расчетная интенсивность нагрузки в средней части судна для района В может быть вычислена по формуле (6) и равна:

$$P_B = 1200 \cdot a_3 \cdot \sqrt[6]{\frac{\Delta}{1000}} = 590 \text{ кПа.} \quad (6)$$

Рис. 9. Нелинейное исследование силы реакции на борт в зависимости от времени соударения корпуса и льдины.

Таким образом, интенсивность нагрузки, определенная для рассматриваемого варианта взаимодействия судна со льдиной, существенно меньше рекомендуемой.

Напряжения в бортовом стрингере по результатам зондирования определены в узлах, как показано на рис. 10. Наиболее напряженным является узел пересечения стрингера с крайним шпангоутом рассматриваемой секции перекрытия, который находится в районе грузовой ватерлинии судна (рис. 11).

Рис. 10. Зондирование бортового стрингера в районе удара.

На рис. 12 представлена картина изменения нормальных изгибных напряжений по кромкам поясков основных шпангоутов и диафрагм двойного борта, в которых они достигают наибольших величин. Максимальные напряжения при ударе возникают в момент времени, равный ~0,05 с, когда контактное давление возрастает до наибольшего значения. Как в стрингере, так и в шпангоутах величина максимальных нормальных напряжений мала: в стрингере – $1,7 \cdot 10^7$ Н/м²; в шпангоуте – $1,34 \cdot 10^7$ Н/м².

Рис. 11. Нелинейное исследование напряжений в узловых точках стрингера: максимальные напряжения образуются в узле пересечения стрингера со шпангоутом (см. рис.10, узел 82974).

Рис. 12. Нелинейное исследование напряжений в поясах шпангоутов и диафрагм двойного борта. Шаг эпюры – 2, время – 005 с.

На рисунках 13 и 14 отображена графическая интерпретация напряжений и перемещений конструкции борта. Напряжения в бортовом перекрытии и перемещения конструкции при ударе лдины невелики. Максимальные напряжения в элементах связей в районе грузовой ватерлинии судна составляют не более $2 \cdot 10^7$ Н/м², а деформации незначительны.

Рис. 13. Напряжения в бортовом перекрытии при ударе о лдину.

Рис. 14. Перемещения конструкции в сборке.

Таким образом, можно заключить, что для грузового отсека в средней части танкера удар льдины о борт (массой $\sim 4,6 \cdot 10^3$ кг, в форме параллелепипеда, при скорости соударения ~ 2 м/с) в районе грузовой ватерлинии не вызывает значительных изменений в напряженно-деформированном состоянии перекрытия. Интенсивность контактного давления при этом оказывается меньше (по крайней мере в 3 раза) регламентированной «Правилами...» [10] величины для рассматриваемого танкера с ледовой категорией Ice3, а максимальные напряжения не превышают предела текучести материала.

При ударе льдины с выраженным угловым очертанием кромки о корпус судна возможны некоторый рост интенсивности давлений на перекрытие и перераспределение напряжений в связи с увеличением импульса ударного воздействия и уменьшением протяженности контакта, что требует проведения дальнейшего исследования.

Заключение

Проведенное нами исследование показало, как изменяются контактное давление, глубина смятия льда и время соударения в носовой оконечности движущегося во льдах танкера при столкновении корпуса со льдиной. Выявлен существенный рост интенсивности ледовых нагрузок при относительно небольшом увеличении скорости движения судна и ударах корпуса о льдину с угловой кромкой. Это обстоятельство указывает на то, что в расчетах прочности и при проектировании ледовых усилений необходимо учитывать превышение нормируемых нагрузок для носовой оконечности в эксплуатационном диапазоне скоростного режима во льдах.

По результатам анализа напряженного состояния бортового перекрытия путем 3D моделирования установлено, что величина контактного давления от удара льдины с прямоугольными очертаниями кромки о борт в средней части танкера в районе грузовой ватерлинии при скорости соударения 4 уз. не превышает интенсивности нагрузок, регламентированных Правилами Российского морского регистра судоходства для ледовой категории Ice3, а напряжения и деформации в элементах перекрытия незначительны.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абоносимов В.И. Искусство ледового плавания. Владивосток: Приморский полиграфкомбинат, 2002. 798 с.
2. Апполонов Е.М. Предельная прочность арктических судов: СПб.: Крыловский гос. науч. центр, 2014. 244 с.
3. Бугаев В.Г., Новиков В.В., Молоков К.А., Славгородская Д.В. Численный анализ ударных давлений на борт при движении судна во льдах // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т.1, № 2(48). С. 47–55.
4. Бугаев В.Г., Славгородская Д.В. Анализ прочности корпуса судна при ударе об лед // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1, № 3(41). С. 62–68.
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов: монография. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с.
6. Лобанов В.А. Оценка местной ледовой прочности корпуса судна численными методами // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2010. № 3. С. 1–9. URL: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/lobanov4.pdf> (дата обращения: 15.06.2020).
7. Новиков В.В., Турмов Г.П., Суров О.Э., Герман А.П., Молоков К.А., Китаев М.В. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федеральн. ун-та, 2020. 266 с.
8. Платонов В.В., Тряскин В.Н. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4(36). С. 83–98.
9. Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Л.: Судостроение, 1967. 222 с.
10. Правила классификации и постройки морских судов // Российский морской регистр судоходства. СПб., 2020. 215 с.
11. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных судов в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3. С. 103–110. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110
12. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
13. Banda V., Goerlandt F., Montewka J., Kujala P. Winter navigation at the Baltic Sea: An analysis of accidents occurred during winters 2002–2003 & 2009–2013. Finland, Espoo, Aalto Univ., Department of Applied Mechanics. Nowakowski et al. Safety and Reliability: methodology and application. L., CRC Press, 2015, p. 83–92.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45

Theory of the Ship and Construction Mechanics

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-1>

Kovrov A., Novikov V.

ANDREY KOVROV, Engineer-technologist, kovrov.andrey@mail.ru

Far East Shipyard Zvezda

Bolshoi Kamen, Russia

VALERY NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, (corresponding author), ScopusID: 5641710410, leka1551@rambler.ru

Polytechnic Institute, *Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

Calculation Analysis of Pressure on the Tanker Hull during the Impacts with an Ice Floe

Abstract: At present paper the examples of ice-class vessels damages and the results of dynamic loads calculation applied to the hull of a tanker ship with Ice3 class and floe ice with different edge contours are presented.

The dependences of contact pressures on the bow part of the vessel, floe ice destruction depth, contact time and area for different speed were obtained with the structural mechanics of the ship methods.

Modelling results show a significant increasing the contact pressure intensity of an ice floe with a corner edge on to the vessel hull with the increasing the tanker speed. The 3D numerical model was used for dynamics pressure assessment on the middle part of the vessel.

A comparison of contact pressure calculated values with the regulated values for bow and middle parts of the vessel was carried out. The obtained results show the necessity to take into account the exceedance of regulated loads to the bow part of the vessel in actual speed range during the ice navigation conditions.

Keywords: ice floe impact, contact pressure, impact time, load intensity

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 22.06.2020; *reviewed:* 07.09.2020; *accepted:* 22.09.2020; *financing:* Far Eastern Federal University.

REFERENCES

1. Abonosimov V.I. The art of ice swimming. Vladivostok, Primorsky Polygraph Plant, 2002. 798 p.
2. Appolonov E.M. Ultimate strength of arctic vessels: SPb., Krylovsky State Scientific Center, 2014. 244 p.
3. Bugaev V.G., Novikov V.V., Molokov K.A., Slavgorodskaya D.V. Numerical analysis of the shock pressures on board when the vessel moves in ice. *Marine Intelligent Technologies*. 2020;1(48):47–55.
4. Bugaev V.G., Slavgorodskaya D.V. Analysis of the strength of the ship's hull upon impact on ice. *Marine Intelligent Technologies*. 2018;1(41):62–68.
5. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Designing icebreakers: monograph. SPb., Shipbuilding, 2013, 512 p.
6. Lobanov V.A. Estimation of local ice strength of the ship's hull by numerical methods. *Electronic journal. Differential equations and control processes*. 2010;3:1–9. URL: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/lobanov4.pdf> – 15.06.2020.
7. Novikov V.V., Turmov G.P., Surov O.E., German A.P., Molokov K.A., Kitaev M.V. Damage and computational analysis of the strength of ship structures, monograph. Vladivostok, Publishing House of the Far East Federal University, 2020, 266 p.
8. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodological foundations for determining the design ice loads on the hull of modern ice navigation vessels in the bow and stern areas. *Arctic: Ecology and Economics*. 2019(36):83–98.
9. Popov Yu.N., Faddeev O.V., Kheisin D.E., Yakovlev A.A. The strength of ships sailing in ice. L., Sudostroenie, 1967, 222 p.
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Russian Maritime Register of Shipping. SPb., 2020, 215 p.
11. Pustoshny A.V., Sazonov K.E. Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round arctic operations. *The Arctic: Ecology and Economy*. 2017(27):103–110. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110
12. Sazonov K.E. Theoretical foundations of navigation of ships in ice. SPb., 2010, 274 p.
13. Banda V., Goerlandt F., Montewka J., Kujala P. Winter navigation at the Baltic Sea: An analysis of accidents occurred during winters 2002–2003 & 2009–2013. Finland, Espoo, Aalto Univ., Department of Applied Mechanics. Nowakowski et al. Safety and Reliability: methodology and application. L., CRC Press, 2015, p. 83–92.