

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ИЗ-ЗА СЖАТИЙ СУДОВ ДРЕЙФУЮЩИМИ ЛЬДАМИ НА УЧАСТКЕ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

В.Ю. Третьяков^{1,2}, С.В. Фролов², М.И. Сарафанов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²ФГБУ «Арктический и Антарктический НИИ», Санкт-Петербург

Представлены результаты тестирования компьютерной имитационной модели оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций с танкерами из-за сжатий дрейфующих льдов. Тестирование выполнено для маршрута плаваний «Сабетта – Карские Ворота – Мурманск» в первую декаду мая, т.е. при наиболее тяжёлых ледовых условиях плавания. Рассчитаны вероятности возникновения аварийных ситуаций, выполнен анализ чувствительности модели к изменениям значений её параметров.

Ключевые слова: моделирование, вероятность аварий, сжатия льдов

✉ v_yu_tretyakov@mail.ru, svf@aari.ru, mik_sar@mail.ru

УДК 504.42

DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10051

THE RESULTS OF COMPUTER SIMULATION OF THE PROBABILITY OF ACCIDENTS DUE TO SHIP NIPS BY DRIFTING ICE ALONG THE NORTHERN SEA THROUGHWAY

V.Yu. Tretyakov^{1,2}, S.V. Frolov², M.I. Sarafanov^{1,2}

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg

²Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute", St. Petersburg

Results of testing of computer simulation model for assessment of probability of accidents with tankers due to pressure by drifting ice are presented. The testing was carried out for the navigation route «Sabetta Port – Kara Gate Strait – Murmansk Port» and for the first ten-days period of May, during the most difficult ice conditions of the navigation. The probabilities of the accidents were calculated. There was analyzed the model response to variations of its parameters values.

Keywords: simulation, accident probability, nips

Введение. Современная цивилизация является углеводородной: энергетика и химическая промышленность в основном базируются на использовании нефти, нефтепродуктов и природного газа. Исчерпание старых месторождений вынуждает осваивать новые в Заполярье и на шельфе российских арктических морей. Это требует развития систем транспортировки углеводородов, в частности, морских транспортных систем Северного морского пути [1, 2, 3].

В соответствии с проектом «Ямал СПГ» в Сабетте на полуострове Ямал уже запущена третья технологическая линия крупнейшего завода по сжижению природного газа. В ближайшее время планируется увеличить его мощность и выйти на уровень производства около 17,4 млн тонн сжиженного природного газа в год [4]. Проект основывается на переработке запасов Южно-Тамбейского месторождения более чем в 1 триллион кубических метров природного газа. Вывоз сжиженного газа уже сейчас осуществляется шестью современными танкерами по стандартным маршрутам плаваний [5, 6]. При выходе завода на полную мощность потребность в перевозках только возрастет. Также по Северному морскому пути транспортируются большие объёмы нефти. В настоящее время вывоз углеводородов наливными судами осуществляется из расположенных в Печорском море (юго-восточная часть Баренцева моря) прибрежного терминала Варандей и Морской ледостойкой платформы «Приразломная», в Карском море – из расположенного на западном побережье полуострова Ямал терминала Харасавэй, портов Сабетта и Новый Порт на восточном побережье Ямала в Обской губе. Транспортировка осуществляется современными танкерами и газовозами. Ледовые усиления высокой арктической категории (Arc7) позволяют им самостоятельно преодолевать льды толщиной до 2.1 метра при движении кормой вперед [7, 8].

При работе любой транспортной системы возможны аварии, и как следствие – аварийные разливы сжиженного газа и нефти с загрязнением окружающей

среды [9, 10, 11]. В условиях ледового плавания причинами возникновения аварийных ситуаций могут быть столкновение судна с другим судном, посадка на мель, навал судна на береговой терминал или платформу, столкновение с ледяными образованиями и айсбергами [12]. Перечисленные причины вызываются человеческим фактором, т.к. при соблюдении правил безопасного судоходства и исправном радиолокационном оборудовании вероятности аварий по этим причинам могут быть снижены до близких к нулю величин. Форс-мажорной причиной возникновения аварий является сжатие судна льдами. Все случаи гибели судов в Северном Ледовитом океане, за исключением военных потерь, были вызваны именно сжатиями льдов [13]. Ледяной покров – это главный источник риска при плаваниях по Северному морскому пути, он препятствует хозяйственной деятельности в Арктике [14]. Компьютерное моделирование позволяет предсказывать расположение зон возможных сжатий, их силу и вероятность, но не может на 100% исключить возможность сжатий судов дрейфующими льдами.

Цель исследования заключалась в тестировании компьютерной модели оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на маршруте «Сабетта – Карские Ворота – Мурманск» (рис. 1) из-за сжатий судов льдами.

Материалы и методы. Для оценки вероятности возникновения аварийной ситуации В. Ю. Третьяковым разработана и совершенствуется компьютерная модель, основанная на методе Монте-Карло. Данный метод применяется для моделирования случайных событий, происходящих при достижении рядом параметров модели критических значений (нахождения судна в зоне сжатий при определенной толщине ровного льда и т.д.).

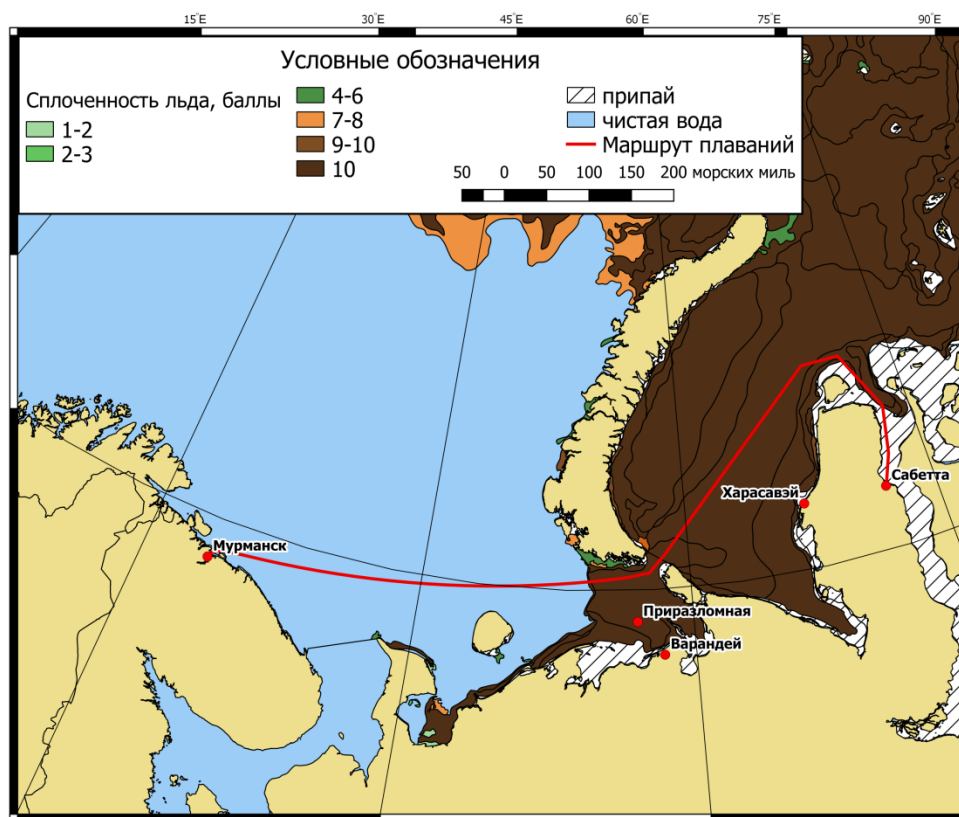


Рис. 1. Карта исследуемого маршрута. Показаны ледовые условия во вторую декаду мая 2018 года

В модели аварийная ситуация наступает, если судно находится в зоне сжатий и прочность льда оказывается выше корпуса судна в его центральной части, в районе цилиндрической вставки – миделя. При торосистости более двух баллов за прочность льда принимается большая из двух величин: прочности ровного льда и прочности консолидированного слоя гряды торосов. При проведении численных экспериментов с моделью характеристики ледяного покрова не задаются детерминированными, а рассматриваются как случайные величины, имеющие свои статистические распределения, являющиеся параметрами модели. Ими служат следующие интегральные функции распределения: вероятности попадания судна в зону сжатий, суммарной протяжённости пути в сплоченных дрейфующих льдах, относительных протяжённостей пути плавания в сплоченных льдах с наличием льдов различных возрастных градаций, протяжённости однородных ледовых зон, протяжённостей участков плавания без сжатий и со сжатиями, толщин льдов различных возрастных градаций, торосистости, отношения грядовой торосистости к общей, длины прямолинейных участков гряд, ширины гряд, отношения ширины гряды к её высоте, толщины консолидированного слоя гряды торосов. При использовании метода Монте-Карло генератор случайных чисел выдаёт дробную величину в пределах от 0 до 1, рассматриваемую как значение интегральной функции распределения данной характеристики ледяного покрова. По этому значению определяется квантиль – конкретное значение характеристики. В модели рассматривается только статическое взаимодействие между корпусом судна и ледяным покровом. Прочность элементов корпуса судна рассчитывается в соответствии с требованиями Российского Морского Регистра. Если при данном сочетании значений характеристик ледяного покрова, полученных с помощью генератора случайных чисел и их статистических распределений, прочность льда оказывается больше прочности судна, то происходит разрушение корпуса судна и наступает аварийная ситуация. Статистические распределения характеристик ледяного покрова строятся на основании ледовых карт архива Арктического и антарктического научно-

исследовательского института (ААНИИ), результатов экспедиций ААНИИ и данных литературных источников. Прочность льда при его сжатии зависит от многих факторов. Исследования прочностных свойств льда при его контакте с различными конструкциями весьма востребованы и проводятся как отечественными [15-19], так и зарубежными специалистами [20-24].

Прочность ровного льда зависит от его толщины. В период от начала устойчивого ледообразования и до начала летнего таяния толщина льда определяется его возрастной категорией. Торошению в основном подвергаются молодые и тонкие однолетние льды. Свежие торосы состоят из отдельных, не скреплённых между собой блоков, имеющих такую же толщину, как и ровный лёд, из которого они образовались. Поэтому молодые торосы не представляют опасности при сжатии судна дрейфующими льдами. Ситуация меняется, когда часть отдельных блоков гряды торосов смерзается в монолит – так называемый консолидированный слой. При торосистости, не превышающей 2 баллов по российской пятибалльной шкале, предполагается, что судоводитель имеет возможность обходить торосы. В этом случае учитывается прочность только ровного льда, при этом рассчитывается как прочность раздробления, так и излома [25], и в качестве прочности льда берётся меньшая из этих двух величин.

В соответствии с работами [26, 27] доля грядовой торосистости составляет 50% от общей. Пространственная ориентация гряд считается хаотической [27, 28], поэтому распределение направлений гряд принято равномерным и средний угол между генеральным курсом судна и грядой составляет 45%.

Подготовка статистических распределений суммарных протяжённостей участков маршрута, отвечающих определённым характеристикам ледяного покрова была выполнена на основании векторных карт ледовой обстановки из архива ААНИИ. Эти карты были созданы в Центре ледовой гидрометеорологической информации ААНИИ на основе данных дистанционного зондирования Земли [29].

Обработка векторных карт выполнялась в среде ГИС ArcGIS следующим образом: полигональные объекты слоёв ледовых карт пересекались линейным объектом маршрута плаваний. В результате по маршруту плаваний создавался слой линейных объектов с наследованием атрибутов пересекаемых полигонов ледовых карт. Затем происходил выбор объектов по значениям атрибутов и расчёты протяжённостей объектов. Выделялись объекты с общей сплоченностью дрейфующих льдов 9 и более баллов при условии присутствия льдов более возрастных категорий, чем начальные, и записывались в новый слой участков маршрута в сплоченных льдах. Затем из него в отдельные слои записывались объекты с наличием льдов различных возрастных категорий. Рассчитывались протяжённости отдельных объектов и суммарные протяжённости всех объектов, удовлетворяющих определённому условию. Так были получены подекадные ряды протяженностей пути в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии начальных (толщина до 10 см), серых (10-15 см), серо-белых (15-30 см), тонких (30-70 см), средних (70-120 см), толстых (более 120 см) однолетних льдов. Также были рассчитаны подекадные ряды суммарных протяженностей участков маршрута в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и

более баллов и суммарных протяженностей участков маршрута в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых однолетних льдов и однолетних льдов средней толщины 5 и более баллов.

Исходный набор числовых значений для построения статистического распределения значений параметра модели должен быть однороден. Поэтому был выполнен анализ полученных числовых рядов на наличие межгодового тренда методом интегральных кривых. Метод интегральных кривых или накопленных (кумулятивных) сумм первоначально применялся в гидрологии для проверки наличия или отсутствия направленных изменений (трендов) в межгодовой динамике годовых расходов рек [30]. Впоследствии он стал применяться для предварительного анализа межгодовой изменчивости любых параметров окружающей среды. Сущность метода заключается в следующем. Строится график: по оси абсцисс откладываются обозначения лет, по оси ординат – накопленные суммы значений параметра, относящихся к определенным годам. В данном случае это значения, относящиеся к одной и той же внутригодовой декаде различных лет. Накопленная сумма для данного года – это сумма значений ряда от самого его начала до данного года включительно. Для первого года ряда – это само значение, для второго года – сумма значений первого и второго года и т.д. Точки накопленных сумм на графике соединяются линией. Если направленная межгодовая изменчивость отсутствует, то линия должна быть близка к прямой. Если же на линии присутствуют изломы и/или изгибы, то это может свидетельствовать о наличии тренда и неоднородности ряда значений.

Если на интегральной кривой отсутствуют явные изломы, и форма линии близка к прямой, то для проверки его однородности исходный числовой ряд делится пополам. Когда на интегральной кривой есть изломы и/или изгибы, то исходный числовой ряд подразделяется на части по местам этих изломов и изгибов. Если изломов или изгибов несколько, но число элементов в отдельных частях ряда оказывается меньшим того количества, которое необходимо для выполнения статистического анализа, то разделение исходного числового ряда на две части проводится по месту самого выраженного излома. Далее выполняется проверка нулевой гипотезы о принадлежности двух частей числового ряда к одной генеральной совокупности, т.е. об отсутствии существенных различий между этими двумя наборами числовых значений. Проверка выполнялась в среде системы Mathcad с использованием ранговых непараметрических критериев однородности Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки.

Статистические распределения параметров модели строились в среде Mathcad по методам Хазена, Крицкого-Менкеля, Чегодаева и Грингортена. Сравнения полученных с помощью разных методов расчетов статистических распределений показали несущественность различий между результатами. Поэтому в модели применяются статистические распределения параметров, рассчитанные по методу Грингортена, который совмещает специфику трёх остальных методов (рис. 2).

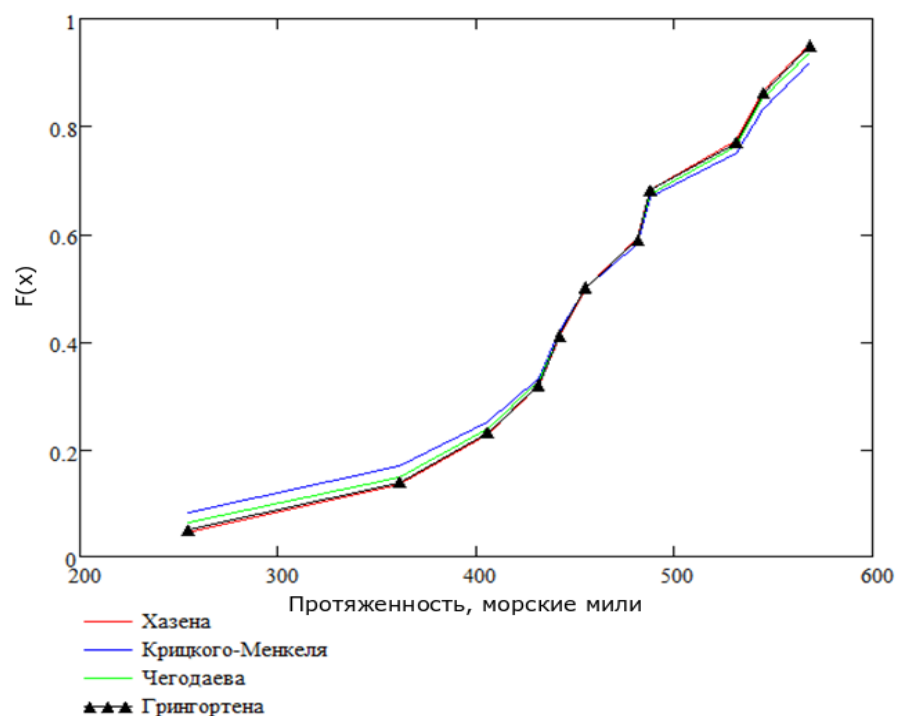


Рис. 2. Интегральная функция распределения протяженности маршрута в сплоченных льдах в первую декаду мая, рассчитанная разными методами

Статистические распределения параметров записывались в файлы текстового формата, к которым при проведении численных экспериментов с моделью выполнялись многократные обращения для расчетов значений параметров.

Модель реализована на алгоритмическом языке Delphi. В ней предусмотрено как автоматическое, так и принудительное прекращение отдельного численного эксперимента (серии плаваний). Пользователь задаёт число экспериментов в одном компьютерном расчёте. В рамках одного расчёта статистические распределения параметров модели остаются неизменными. Автоматическое прекращение численного эксперимента (серии плаваний) происходит в случае стабилизации отношения числа аварийных ситуаций к числу плаваний. Если A – отношение числа аварий к числу плаваний по завершении данного модельного плавания, B – отношение числа аварий к числу плаваний при предыдущей аварии, то численный эксперимент прекращается при условии: $|A - B| < (A * 0.001)$. Также численный эксперимент прекращается, если произойдет 10001 безаварийное плавание.

Однако возможна ситуация, когда за весь период функционирования транспортной системы максимальное число плаваний, приходящееся на внутригодовую декаду, оказывается существенно меньше числа плаваний, при котором происходит стабилизация отношения числа аварий к числу плаваний. В этом случае в одном численном эксперименте (группе плаваний) задаётся максимальное число плаваний, равное ожидаемому числу плаваний, приходящемуся на данную декаду за весь период эксплуатации этой морской транспортной системы. При выполнении этого числа плаваний этот численный эксперимент принудительно завершается вне зависимости от того, стабилизировалось или нет отношение числа аварий к числу плаваний. В обоих случаях, и при автоматическом, и при принудительном завершении численных экспериментов пользователь заранее задаёт число выполняемых численных экспериментов в одном компьютерном расчёте. Отношение числа аварий к числу плаваний рассматривается как вероятность возникновения аварийной ситуации. Поскольку в одном компьютерном расчёте выполняется ряд численных экспериментов, то сама вероятность возникновения аварийной ситуации должна рассматриваться как случайная величина со

своим математическим ожиданием (МО) и средним квадратичным отклонением (СКО). В соответствии с первой предельной теоремой её статистическое распределение должно быть близким к нормальному распределению, т.к. на её величину влияют множество различных факторов. В качестве оценки сверху вероятности аварии предлагается использовать сумму МО и утроенного СКО при выполнении серии из не менее чем 30 численных экспериментов с их принудительным завершением. В этом случае вероятность большей аварийности в соответствии с «правилом трёх сигм» составит всего 0.15%. Поэтому для оценки ожидаемого ущерба следует использовать вероятность аварии, рассчитанную этим способом.

Результаты и обсуждение. Апробация модели была произведена для ледовых условий в первую декаду мая, когда они являются наиболее тяжёлыми. Отношение числа аварий к общему числу плаваний при автоматическом завершении численных экспериментов для судна ледового класса Arc7 водоизмещением 70 тыс. тонн составило 0.023. Важнейшим этапом использования имитационной модели в научных исследованиях является проверка её чувствительности к изменению значений параметров. Для этого был выполнен ряд экспериментов, в которых задавались фиксированные минимальные и максимальные в соответствии со

статистическими распределениями значения параметров модели. Например, для выяснения чувствительности модели к изменению общей торосистости сравниваются результаты экспериментов с отсутствием торосов и максимальной торосистостью в 4.5 баллов, когда до 90% площади ледяного покрова покрыто торосами. Эта процедура необходима для верификации модели: если изменение значений какого-либо параметра, влияние которого на вероятность аварий очевидно, не влияет на результат моделирования, то в алгоритме модели или в программном коде есть явные ошибки. Также это исследование позволяет выявить наиболее чувствительные параметры модели, уточнение значений которых требует выполнения дополнительных натурных исследований и/или специализированной обработки результатов прошлых экспедиций, экспериментов, спутниковых снимков и т.п. Результаты экспериментов по определению наиболее влияющих на поведение модели параметров представлены в таблице 1. «Эталонный» вариант моделирования означает, что значения всех параметров модели определялись с помощью файлов статистических распределений и генератора случайных чисел. В остальных случаях значения того параметра, чувствительность модели к изменению значений которого проверялась, задавались как детерминированные величины. Обработка и осреднение результатов выполнена с помощью языка R.

Таблица 1 - Результаты моделирования при различных значениях параметров

Параметр модели	Минимум и максимум параметра	Вероятность возникновения аварии (среднее по 30 расчетам)
«Эталонный» вариант	-	0.023
Протяженность маршрута в сплоченных льдах	min – 255 м. миль	0.016
	max – 567 м. миль	0.028
Общая торосистость	min – 0 баллов	0
	max – 4.5 балла	0.030
Вероятность сжатий	min – 0	0
	max – 0.02	0.044
Длина участков пути со сжатиями	min – 2.9 м. миль	0.017
	max – 69.7 м. миль	0.027
Длина участков пути без сжатий	min – 6.2 м. миль	0.441
	max – 1609.7 м. миль	0.009

Таким образом, сильнее всего на вероятность аварии влияют следующие параметры модели: протяженность маршрута в сплоченных льдах, общая торосистость, вероятность сжатий и длина участков пути со сжатиями.

Выполнено 450 численных экспериментов с варьированием ледовых классов и водоизмещения судов. Их результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты моделирования плаваний судов различных ледовых классов и водоизмещений

Ледовый класс судна	Водоизмещение, тыс. тонн	Вероятность аварийной ситуации (среднее по 30 расчетам)
Arc5	45	0.025
	70	0.025
	85	0.024
Arc6	45	0.025
	70	0.024
	85	0.025
Arc7	45	0.024
	70	0.024
	85	0.023
Arc8	45	0.022
	70	0.024
	85	0.023
Arc9	45	0.022
	70	0.022
	85	0.020

Результаты визуализированы на рисунке 3. Видно, что с повышением ледового класса судна вероятность аварии снижается. Следовательно, модель верно

учитывает увеличение прочности корпуса судна при повышении класса его ледовых усилений.

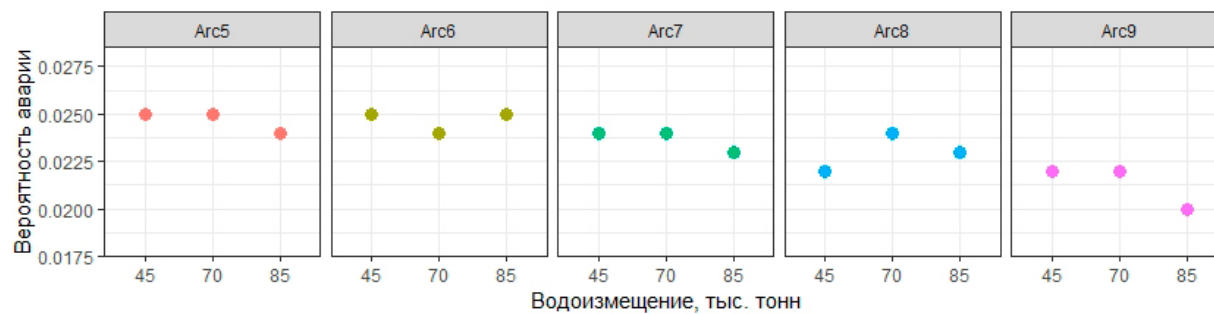


Рис. 3. Результаты моделирования для судов различных ледовых классов

Также произведено около 600 модельных расчетов с принудительным заданием числа плаваний в одном эксперименте для категорий ледовых усилений Arc5, Arc6, Arc7, Arc8, Arc9 с водоизмещением 70000 тонн.

Число плаваний различалось - 30, 100, 500 и 1000 в одном эксперименте. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты моделирования с принудительным заданием числа плаваний в эксперименте

Ледовый класс судна	Число плаваний в одном эксперименте	Вероятность аварийной ситуации (среднее по 30 расчетам)
Arc5	30	0.104
	100	0.040
	500	0.026
	1000	0.023
Arc6	30	0.091
	100	0.046
	500	0.025
	1000	0.024
Arc7	30	0.132
	100	0.051
	500	0.024
	1000	0.023
Arc8	30	0.257
	100	0.043
	500	0.023
	1000	0.023
Arc9	30	0.097
	100	0.039
	500	0.024
	1000	0.022

Заключение. Выполнено тестирование компьютерной модели оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций из-за сжатий судов льдами на маршруте «Сабетта – Мурманск». Для проведения численных экспериментов были подготовлены распределения параметров модели – характеристик ледяного покрова: толщины консолидированного слоя торосов, отношения ширины гряд торосов к их высоте, доли грядовой торосистости, общей торосистости, длины участков маршрута плаваний со сжатиями, длины участков пути без сжатий, протяженности маршрута в сплоченных льдах, относительной протяженности маршрута в сплоченных льдах при наличии толстых однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины, тонких однолетних льдов и молодых льдов. Для подготовки данных была произведена подекадная обработка электронных векторных карт ледовой обстановки из архива ААНИИ по маршруту за период 1997-2018 гг. Полученные ряды протяженностей были проверены на наличие тренда методом интегральных кривых и проверены на однородность при помощи ранговых непараметрических критериев Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки. Статистические распределения построены по методам Хазена, Крицкого-Менкеля, Чегодаева и Грингортона.

По результатам моделирования получены следующие выводы:

1) Наиболее сильно на вероятность аварии влияют следующие параметры модели: протяженность маршрута в сплоченных льдах, общая торосистость, вероятность сжатий, длина участков пути со сжатиями;

2) При расчётах с принудительным завершением численных экспериментов при небольшом числе плаваний вероятность аварии оказывается в несколько раз больше, чем при более чем 100 плаваниях в одном эксперименте или при его автоматическом прекращении;

3) При эксплуатации морской транспортной системы «Сабетта – Карские Ворота – Мурманск» вероятность аварии судна ледового класса Arc7 из-за сжатий льдами составляет 0.023 для первой декады мая, когда наблюдаются наиболее тяжелые ледовые условия на маршруте.

Оценка рисков аварийности крайне важна при стратегическом планировании логистических систем при добыче и транспортировке углеводородов в Арктике.

Необходимо заметить, что исследования в данном направлении продолжаются. Так, уже рассчитаны протяженности пути плавания в различных категориях льдов для другого востребованного маршрута – «Сабетта – Берингов пролив» и планируется моделирование рисков по этому маршруту.

Список литературы:

1. Бабич С.В., Яковлева А.А., Транспортно-логистический потенциал Северного Морского Пути в Евразийском экономическом пространстве // Российская Арктика; Москва, № 4, с. 5-14, 2019
2. Minyang Zhang, Di Zhang, Shanshan Fu, Xinpeng Yan, Chi Zhang, A Method for Planning Arctic Sea Routes Under Multi-Constraint Conditions // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
3. Chi Zhang, Di Zhang, Shanshan Fu, Mingyang Zhang, Interpretative Structural Modeling of Ship Energy Efficiency in Arctic Navigation // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
4. <http://yamallng.ru/press/news/37034/> – Сайт проекта «Ямал СПГ», дата обращения 20.06.2019
5. <https://www.ashipping.ru/geo/49/> – Сайт компании «ASCO», осуществляющей транспортировку сырья при разработке месторождения в Сабетте, дата обращения 20.06.2019
6. Frédéric Jean Louis Hannon, Shipping LNG from the Arctic: A True Story // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 866-874
7. <https://www.vestifinance.ru/articles/103595> – Сайт информационного агентства «Вести Экономика», дата обращения 20.06.2019
8. Hyeok Geun Ki, Joong Hyo Choi, Sung Gun Park, Sung Kon Han, Ice Collision Analysis and Alternative Full Scale Impact Test for ARC 7 LNG Carrier // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
9. Liyanarachchi W. A. de Silva, Hajime Yamaguchi, Numerical Study of Oil Spilled Behavior under Ice-Covered Area in the East Siberian Sea // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
10. Hossein Babaei, David Watson and Richard Burcher, Verification and Validation of An in-Ice Oil Spill Trajectory Model Based on Satellite-Derived Ice Drift Data // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions

June 11-16, 2017, Busan, Korea

11. Megan O'Sadnick, Chris Petrich, Nga Dang Phuong, The Entrainment and Migration of Crude Oil in Sea Ice, the Use of Vegetable Oil as a Substitute, and Other Lessons from Laboratory Experiments // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
12. Aleksandr Tezikov, Andrei Afonin, Vitaly Kljuev, Research of Quantitative Indicators of Tightness of the Northern Sea Route (NSR) // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
13. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Терентьева Д.В., Моделирование экологических рисков загрязнения окружающей среды углеводородами при их транспортировке в Карском море танкерами // Метеорологический вестник; Санкт-Петербург, Том 8, № 1, с. 59-87, 2016
14. G.W. Timco, W.F. Weeks, A review of the engineering properties of sea ice // Cold Regions Science and Technology, Volume 60, Issue 2, February 2010, Pages 107-129. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.10.003
15. Гольдштейн Р.В., Осипенко М.Н., Некоторые вопросы механики прочности морского льда // Физическая мезомеханика, том 17, № 6, с. 59-69, 2014
16. Тимофеев О.Я., Сазонов К.Е., Добродеев А.А., Бокатова Е.А., Саперштейн И.А., Исследование прочностных свойств морского льда в обеспечение создания программных комплексов для расчета ледовой нагрузки // Труды Крыловского государственного научного центра. № 4 (386), с. 41-49, 2018
17. Политько В.А., Кантаржи И.Г., Исследуемые характеристики льда, необходимые для определения ледовых нагрузок // Вестник МГСУ, № 12, с. 106-117, 2015
18. Roman B. Guzenko, Yevgeny U. Mironov, Ruslan I. May, Viktor S. Porubaev, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov, Konstantin A. Kornishin, Yaroslav O. Efimov, Petr A. Tarasov, Morphometry and Internal Structure of Ice Ridges in the Kara and Laptev Seas // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 647-654
19. Alexey K. Naumov, Elena A. Skutina, Nikolay V. Golovin, Nikolay V. Kubyshev, Igor V. Buzin, Yuri P. Gudoshnikov, Andrey A. Skutin,

Peculiarities of morphometric features and inner structures of the ridged formations in the Ob' Bay // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 684-890

20. Pernas-Sánchez J, Pedroche D, Varas D, López-Puente J, Zaera R., Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts // International Journal of Solids and Structures (2012) 49(14), p. 1919-1927, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.038

21. Hopkins M, Tuhkuri J, Compression of floating ice fields // Journal of Geophysical Research: Oceans (1999) 104(C7), p. 15815-15825, DOI: 10.1029/1999jc900127

22. Mikko Suominen, Arttu Polojärvi, Annu Oikkonen, Ridge Profile Measurements for Understanding Ridge Resistance // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

23. Evgenii Salganik, Knut Vilhelm Høyland, Aleksey Shestov, Thermodynamics and Consolidation of Ice Ridges for Laboratory Scale // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

24. Hanyang Gong, Arttu Polojärvi, Jukka Tuhkuri, Preliminary 3D DEM Simulations on Ridge Keel Resistance on Ships // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

25. Meng Zhang, Harsha Cheemakurthy, Karl Garne & Magnus Burman, An Analytical Model for Ice Impact Load Prediction // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar

References:

1. S.V. Babich, A. A. Yakovleva, Transport and logistics potential of the Northern Sea Route in the Eurasian economic space // Russian Arctic, Moscow, issue 4, p. 5-14, 2019 (In Russian)

2. Minyang Zhang, Di Zhang, Shanshan Fu, Xiping Yan, Chi Zhang, A Method for Planning Arctic Sea Routes Under Multi-Constraint Conditions // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

3. Chi Zhang, Di Zhang, Shanshan Fu, Mingyang Zhang, Interpretative Structural Modeling of Ship Energy Efficiency in Arctic Navigation // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

4. <http://yamallng.ru/press/news/37034/> – Site of «YAMAL LNG» project, reference date – 20.06.2019

5. <https://www.ashipping.ru/geo/49/> – Site of «ASCO» Company, reference date – 20.06.2019

6. Frédéric Jean Louis Hannon, Shipping LNG from the Arctic: A True Story // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 866-874

7. <https://www.vestifinance.ru/articles/103595> – Site of «Vesti E'konomika» information agency, reference date – 20.06.2019

8. Hyeok Geun Ki, Joong Hyo Choi, Sung Gun Park, Sung Kon Han, Ice Collision Analysis and Alternative Full Scale Impact Test for ARC 7 LNG Carrier // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

9. Liyanarachchi W. A. de Silva, Hajime Yamaguchi, Numerical Study of Oil Spilled Behavior under Ice-Covered Area in the East Siberian Sea // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

10. Hossein Babaei, David Watson and Richard Burcher, Verification and Validation of An in-Ice Oil Spill Trajectory Model Based on Satellite-Derived Ice Drift Data // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

11. Megan O'Sadnick, Chris Petrich, Nga Dang Phuong, The Entrainment and Migration of Crude Oil in Sea Ice, the Use of

Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 807-814

26. Лебедев А.А., Романов И.П., Уралов Н.С., Оценка приращения толщины ледяного покрова Арктического бассейна за счёт торосистых образований // Труды ААНИИ, том 396 «Исследование ледяного покрова полярных областей», Ленинград, ГМИ, 1985, с. 6-22

27. Миронов Е.У., О сезонной изменчивости торосистости // Труды ААНИИ, том 396, «Исследование ледяного покрова полярных областей», Ленинград, ГМИ, 1985, с. 38-45

28. Марченко А.В. Особенности формы и пространственного распределения торосов / Ледяные образования морей Западной Арктики. Под. ред. Г.К. Зубакина. СПб, ААНИИ, 2006. 272 с. С. 198-201

29. Бресткин С.В., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С., Фоломеев О.В. Обеспечение гидрометеорологической безопасности в Арктическом регионе // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктическом регионе. Безопасный город в Арктике.». 2016. МЧС России. С. 68-72

30. Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт» Стандарт организации СТО ГГИ 52.08.41-2017, «Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов, Рекомендации по расчету» // СПб: 2017

Vegetable Oil as a Substitute, and Other Lessons from Laboratory Experiments // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

12. Aleksandr Tezikov, Andrei Afonin, Vitaly Kljuev, Research of Quantitative Indicators of Tightness of the Northern Sea Route (NSR) // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea

13. V.Yu. Tretyakov, S.V. Frolov, D.V. Terentyeva, Simulation of ecological risks of environment pollution by hydrocarbons during their transportation within the Kara Sea by tankers // Meteorologicheskij vestnik, St. Petersburg, volume 8, issue 1, p. 59-87, 2016 (In Russian)

14. G.W. Timco, W.F. Weeks, A review of the engineering properties of sea ice // Cold Regions Science and Technology, Volume 60, Issue 2, February 2010, Pages 107-129. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.10.003

15. R.V. Goldstein and N.M. Osipenko, Some aspects of the mechanics of sea ice strength // Physical mesomechanics, vol. 17, issue 6, p. 59-69, 2014 (In Russian)

16. O. Timofeev, K. Sazonov, A. Dobrodeev, Ye. Bokatova, I. Sapershtein, Strength studies of sea ice in support of software development for ice load calculation // Trudy` Kry'lovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, issue 4 (386), p. 41-49, 2018 (In Russian)

17. V.A. Polit'ko, I.G. Kantarzhii, Characteristics of ice, needed for ice loadings determination // Vestnik MGSU. Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering, issue 12, p. 106-117, 2015 (In Russian)

18. Roman B. Guzenko, Yevgeny U. Mironov, Ruslan I. May, Viktor S. Porubaev, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov, Konstantin A. Kornishin, Yaroslav O. Efimov, Petr A. Tarasov, Morphometry and Internal Structure of Ice Ridges in the Kara and Laptev Seas // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 647-654

19. Alexey K. Naumov, Elena A. Skutina, Nikolay V. Golovin, Nikolay V. Kubyshkin, Igor V. Buzin, Yuri P. Gudoshnikov, Andrey A. Skutin, Peculiarities of morphometric features and inner structures of the ridged formations in the Ob' Bay // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 684-890

20. Pernas-Sánchez J, Pedroche D, Varas D, López-Puente J, Zaera R., Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts // International Journal of Solids and Structures (2012) 49(14), p. 1919-1927, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.038
21. Hopkins M, Tuhkuri J, Compression of floating ice fields // Journal of Geophysical Research: Oceans (1999) 104(C7), p. 15815-15825, DOI: 10.1029/1999jc900127
22. Mikko Suominen, Arttu Polojärvi, Annu Oikkonen, Ridge Profile Measurements for Understanding Ridge Resistance // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
23. Evgenii Salganik, Knut Vilhelm Høyland, Aleksey Shestov, Thermodynamics and Consolidation of Ice Ridges for Laboratory Scale // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
24. Hanyang Gong, Arttu Polojärvi, Jukka Tuhkuri, Preliminary 3D DEM Simulations on Ridge Keel Resistance on Ships // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11-16, 2017, Busan, Korea
25. Meng Zhang, Harsha Cheemakurthy, Karl Garne & Magnus Burman, An Analytical Model for Ice Impact Load Prediction // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019, p. 807-814
26. Lebedev A.A., Romanov I.P., Uralov N.S., Ocenka prirashheniya tolshhiny` ledyanogo pokrova Arkticheskogo bassejna za schyot torosisty`x obrazovaniy // Trudy` AANII, vol. 396 «Issledovanie ledyanogo pokrova polyarny`x oblastej», Leningrad, GMI, 1985, p. 6-22 (In Russian)
27. Mironov E.U., O sezonnoj izmenchivosti torosistosti // Trudy` AANII, vol. 396 «Issledovanie ledyanogo pokrova polyarny`x oblastej», Leningrad, GMI, 1985, p. 38-45 (In Russian)
28. Marchenko A.V., Osobennosti formy` i prostranstvennogo raspredeleniya torosov / Ledyany`e obrazovaniya morej Zapadnoj Arktiki. Pod. red. G.K. Zubakina. SPb, AANII, 2006. 272 p. P. 198-201 (In Russian)
29. Brestkin S.V., By`chenkov Yu.D., Devyataev O.S., Folomeev O.V., Securing Hydro-Meteorological Safety of the Arctic Region // Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy` preduprezhdeniya i likvidacii chrezvy`chajny`x situacij v Arkticheskom regione. Bezopasny`j gorod v Arktike», 2016, MChS Rossii. P. 68-72 (In Russian)
30. Gosudarstvennoe uchrezhdenie «Gosudarstvenny`j gidrologicheskij institut» Standart organizacii STO GGI 52.08.41-2017, «Osnovny`e gidrologicheskie xarakteristiki pri nestacionarnosti vremenny`x ryadov, obuslovlennoj vliyaniem klimaticheskix faktorov, Rekomendacii po raschetu» // SPb: 2017 (In Russian)