Проектирование и конструкция судов

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-7>
УДК 129.12

А.Н. Печеркин, В.В. Новиков, Н.П. Васильченко

ПЕЧЕРКИН АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ – магистрант, e-mail: smexozavr@mail.ru

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, AuthorID: 1036802,

SPIN-код: 7257-7822; ScopusID 5641710410, e-mail: Leka1551@rambler.ru

Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы

ВАСИЛЬЧЕНКО НАТАЛЬЯ ПЕТРОВНА – к.т.н., доцент, e-mail: sopromama@mail.ru

Кафедра механики и математического моделирования Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Напряженное состояние бортовых перекрытий при ледовом воздействии

Аннотация: Выполнен анализ напряженного состояния бортовых перекрытий однопалубных судов различной конструкции при сжатии корпуса ледовым полем разной толщины при разной осадке. Перекрытие малого рейдового судна без ледовых подкреплений и арктического буксира категории Arc4 рассчитывались с использованием программного комплекса Solid-Works и аналитически. Сопоставительный анализ показал, что напряжения в элементах конструкций в значительной степени зависят от места приложения нагрузки и могут достигать больших значений, увеличение толщины льда на 20 см приводит к росту максимальных напряжений в шпангоутах почти в 2 раза, а увеличение толщины в 3 раза – в несколько раз.

При расчете аналитическим методом и тестировании 3D модели выявлено достаточно высокое совпадение результатов; их относительная погрешность для рассмотренных вариантов в основном не превышает 5%. Результаты исследования напряженного состояния элементов перекрытий при ледовом воздействии могут быть использованы при проектировании подобных конструкций, а также при решении оптимизационных задач по выбору их элементов.

Ключевые слова: бортовое перекрытие, ледовое сжатие, напряженно-деформированное состояние, 3D модель, интенсивность нагрузки, расчетный анализ.

Введение

Оценка напряженного состояния и прочности судовых конструкций при ледовом воздействии может выполняться различными способами [1, 3–5 и др.]. Выбор метода расчета зависит от поставленной задачи и сложности конструкций бортового перекрытия. В некоторых случаях проще выполнять оценку влияния на напряжения изменения характеристик элементов конструкции аналитическими методами строительной механики корабля, в других – более приемлемы методы конечно-элементного анализа, позволяющие эффективно решать оптимизационные задачи.

Любой расчет прочности предполагает идеализацию конструкций и создание исследуемой расчетной модели, отличающейся от реальной. Это предопределяет получение некоторой погрешности в расчетах, которую необходимо оценивать и учитывать при проектировании. В этой связи представляет практический интерес сопоставительный анализ напря-

женного состояния, проведенный в соответствии с методиками расчета перекрытий, например [5, 8], и использованием современных программных продуктов SolidWorks Simulation.

Цель статьи – анализ напряженно-деформированного состояния различных по конструкции бортовых перекрытий судов при сжатии корпуса льдом разной толщины и сопоставление результатов расчетов, выполненных классическими методами строительной механики корабля и путем конечно-элементного анализа: тестирования 3D моделей.

Мы рассмотрели два типа разных по конструкции бортовых перекрытий однопалубных судов: малого рейдового судна без ледовых усилений, которое случайно может оказаться в зоне ледового поля, и буксира арктического плавания с категорией Arc4. Перекрытия конструктивно набраны по Правилам РМРС и представляют собой монотонную поперечную систему набора со стрингером у рейдового судна, а у буксира – рамную конструкцию с несущим стрингером и обыкновенными шпангоутами [6].

Анализ напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия рейдового судна

Расчет перекрытия однопалубного судна с равноотстоящими шпангоутами и бортовым стрингером выполнен в программном комплексе SolidWorks и аналитически. Алгоритмы, расчетная схема и последовательность аналитического расчета для подобной конструкции перекрытия приведены достаточно подробно в [5, п. 20], а также в [3, формулы (2)–(5)]. Общий вид разработанной расчетной 3D модели и ее поперечное сечение показаны на рис. 1 и рис. 2.

Рис. 1. Конструкция бортового перекрытия рейдового судна.

Рис. 2. Поперечное сечение модели.

Величина давления, действующего на борт судна, зависит от толщины ледового поля и приближенно может быть определена по известной формуле [5]:

$$q = 0,62 \cdot 10^3 \cdot h \cdot \sqrt{h}, \quad (1)$$

где h – толщина соленого льда при сжатии (м).

В расчете нагрузка на борт при ледовом сжатии прикладывалась в двух вариантах: в районе стрингера (рис. 3) и посередине пролета между стрингером и скулой днища.

Рис. 3. Ледовая нагрузка на борт судна приложена в районе стрингера.

Данное судно не предназначено для эксплуатации в ледовых условиях, однако представляет интерес анализ напряженного состояния перекрытия при случайном воздействии ледового поля. Интенсивность ледовой нагрузки в расчетах принята постоянной и равной $q = 10$ т/м, что соответствует толщине льда $\sim 0,25$ м.

Основные исходные данные: расстояние между переборками отсека $L = 5,4$ м; шпация $s = 0,6$ м; длина шпангоута $l = 0,895$ м; длина бимса $l_b = 0,605$ м; момент сопротивления поперечного сечения бимса $W_b = 19,4$ см³; момент сопротивления поперечного сечения стрингера $W_s = 555$ см³; момент сопротивления поперечного сечения шпангоута $W_0 = 32,68$ см³.

Сопоставление результатов расчета конструкции в программном комплексе SolidWorks проведено по точкам, в которых осуществлялось определение напряженного состояния при аналитическом расчете.

На рис. 4 показано распределение напряжений в конструкции бортового перекрытия для случая приложения нагрузки в плоскости стрингера. Очевидно, что максимальные напряжения в 3D модели равны 210,73 МПа.

По данным аналитического расчета (который здесь не приводится) напряжения оказались равными 207,7 МПа, т.е. относительная погрешность в расчетах составляет $\approx 1,4\%$.

В случае приложения ледовой нагрузки в середине пролета шпангоута между стрингером и скулой днища (рис. 5) картина деформаций перекрытия существенно изменяется, максимальные напряжения от изгиба стрингера в середине пролета малы и составляют 9,5 МПа (рис. 6). Напряжения, определенные аналитическим путем, равны 9,76 МПа. Относительная погрешность в сравнении расчетов составляет 2,5%.

Рис. 4. Общий вид распределения напряжений по конструкции в деформированном виде при приложении ледовой нагрузки к стрингеру.

Рис. 5. Общий вид распределения напряжений по конструкции в деформированном виде при приложении ледовой нагрузки в середине пролета между стрингером и заделкой шпангоута на флоре.

Рис. 6. К определению максимальных напряжений от изгиба стрингера в середине пролета.

Рисунок 7 иллюстрирует напряженное состояние шпангоута для случая приложения ледового давления к стрингеру. Максимальные напряжения в пролете шпангоута составляют 99,3 МПа. По результатам численного расчета наибольшие напряжения равны 95,7 МПа, относительная погрешность – 3,6%.

В случае приложения ледового давления в пролете шпангоута между стрингером и днищем (рис. 8) напряжения в пролете шпангоута оказываются чрезмерно большими и составляют 556,0 МПа, что значительно превосходит предел текучести. По результатам аналитического расчета напряжения равны 616,1 МПа. Разница в величинах максимальных напряжений в численном расчете и расчете прочности 3D модели составляет 9,76%.

Рис. 7. К определению напряжений в середине пролета шпангоута для случая приложения нагрузки к стрингеру.

Рис. 8. Максимальные напряжения от изгиба шпангоута при приложении ледовой нагрузки в середине пролета между стрингером и днищем.

Достаточно большие величины напряжений в сечениях шпангоута объясняются тем, что рассматриваемая конструкция бортового перекрытия не предназначена для восприятия ледовых воздействий и эксплуатации данного судна в ледовых условиях.

Выполненные расчеты и анализ прочности элементов бортового перекрытия рассматриваемого судна позволяют заключить следующее.

Наибольшие напряжения в пролете шпангоута между жесткими связями возникают в том случае, когда к этому месту приложена ледовая нагрузка. При увеличении осадки судна и, соответственно, перемещении нагрузки по борту к стрингеру вверх напряжения в середине пролета уменьшаются. Одновременно увеличиваются опорные изгибающие моменты и напряжения в районе двойного дна.

При расчете аналитическим методом и расчете прочности 3D модели была выявлена достаточно высокая корреляция результатов, относительная погрешность которых в основном не превышает 5%. Исключение составил случай сжатия корпуса льдом между стрингером и днищем, при котором погрешность составила более 9%.

Уменьшение напряжений в элементах перекрытия при ледовом воздействии для рассматриваемого судна можно достичь изменением осадки путем баллаستировки и удифферентовки судна таким образом, чтобы давление льда осуществлялось в районе стрингера.

Анализ напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия арктического буксира

Для бортового перекрытия буксира с ледовыми усилениями, соответствующими ледовой категории Arc4, предусмотрены рамные, обыкновенные шпангоуты и несущий стрингер (рис. 9).

Рис. 9. Конструкция корпуса буксира.

Основные исходные данные: $L = 3,3$ м – длина перекрытия между поперечными переборками; $L_1 = 1,65$ м – расстояние между рамными шпангоутами или шпангоутом и переборкой; $l = 4,1$ м – длина шпангоутов; $s = 0,55$ м – расстояние между шпангоутами; $W_C = 555$ см³ – момент сопротивления сечения стрингера; $W_P = 555$ см³ – момент сопротивления сечения рамного шпангоута; $W_o = 188$ см³ – момент сопротивления сечения обыкновенного шпангоута.

Распределенная нагрузка от давления льда прикладывалась в районе стрингера (рис. 10) и в пролете борта между стрингером и днищевым перекрытием. Были рассмотрены три варианта значений интенсивности нагрузки, зависящей от толщины ледового поля (табл. 1).

Рис. 10. Расчетная схема закрепления в SolidWorks и ледовая нагрузка на борт в районе стрингера.

Таблица 1

Толщина ледового поля и интенсивность нагрузки

Толщина льда h_i , м	0,40	0,50	0,60
Нагрузка q_i , т/м	15,68	21,92	28,81

При выборе расчетной схемы 3D модели важным является установление вида закрепления и жесткости заделки, так как это оказывает влияние на характер ее напряженно-деформированного состояния*. Принятая схема закрепления модели в программе SolidWorks и ледовых нагрузок в районе бортового стрингера показана на рис. 10, а напряженно-деформированное состояние перекрытия и шкала напряжений в сечениях обыкновенного шпангоута – на рис. 11.

Рис. 11. Напряженно-деформированное состояние конструкций перекрытия при давлении льда на борт в районе стрингера.

*Ранее исследование в этом плане проводилось нашими коллегами: см. публикацию: URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/2-39/6/> (дата обращения: 01.07.2019).

Во втором случае нагружения бортового перекрытия, когда давление льда осуществляется в пролете шпангоута между стрингером и днищем, нормальные напряжения по величине оказываются в ~9 раз больше напряжений, возникающих при ледовом сжатии в районе стрингера (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные напряжения в сечениях шпангоутов

Толщина льда, м	h=0,4	h=0,5	h=0,6
σ_1 , МПа (нагрузка приложена в плоскости стрингера)	20,69	28,93	38,05
σ_2 , МПа (нагрузка приложена в пролете между стрингером и днищем)	187,79	262,43	344,98
σ_{sw1}^0 , МПа (нагрузка приложена в плоскости стрингера)	21,32	27,47	35,76
σ_{sw2}^0 , МПа (нагрузка приложена в пролете между стрингером и днищем)	178,21	246,67	327,51

Для иллюстрации влияния эксплуатационных толщин ледового поля на напряженность шпангоутов на рис. 12 представлен график изменения нормальных напряжений (отнесенных к пределу текучести) для рассмотренных случаев приложения ледовой нагрузки. График показывает, что при увеличении толщины льда в 3 раза напряженность шпангоутов перекрытия увеличивается почти в 5 раз.

Рис. 12. Зависимости напряженности шпангоута от толщины льда:
 σ_1 – напряжения при действии нагрузки в плоскости стрингера; σ_2 – напряжения при действии нагрузки пролете между стрингером и днищем.

При эксплуатации судна в ледовых условиях максимальные напряжения в шпангоутах не достигают предела текучести, так как конструкция корпуса буксира, спроектированная на категорию Arc4, удовлетворяет соответствующим условиям ледового плавания. Толщина льда, при которой напряжение принимает максимально допустимое значение, $h = 0,34$ м.

В любых случаях для уменьшения напряженности несущий стрингер необходимо располагать в районе эксплуатационных ватерлиний судна.

Сопоставление результатов расчетов по Solid Works и аналитическим способом показывает, что разница в величинах напряжений для рассмотренных вариантов составляет ~5%. Напряжения, полученные аналитическим методом, незначительно превышают напряжения при расчете 3D модели.

Заключение

В данном исследовании проведен анализ напряженно-деформированного состояния различных по конструкции бортовых перекрытий судов при сжатии корпуса льдом разной толщины. Рассматривались бортовое перекрытие рейдового судна без ледовых усилений и буксира арктического плавания. Для обеих конструкций ледовая нагрузка прикладывалась в разных районах по высоте борта. Расчетный анализ, проведенный классическими методами строительной механики корабля и с использованием программного комплекса SolidWorks, позволил установить следующее:

- наибольшие напряжения в пролете шпангоута между жесткими связями возникают в том случае, когда к этому месту приложена ледовая нагрузка. При увеличении осадки судна и, соответственно, перемещении нагрузки по борту к стрингеру напряжения уменьшаются. Одновременно увеличиваются опорные изгибающие моменты и напряжения в районе двойного дна;

- для судна без ледовых усилений, которое может случайно оказаться во льдах, напряжения в элементах перекрытия могут значительно превосходить по величине предел текучести стали;

- для буксира с ледовой категорией Arc4 при увеличении толщины ледового поля на 20 см максимальные напряжения в шпангоутах возрастают почти в 2 раза, а при увеличении толщины льда в 3 раза напряженность увеличивается в несколько раз. Если давление льда осуществляется в районе стрингера, напряжения оказываются в ~9 раз меньше напряжений в случае, когда нагрузка приложена в пролете шпангоута;

- разносящие нагрузку стрингеры для снижения напряжений необходимо располагать в районе эксплуатационной ватерлинии судна;

- при расчете прочности 3D модели и аналитически было выявлено достаточно высокое совпадение результатов: их относительная погрешность для рассмотренных конструкций и вариантов эксплуатации в основном не превышает ~5%;

- результаты исследования напряженного состояния элементов перекрытий при ледовом воздействии могут быть учтены и использованы при проектировании подобных конструкций, а также при решении оптимизационных задач по выбору элементов корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апполонов Е.М. Предельная прочность арктических судов: СПб.: Крыловский гос. науч. центр, 2014. 244 с.
2. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах. СПб.: Научн.-техн. сб. РМРС. 2008. Вып. 31. С. 129–146.
3. Караваев Е.С., Китаев М.В., Новиков В.В., Антоненко С.В. Прочность бортового набора судна при действии ледовой нагрузки // Полярная механика: материалы третьей междунар. конф., 27–30 сент. 2016, Владивосток / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. 1 CD. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 439–449.
4. Лобанов В.А. Оценка местной ледовой прочности корпуса судна численными методами // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2010. № 3. URL: <http://diffjournal.srbu.ru/RU/numbers/2010.3/article.1.1.html> (дата обращения: 01.07.2019).
5. Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Л.: Судостроение, 1967. 222 с.
6. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. Морской регистр России. СПб., 2018.
7. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
8. Справочник по строительной механике корабля: в 3-х т. Л.: Судостроение, 1982.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-7>

Pecherkin A., Novikov V., Vasilchenko N.

ALEXANDR PECHERKIN, MS Student, e-mail: smexozavr@mail.ru

VALERIY NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: Leka1551@rambler.ru

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering

NATALIA VASILCHENKO, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: sopromama@mail.ru

Department of Mechanics and Mathematical Modeling, School of Engineering,

Far Eastern Federal University

Sukhanova St., 8, Vladivostok, Russia, 690091

The stress state of the ship's side frames under ice exposure

Abstract: The authors performed the stress state analysis of the side frames of single-deck vessels of various designs under compression of the hull by different thickness ice fields, and under different draft of the vessels. The frame system of a small ship without ice reinforcement and an Arc4 category Arctic tug boat were designed and calculated by using the SolidWorks software package and analytical methods. Comparative analysis showed that the stresses in the structural elements largely depend on the place of application of the load and can reach high values. An increase in ice thickness of 20 cm leads to an almost 2 times increase in the maximum stresses in the frames, while a 3 times increase in the thickness leads to a several times increase in the stress.

Calculations by using an analytical method and testing a 3D model revealed a fairly high coincidence in the results; their relative accuracy for the considered options generally does not exceed 5%. The results of the study of the stress state of the elements of the ship's side framing system under ice exposure can be used in the design of such structures, as well as in solving optimization problems when choosing their elements.

Keywords: ship's side frames, ice compression, stress-strain state, 3D model, load intensity, calculated analysis.

REFERENCES

1. Appolonov E.M. The ultimate strength of Arctic ships: SPb., Krylov State Research Center, 2014, 244 p.
2. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.Ya. Regulation of ice loads on a vertical board under compression in ice. SPb., 2008, vol. 31, p. 129–146.
3. Karavaev E.S., Kitaev M.V., Novikov V.V., Antonenko S.V. The strength of the onboard set of the vessel under the action of ice load. Materials for the 3rd Intern. Conf. *Polar Mechanics-2016*. Vladivostok, FEFU, 2016, p. 439–449.
4. Lobanov V.A. Evaluation of local ice strength of the hull of the vessel by numerical methods. Differential equations and control processes. 2010;3. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/RU/-numbers/2010.3/article.1.1.html> – 01.07.2019.
5. Popov Yu.N., Faddeev O.V., Heisin D.E., Yakovlev A.A. Strength of vessels navigating in ice. L., Shipbuilding, 1967, 222 p.
6. Rules for the classification and construction of high-speed vessels. Maritime Register of Russia. SPb., 2018.
7. Sazonov K.E. The theoretical basis of navigation in ice. SPb., Central Research Institute named after Acad. A.N. Krylov, 2010, 274 p.
8. Reference book on structural mechanics of a ship: in 3 vols. L., Shipbuilding, 1982.