

АНАЛИЗ АЙСБЕРГОВОЙ ОПАСНОСТИ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОВОЗОВ

В. М. Шапошников, А. В. Александров, Р. А. Матанцев, О. Д. Ивановская
ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2016 г.

Поднимается вопрос об опасности соударения судна с айсбергом при движении по Северному морскому пути (СМП). Рассматриваются оба источника рисков для судна: столкновения с айсбергом и получения серьезных повреждений при ударе об айсберг. Показано, что вероятность столкновения судна с айсбергом на трассах СМП достаточно высока. Предотвращение опасных последствий аварии должно быть основано на анализе аварийной прочности, включающего в себя как экспериментальные исследования, так и компьютерное моделирование.

Ключевые слова: аварийная прочность, ледовые нагрузки, айсберги, айсберговая опасность, Северный морской путь.

Введение

Развитие Северного морского пути (СМП) и освоение арктических территорий — одна из стратегических задач современной России. Он позволяет эффективно доставлять грузы с одной части евразийского континента на другой. Однако регулярное движение по этому пути связано с повышенными рисками столкновений с массивными ледовыми образованиями.

Одним из потенциальных источников опасности для судов являются айсберги. Столкновение с айсбергами является причиной гибели нескольких судов (например, «Титаник», «Нина Сагайдак») и представляет актуальную задачу анализа аварийной прочности. Поставленная задача может быть решена с использованием анализа опасности столкновения судна с айсбергом.

Обзор систем обнаружения айсбергов

Для обнаружения различных типов айсбергов при навигации в северных морях в первую очередь может использоваться штатное судовое оборудование, в частности радиолокационные станции. Согласно требованиям Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74) современные транспортные суда должны иметь хотя бы одну радиолокационную станцию (РЛС), обеспечивающую работу в диапазоне 9 ГГц. С помощью системы РЛС производится обнаружение айсбергов по пути следования судна.

Хотя радиолокационный метод обнаружения айсбергов применяется весьма широко, он не вполне надежен. Интенсивность отражения сигнала от многих айсбергов вдвое меньше, чем от участка суши или судна тех же размеров. Дальность обнаружения айсбергов судовыми РЛС также существенно зависит от формы объектов. В табл. 1 приведена приблизительная дальность обнаружения штатными судовыми РЛС для айсбергов различных типов при различных условиях. Идентификация опасных ледяных образований, в том числе айсбергов, непосредственно включенных в ледяной покров, весьма затруднительна и в ряде случаев становится невозможной ввиду того, что на расстоянии как айсберг, так и торос могут давать одинаковый сигнал на экране радара.

Если исходить из приведенного анализа, наиболее опасными ледяными образованиями могут быть признаны куски айсбергов, которые сложно детектировать известными системами обнаружения. Характерная дальность обнаружения для них составляет порядка 2—3 миль, что ограничивает маневровые мероприятия по предотвращению соударения.

Помимо РЛС надежным способом обнаружения айсбергов в открытом море является наблюдение со спутников и самолетов. При современном развитии техники спутники в состоянии обнаружить айсберги меньше 100 м длиной. Но если такой айсберг распадается на несколько частей размером 10, 20

Таблица 1. Таблица радиолокационной дальности обнаружения айсбергов [1]

Форма айсбергов	Сила ветра		
	Штиль	Достаточная для образования волны в I—IV балла	Достаточная для образования волны в V—IX баллов
Столообразные	Могут обнаруживаться на расстоянии до 15 миль		
Наклонные	Могут обнаруживаться на расстоянии до 12 миль, с некоторых направлений не более 3 миль		
Пирамидальные	Могут обнаруживаться на расстоянии до 8 миль		
Обломки айсбергов (выступают не менее чем на 1 м, но не более 5 м)	Обнаруживаются на расстоянии до 7 миль, но трудноотличимы от несяков и стамух	Обнаруживаются на расстоянии до 5 миль	Обнаруживаются на расстоянии до 3 миль
Куски айсбергов (выступают менее чем на 1 м)	Обнаруживаются на расстоянии 2—3 миль, но трудноотличимы от несяков и стамух	Обнаруживаются на расстоянии не более 2 миль, а при волнении больше VI—VII баллов не обнаруживаются	

или 50 м, то их обнаружение становится проблематичным. В настоящее время существуют технологии, позволяющие с помощью спутниковых снимков обнаружить айсберги не только на чистой воде, но и в ледяном покрове.

Перспективным средством обнаружения айсбергов являются тепловизионные камеры, которые, по заявлениям производителя одной из таких систем [2], позволяют фиксировать малые объекты размером до 2,5 м на расстоянии свыше 2 км (более 1 морской мили).

Районирование СМП с точки зрения айсберговой активности

Наибольшее количество айсбергов среди арктических островов дает архипелаг Шпицберген. Ежегодная продукция его выводных ледников оценивается сегодня в 5 км³. Это больше, чем дают все другие арктические острова вместе взятые (острова Новая Земля (2 км³ в год), архипелаг Земля Франца-Иосифа (1,5 км³ в год) и др.) [3]. Естественно, самая высокая концентрация айсбергов наблюдается вблизи мест их образования.

По размерам айсберги негрландского происхождения сравнительно невелики. В районе островов Земля Франца-Иосифа они могут достигать высоты до 25 м и длины около 0,5 км. Однако довольно скоро такие айсберги распадаются на блоки и куски меньших размеров. Наиболее часто встречающиеся арктические айсберги имеют высоту около 10 м и длину 50 м.

Южная граница распространения айсбергов в арктических морях, в том числе в Баренцевом море, приведена на рис. 1. Единичные айсберги могут проникать до самого берега.

Наибольшее количество айсбергов судно может встретить при плавании в северо-восточной части Баренцева моря. При плавании в Карском море встреча судна с айсбергом наиболее вероятна вблизи восточного побережья Новой Земли. В море Лаптевых айсберги встречаются преимущественно в западной части вблизи островов Северная Земля, наиболее вероятна встреча с айсбергом в проливе Вилькицкого. Практически вся акватория Восточно-Сибирского моря свободна от айсбергов, поэтому вероятность встречи судна с айсбергом там близка к нулю.

Определение вероятности столкновения судна с айсбергом

Вероятность столкновения судна с айсбергом определялась в результате совместных работ Крыловского государственного научного центра с Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом. Моделирование описанных процессов производилось методом Монте-Карло. Для этого отдельно генерировались природные условия, которые учитывали вероятность местонахождения айсбергов в зависимости от географических координат и времени года. Каждый такой айсберг обладал определенными формой, размерами и массой. Как отмечалось выше, высота волн существенно сказывается на возможности обнаружить айсберг, поэтому при моделировании также учитывался этот фактор.

Модель судна была снабжена стандартными методами обнаружения айсбергов, а также системами управления движением (aziprod). Судно могло маневрировать (с учетом инерционных характеристик) в случае заблаговременного обнаружения айсберга.

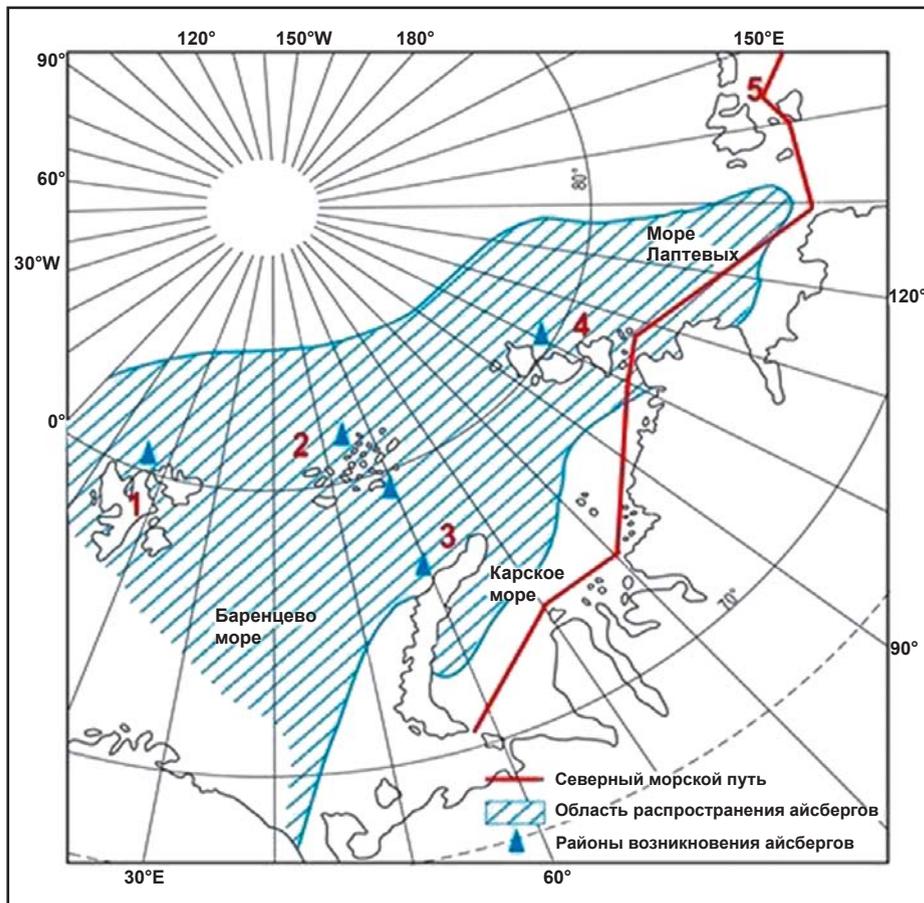


Рис. 1. Область распространения айсбергов в морях российской Арктики и прилегающих к ним районах арктического бассейна: 1 – Шпицберген, 2 – Земля Франца-Иосифа, 3 – Новая Земля, 4 – Северная Земля, 5 – Новосибирские острова

По результатам моделирования выявлено, что вероятность столкновения судна с айсбергом на трассах СМП P_A в среднем составила 1,4%. Наиболее высока опасность столкновения в октябре (2,7%), в то время как в июне ее почти нет (0,1%). В 77% случаев, когда происходило столкновение с айсбергами, высота надводной части которых не превышала 2 м. Проведенные исследования говорят о высокой вероятности столкновения судна с обломком айсберга на трассах СМП.

Основные подходы к нормированию прочности при столкновении с айсбергом

Согласно существующим регламентам (в частности, правилам DNV) при расчетах аварийных случаев соударения лимитируется объем поглощения энергии удара. Недостатком подобного подхода является отсутствие прямых сведений о перераспределении энергии удара в энергию деформирования и разрушения, что может быть проанализировано только с учетом реальной конструкции. Существующие технологии расчета конструкции с учетом всех ее геометрических особенностей позволяют производить подобную оценку.

Перспективным является переосмысление существующих норм на предмет введения учета фактической повреждаемости корпуса конструкции при аварийной ситуации. Предложенная оценка позволит сократить консерватизм существующих оценок в ряде случаев путем учета деформирования фактической конструкции.

Методики оценки повреждаемости судна при столкновении с айсбергом

Для решения задач аварийной прочности, в частности задачи столкновения судна с айсбергом, ранее [4] предлагался комбинированный подход, состоящий из экспериментального исследования натурных конструкций и анализа с помощью численных алгоритмов.

Экспериментальное исследование конструкции на аварийную прочность может включать в себя испытания на статические нагрузки, на усталостную прочность, а также на динамический отклик конструкции. Проведение экспериментальных исследований в натурную величину является необходимым при проектировании наиболее ответственных сооружений, таких как арктические газовозы.

Анализ повреждаемости судна с помощью численных алгоритмов должен быть составлен с учетом динамики соударения судна с айсбергом. Наиболее мощным инструментом для решения подобных задач в настоящее время является метод конечных элементов (МКЭ) в неявной формулировке.

Определение опасных сценариев взаимодействия газозова с айсбергом

При рассмотрении опасных сценариев соударения судов с айсбергами было решено произвести анализ на примере газозовов. Авария на подобных судах имеет существенные последствия как для судьбы судна, так и для экологической обстановки в районе крушения. Актуальность использования газозовов на СМП диктуется необходимостью вывоза природного газа с арктического шельфа.

Выше упоминалось, что обнаружение кусков и обломков айсбергов является сложной задачей. При движении судна в ледовых условиях обломки и куски айсбергов практически неотличимы по размерам от торосистых образований. Наравне с этим масса даже кусков айсбергов может достигать тысяч тонн, не говоря уже об обломках. Соударение судна с таким объектом на большой скорости может привести к серьезным повреждениям. Кроме того, куски и обломки айсбергов — наиболее часто встречаемые формы айсбергов [5].

В качестве сценария аварийного столкновения может быть рассмотрен удар средней частью судна на циркуляции о ледяное образование (кусок айсберга). Подобный выбор может быть оправдан следующими положениями: 1) традиционно ледовые подкрепления носовой части имеют значительно большие усиления по сравнению со средней частью; 2) в среднем расстояние между обшивкой судна и стенкой емкости для сжиженного природного газа (СПГ) существенно меньше в средней части судна, нежели в носовой.

Расчет последствий соударения судна об айсберг на примере конструкций крупнотоннажных газозовов

Объектами исследования стали крупнотоннажные суда для перевозки СПГ грузоместимостью около 180 000 м³ ледового класса Arc7 [4]. Рассмотрены конструкции трех основных типов таких судов: MOSS, SPB и GTT No96.

Айсберг моделировался цилиндрическим телом радиусом R и высотой H с высокими характеристиками прочности. Расчет ледовых нагрузок при прямом ударе проводился по программе расчета, разработанной Крыловским научным центром в составе комплекса, сертифицированного Российским морским регистром судоходства. Итоговое расчетное ледовое давление составило около 22 МПа.

Для расчетных исследований разработаны 3D конечно-элементные (КЭ) модели трех типов газозовов. При построении КЭ моделей использованы

оболочечные конечные элементы SHELL16, с помощью которых смоделированы все основные несущие конструкции. В качестве материала для стали рассматривался билинейный материал с пределами текучести 235 МПа (вне зоны ледовых усилений) и 390 МПа (в районе ледовых усилений). Нагрузка прикладывалась равномерной эпюрой в районе зоны контакта, величина нагрузки равномерно увеличивалась во времени до итогового значения.

По результатам расчета получено, что обшивка теряет несущую способность при значениях ледовых давлений, несколько меньших расчетных. На основании расчета и выдвинутых предположений можно сделать вывод, что представленные конструкции не выдержат соударение с айсбергом. Однако конструкция двойного борта позволяет обеспечить необходимый уровень безопасности для газозовов, поскольку максимальный прогиб наружной обшивки не превысил 0,73 м, что значительно меньше межбортного пространства. В табл. 2 приведены значения максимальных прогибов и разрушающих давлений для каждого типа судна.

Таблица 2. Максимальный прогиб наружной обшивки и величина расчетного давления в момент начала разрушения

Тип газозова	Максимальный прогиб наружной обшивки, м	Максимальное давление, МПа
MOSS180k	0,73	20,8
SPB180k	0,75	18,2
GTT180k	0,69	20,0

Оценка безопасности при аварийном столкновении с айсбергом крупнотоннажных газозовов

По результатам полученных максимальных прогибов от удара айсберга составлена оценка безопасности судна.

Статистическая модель возникновения события получения пробоин в борту при выполнении маневра отворота при обнаружении айсберга предложена в [6]. При адаптации этой модели к нашей задаче получена запись вероятности превышения максимальной глубины продавливания P_B в виде

$$P_B = 2,5 \left(\frac{B}{\bar{B}} \right)^4 - 2,8 \left(\frac{B}{\bar{B}} \right)^3 + 1,3 \left(\frac{B}{\bar{B}} \right)^2,$$

где B — расчетная глубина продавливания, м; \bar{B} — допускаемая глубина продавливания (межбортное пространство), м.

Тогда совместный риск столкновения с айсбергом и получения недопустимых повреждений

Таблица 3. Сопоставление параметров аварийной прочности газозовов MOSS, SPB, GTT No96

Тип емкостей	Глубина продавливания B , м	Допустимая глубина продавливания \bar{B} , м	Вероятность P_B	Вероятность P_A	Вероятность P_Σ
MOSS	0,59	8,9	$0,49 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$0,69 \cdot 10^{-4}$
SPB	0,75	4,5	$2,51 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$3,51 \cdot 10^{-4}$
GTT No96	0,51	3,0	$2,59 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$

определяется формулой $P_\Sigma = P_A P_B$. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Выводы

Несмотря на разнообразие существующих систем обнаружения опасных ледяных образований, существует достаточно высокая (до 2,7%) вероятность столкновения судна с айсбергами при движении по Северному морскому пути. При этом наибольшую опасность представляют куски айсберга, которые возвышаются над уровнем моря менее чем на 2 м.

Анализ аварийной прочности судна при ударе о кусок айсберга предлагается производить с оценением фактической повреждаемости конструкции вместо существующего подхода к нормированию объема поглощения энергии. В качестве метода оценки предлагается использовать экспериментальное исследование натурной конструкции совместно с расчетами в динамической постановке МКЭ.

Средняя вероятность столкновения с айсбергом на трассах СМП составляет 1,4%. При этом вероятность превышения максимальной глубины продавливания для рассмотренных газозовов составляет 0,007—0,036% в зависимости от типа систем хранения. Вероятность получения критических повреждений газозовами достаточно мала, однако определенные риски присутствуют. Дополнительное снижение рисков может быть обеспечено ответственным

подходом к проблеме обнаружения айсберга, а также анализом прочности корпусных подкреплений.

Литература

1. Романов А. А. Ледовые условия плавания в Южном океане / Аркт. и Антаркт. науч.-исслед. ин-т. — [Б. м.], 1996. — 119 с. — (Всемирная метеорологическая орг.; ВМО/ТД- No. 783). — URL: http://www.aari.ru/gdsidb/docs/wmo/WMO_783_rus.pdf.
2. Айсберг по курсу! Техническая заметка. — URL: <http://bbc-teplovizor.ru/shownews.php?subaction=showfull&id=1390833834&>.
3. Бузуев А. Я., Дубовцев В. Ф., Захаров В. Ф., Смирнов В. И. Условия плавания судов во льдах морей Северного полушария / Гл. упр. навигации и океанографии М-ва обороны Союза ССР. — М., 1988. — 280 с.
4. Shaposhnikov V. M., Nesterov A. B., Aleksandrov A. A., Vasilik E. G. Safety of LNG transportation in arctic conditions when using systems of various types // Proceedings of OMAE2014. June 8—13, 2014, San Francisco, California, USA.
5. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под общ. ред. Б. А. Крутских. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 56 с.
6. Александров М. Н. Безопасность человека на море. — Л.: Судостроение, 1983.

Информация об авторах

Александров Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, начальник 31-й лаборатории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Санкт-Петербург, Московское ш., 44).

Ивановская Ольга Донатовна, инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Санкт-Петербург, Московское ш., 44).

Матанцев Роман Андреевич, инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: R_Matancev@ksrc.ru.

Шапошников Валерий Михайлович, кандидат технических наук, начальник отделения прочности, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Санкт-Петербург, Московское ш., 44).

Библиографическое описание данной статьи

Шапошников В. М., Александров А. В., Матанцев Р. А., Ивановская О. Д. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозовов // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 76—81.

ICEBERG RISK ANALYSIS FOR THE NORTHERN SEA ROUTE: LNG CARRIER STUDY CASE

Shaposhnikov V. M., Aleksandrov F. V., Matantsev R. A., Ivanovskaya O. D.
Krylov State Research Centre (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Abstract

The paper addresses the issue of ship/iceberg collision risks during navigation via the Northern Sea Route (NSR). The risk sources considered for ships include both the probability of ship collision with an iceberg and risks of substantial structural damage in case of ship impact against an iceberg.

Analysis of advance detecting systems and analysis of iceberg occurrence in the NSR are performed. Computer simulation of ship collisions in the NSR conditions where a possibility of ship maneuvering is considered demonstrates that the probability of ship/iceberg collisions in the NSR is rather high.

Issues of ship strength after accident under ship hull/iceberg collisions are considered for LNG carriers of MOSS, SPB and GTT No.6 types. When evaluating the hull components load-carrying capacity, full scale tests are preferred. Computer methods for strength evaluation could be also used when validation of computational methods is required.

LNG carrier hull damageability in case of ship/iceberg collisions is estimated. Owing to the double side structure mandatory for LNG carriers, the hull strength is ensured.

The complex analysis demonstrates that the integrated probability of LNG carrier /iceberg collisions and critical hull damaging is small that permits to accentuate the high reliability of LNG carriers in the NSR.

Keywords: *Strength after accident, Ice Load, Icebergs, Iceberg Danger, Northern Sea Route.*

References

1. Romanov A. A. Ledovyye usloviya plavaniya v Yuzhnom okeane. [Ice condition of navigation in the Southern Ocean]. AARI. 1996, 119 p. (Vsemirnaya meteorologicheskaya org.; VMO/TD- No. 783). Available at: http://www.aari.ru/gdsidb/docs/wmo/WMO_783_rus.pdf. (In Russian).
2. Aysberg po kursu! Tekhnicheskaya zametka. [Iceberg at the rate! Technical note]. Available at: <http://bbc-teplovizor.ru/shownews.php?subaction=showfull&id=1390833834&>. (In Russian).
3. Buzuyev A. Ya., Dubovtsev V. F., Zakharov V. F., Smirnov V. I. Usloviya plavaniya sudov vo ldakh morey Severnogo polushariya. [Conditions of navigation of vessel in the ice of the seas of the Northern Hemisphere]. GI upr. navigatsii i okeanografii M-va oborony Soyuza SSR. M., 1988, 280 p. (In Russian).
4. Shaposhnikov V. M., Nesterov A. B., Aleksandrov A. A., Vasilik E. G. Safety of LNG transportation in arctic conditions when using systems of various types. Proceedings of OMAE2014, June 8—13, 2014, San Francisco, California, USA.
5. Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh ldov. [International symbols for sea ice maps and the sea ice nomenclature]. Pod obshch. red. B. A. Krutskikh. L., Gidrometeoizdat, 1984, 56 p. (In Russian).
6. Aleksandrov M. N. Bezopasnost cheloveka na more. [Human Safety of sea]. L., Sudostroyeniye, 1983. (In Russian).

Information about the authors:

Aleksandrov Anatolii Vladimirovich, Ph.D., head of laboratory of static strength, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe sh., Saint-Petersburg, 196158, Russia).

Ivanovskaya Olga Donatovna, engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe sh., Saint-Petersburg, 196158, Russia).

Matantsev Roman Andreevich, engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe sh., Saint-Petersburg, 196158, Russia), e-mail R_Matancev@ksrc.ru.

Shaposhnikov Valerii Mikhaylovich, Ph.D., Head of Structural Strength and Reliability Division, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe sh., Saint-Petersburg, 196158, Russia).

Bibliographic description

Shaposhnikov V. M., Aleksandrov F. V., Matantsev R. A., Ivanovskaya O. D. Iceberg risk analysis for the Northern sea route: LNG carrier study case. *The Arctic: ecology and economy*, 2017, no. 2 (26), pp. 76—81. (In Russian).