

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

канд. геогр. наук В.Ю. ТРЕТЬЯКОВ, зав. лаб. С.В. ФРОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: v_yu_tretyakov@mail.ru, svf@aari.ru

Рассматривается методология моделирования риска аварийных ситуаций, вызываемых сжатиями судов дрейфующим льдом. В модели способом Монте-Карло имитируется статическое воздействие льда на корпус судна. При этом учитывается воздействие как ровного льда, так и консолидированного слоя гряд торосов. Приводятся результаты апробации модели для маршрута Морская ледостойкая платформа «Приразломная» – п. Мурманск.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, сжатие льда, моделирование рисков.

Цель данной работы заключалась в разработке методики оценки ущерба из-за аварийных ситуаций с танкерами из-за сжатий дрейфующих льдов, приводящих к разливам углеводородов. Для апробации методики были выполнены оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на рекомендованных маршрутах плавания танкеров по Баренцеву морю.

Стратегическое планирование морских транспортных систем на длительные периоды их функционирования требует выполнения оценки рисков. Наиболее распространен подход к определению риска неблагоприятного события, учитывающий не только вероятность события, но и «вес» его негативных последствий. Поэтому риск R может быть определен как произведение вероятности опасности рассматриваемого события или процесса P на величину ожидаемого ущерба Z : $R = P \cdot Z$. Здесь понятие «риск» объединяет два понятия – «вероятность опасности» и «величина ущерба». Для измерения величины ущерба универсальным представляется использование стоимостного выражения последствий неблагоприятного события (финансовый риск), что позволяет объективно выбрать оптимальную стратегию.

Оценивание рисков при танкерной транспортировке углеводородов является развивающимся направлением современной науки [Фрумин, Белов, 2006; Берковиц, Биненко, Донченко, 2006; Фрумин, Мохсен, 2009]. Однако оценка рисков производится на основе мировой статистики, без учета специфики взаимодействия судов с ледяным покровом. При ледокольной проводке танкеров возможны две специфические причины возникновения аварийной ситуации. Во-первых, это столкновение танкера с льдиной, торосистым образованием в проложенном ледоколом канале или столкновение с кромкой канала. Здесь возможно определение максимальной безопасной скорости движения судна в зависимости от его прочностных свойств и характеристик ледяного покрова. Строгое соблюдение правил судоходства позволяет исключить подобные аварийные ситуации, относящиеся к классу аварийных ситуаций «человеческого фактора». Вторая возможная причина аварии – сжатие танкера

сходящимися кромками канала. Это форс-мажорное обстоятельство, которого невозможно избежать. Авария является результатом статического взаимодействия корпуса судна и морского льда при прочности элемента ледяного покрова, превышающей прочность корпуса судна.

Для оценки риска необходимо знать значения двух параметров: вероятности аварийной ситуации и ущерба, возникающего при ее наступлении. Приводящие к аварийным ситуациям обстоятельства слишком разнообразны, чтобы использовать статистические данные по ограниченному числу произошедших с судами различных типов событий. Выход – в методе статистического моделирования Монте-Карло. Его суть в следующем: пусть какое-либо событие (в нашем случае – аварийная ситуация с судном) наступает при определенном совпадении значений ряда параметров, рассматриваемых как случайные величины. Законы статистического распределения значений параметров известны. В компьютерных алгоритмических языках программирования существуют функции генерации случайных чисел. Это либо целые числа от 0 до 100, либо дробные от 0 до 1. Если рассматривать случайные числа в диапазоне от 0 до 1 в качестве квантилей интегральных функций распределения параметров модели, то по значениям квантилей можно определять сами значения параметров. При каждом модельном испытании в соответствии с полученными значениями параметров определяется, наступило ожидаемое событие (в нашем случае – аварийная ситуация) или нет. Серия модельных расчетов (модельный эксперимент) выполняется до тех пор, пока отношение числа наступления события к общему числу испытаний не становится устойчивым. При проведении ряда модельных экспериментов полученная вероятность наступления события является случайной величиной. Метод Монте-Карло не может дать ответ, когда произойдет авария, но может определить вероятность аварии и число аварий за достаточно длительный период времени. Для этого необходимо знать статистические распределения модельных параметров. Эти распределения можно получить на основании натуральных данных либо определить теоретически.

В лаборатории изучения ледового плавания ААНИИ разработаны и совершенствуются компьютерная статистическая модель определения вероятности наступления аварийной ситуации из-за сжатия судна дрейфующими льдами и программа расчета экологического ущерба из-за аварийного разлива нефти. В модели оценки вероятности аварийных ситуаций определяющим параметром является максимальное давление, которое способно испытывать судно в районе миделя. В модели судно может находиться или просто в зоне сжатия без учета его силы, или вне зон сжатия. Если судно попадает в зону сжатия, то выполняется определение максимально возможного давления льда на корпус судна, которое для случая статического взаимодействия не может превышать предела прочности льда. Если максимальное давление льда превышает предел прочности корпуса судна, то в модели происходит аварийная ситуация. Цель схемы моделирования заключается в оценке количества аварийных ситуаций за длительный период времени. Полученное отношение числа аварийных ситуаций к общему числу транспортных операций численного эксперимента является оценкой вероятности возникновения аварийной ситуации во время одного плавания.

Движение каравана или отдельного судна моделируется только в сплоченных дрейфующих льдах, т.к. только в них возможна аварийная ситуация из-за сжатия льда. Атрибуты ледовых зон рассматриваются как случайные величины. Для моделирования отдельных плаваний используется генератор случайных чисел компьютера и

законы распределения параметров ледяного покрова, которые задаются во внешних текстовых файлах. Перед началом численного эксперимента пользователь с помощью интерфейса модели выбирает файлы распределений параметров. Модель реализована в среде создания приложений Borland Delphi 7.0. Имитируется разрушение борта судна в районе миделя из-за воздействия как ровного льда, рассматриваемого как пластина постоянной толщины, так и перпендикулярной борту судна гряды торосов, рассматриваемой в качестве балки на упругом основании – водной толще. Расчет нагрузки на борт ровного льда выполняется по толщине льда максимального возраста. Предел прочности ровного льда на сжатие определяется как минимальная величина из прочностей льда на раздробление и на излом. Прочность корпуса судна рассчитывается в зависимости от ледового класса и водоизмещения судна в соответствии с Правилами Российского Морского регистра судоходства. Вызывающая раздробление льда локальная погонная нагрузка на борт судна q_c рассчитывается как произведение прочности льда при одноосном сжатии на толщину ровного льда [Попов и др., 1967]. Величина локальной погонной нагрузки q_b , вызывающей излом ледяной пластины, рассчитывается по выражениям [Попов и др., 1967; Фаддеев, Хейсин, 1985]:

$$q_b = \sqrt{\rho g D}, \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (2)$$

В выражении (1) ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, D – цилиндрическая жесткость ледяной пластины; в выражении (2) E – модуль Юнга льда, h – толщина ледяной пластины, μ – коэффициент Пуассона, т.е. отношение модуля поперечной деформации к модулю растяжения (Юнга). В модели его значение равно 0,33. Выбирается меньшая нагрузка из нагрузок раздробления льда и его изгиба. Для перехода от локальной погонной нагрузки с размерностью н/м к давлению с размерностью н/м² (паскали) погонная нагрузка делится на протяженность зоны контакта «лед – корпус судна» по вертикали. Принято, что протяженность зоны контакта по вертикали совпадает с толщиной льда.

При торосистости не более 2 баллов сохраняется возможность обхода торосистых образований, торосистость свыше 2 баллов вынуждает ледокол следовать не только по ровным участкам, но и преодолевать торосистые образования [Бузуев, 1982]. Средний угол между перпендикуляром к генеральному направлению гряды торосов и курсом судна составляет 15° [Бузуев, 1982]. Поэтому упирающийся в борт судна консолидированный слой гряды торосов рассматривается как балка, прикрепленная к пластине ровного льда и лежащая на сплошном упругом основании – морской воде.

Перед началом численного эксперимента задаются законы распределения параметров модели. Пользователь имеет возможность просмотра графиков распределений. Вероятность сжатия в сплоченных льдах задается выбором текстового файла с этой величиной. Ряд параметров вводится с клавиатуры: это отношение ширины основания гряды торосов к ее высоте, значение модуля Юнга для льда, пределы прочности молодого, тонкого, среднего и толстого льда. Также необходимо выбрать из списка класс ледовых усилений судна и ввести с клавиатуры водоизмещение судна. Пользователь должен выбрать вариант работы модели: с автоматическим или принудительным прекращением имитации плаваний в одном численном эксперименте. В первом случае эксперимент продолжается до тех пор, пока отношение суммарного

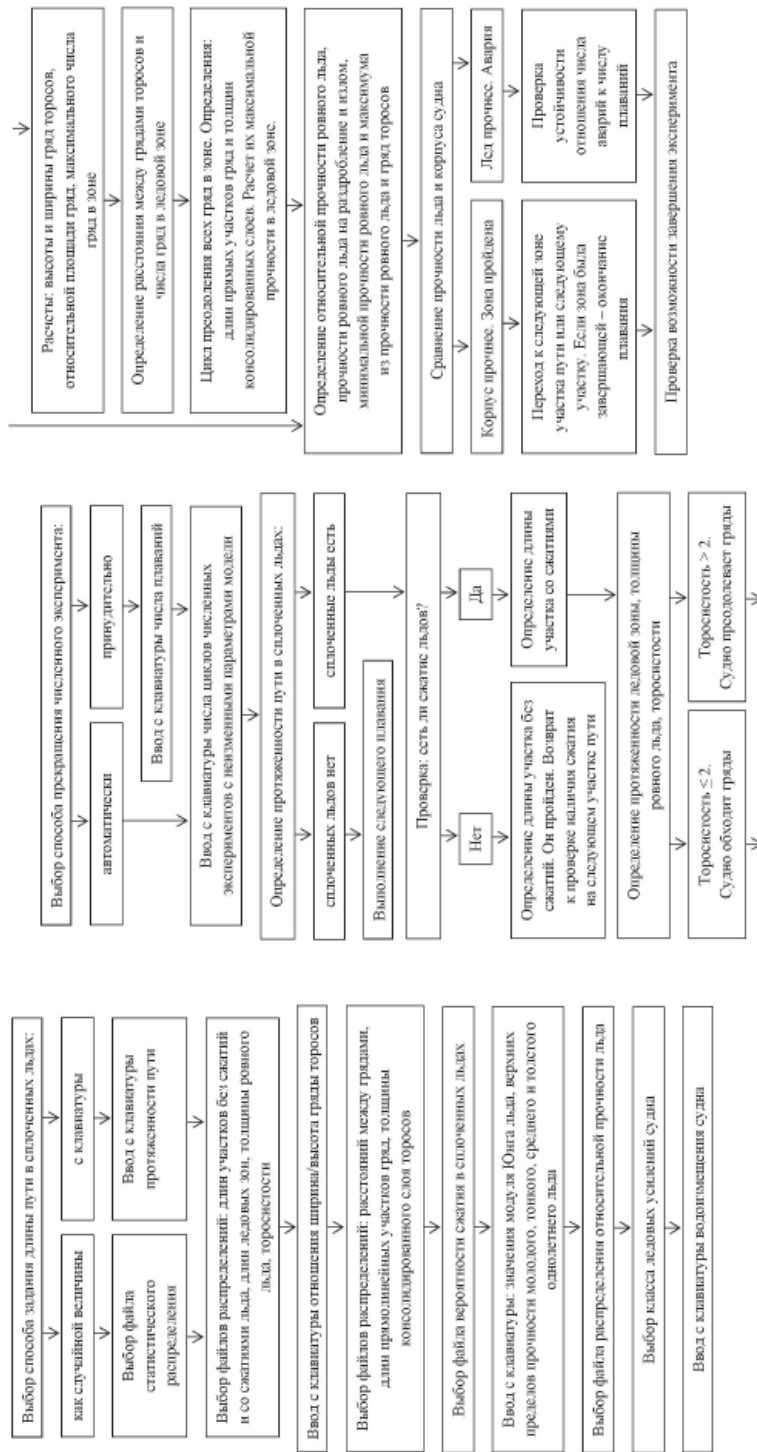


Рис. 1. Схема задания параметров эксперимента (слева) и его выполнения (в центре и справа).

количества аварийных ситуаций к общему числу плаваний не стабилизируется. Во втором – пользователь задает количество плаваний в каждом эксперименте. При этом параметры модели остаются неизменными. На рис.1 представлена схема задания параметров численного эксперимента и его выполнения.

По завершении численного эксперимента пользователь может выбрать: повторить численный эксперимент с неизменными значениями параметров и статистическими распределениями случайных величин или завершить компьютерное моделирование и записать его результаты во внешний текстовый файл.

Предлагается следующий алгоритм моделирования вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий льдов. Год разбивается на отдельные декадные (полумесечные или месячные) интервалы. Для каждого интервала, приходящегося на период существования ледяного покрова, определяется отношение числа аварий к числу плаваний. Для этого выполняется не менее 30 численных экспериментов с принудительным завершением каждого при выполнении определенного количества плаваний. Это количество определяется как возможное число плаваний, приходящихся на данный внутригодовой интервал за весь период существования данной морской транспортной системы. В этом случае вероятность аварии выступает в качестве случайной величины со своим математическим ожиданием (МО) и средним квадратичным отклонением (СКО). Для каждого интервала определяется сумма МО и утроенного СКО. Затем определяется среднегодовая сумма МО и утроенного СКО вероятности аварии. Если все интервалы имеют одинаковую длительность и при этом количество приходящихся на них рейсов также одинаково, т.е. морские перевозки осуществляются круглогодично и равномерно, то среднегодовая вероятность аварии определяется как среднее арифметическое подобных сумм для отдельных внутригодовых интервалов. В противном случае в зависимости от доли от общего числа рейсов, приходящихся на каждый интервал, рассчитывается вес интервалов и при определении среднегодовой суммы МО и утроенного СКО вероятности аварии учитывается неравномерность интенсивности навигации внутри календарного года. Разумеется, для интервалов с отсутствием ледяного покрова вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий льдов равны нулю. Максимальное количество аварий определяется как произведение среднегодовой суммы МО и утроенного СКО вероятности аварии на общее количество рейсов за весь период эксплуатации транспортной системы. Разумеется, нет гарантии, что не случится большее количество аварий. Однако для нормально распределенной величины вероятность этого события согласно «правилу трех сигм» составляет всего 0,15 %, поэтому для расчетов ожидаемого убытка предлагается использовать именно этот алгоритм.

С помощью генератора случайных чисел и заданного распределения объемов разливов нефти при авариях определяем количество вылившейся нефти. Ущерб грузовладельца равен произведению этого количества на рыночную цену нефти. Объем потерянной нефти может рассматриваться как случайная величина, рассчитываемая на основании заданного закона распределения объемов вылившейся нефти при имевших место авариях. Стоимость углеводородного сырья также может рассматриваться как случайная величина. Эмпирическое распределение этой величины может быть определено на основании статистических данных по средним мировым ценам на углеводородное сырье за последние десять-пятнадцать лет. В качестве первого приближения можно продолжить тренд цены за последние десятилетия и рассчитывать ущерб исходя из прогнозируемой цены в середине периода эксплуатации морской транспортной системы.

Ущерб судовладельца складывается из затрат на ремонт судна или остаточной стоимости судна при его потере и упущенной выгоды. Упущенная выгода судовладельца определяется перемножением суточной расценки фрахта за вычетом эксплуатационных расходов и издержек, а также суточного амортизационного снижения стоимости судна, т.е. суточной чистой прибыли судовладельца, и продолжительности периода вывода судна из эксплуатации.

Существуют два методологических подхода к определению экономического ущерба в результате загрязнения окружающей среды [Светлов, Гулькова, 2006]: косвенный (укрупненный) и реципиентный (на основании суммирования убытков конкретных потерпевших). Косвенный подход к оценке экономического ущерба предполагает использование ряда показателей, отражающих значения факторов, определяющих величину ущерба; произведение этих показателей определяет величину экономического ущерба. Примером реализации косвенного подхода при оценке экономического ущерба от загрязнения окружающей среды служит «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства», принятая Министерством природных ресурсов РФ. Данная методика определения экологического ущерба реализована нами в виде компьютерного приложения, разработанного в интегрированной среде Delphi 7.0.

Для апробации модели был выполнен ряд численных экспериментов с имитацией плаваний танкеров типа «Василий Динков» по маршруту Морская ледостойкая платформа «Приразломная» – Мурманск. Статистические распределения параметров модели были определены по данным экспедиций ААНИИ и результатам обработки космических снимков за 1978–1979, 2002–2003, 2005–2006, 2009–2010 гг. Для случая экстремально тяжелых условий отношение числа аварий к числу плаваний (вероятность возникновения аварийной ситуации) составляет: в декабре – 0,003; в январе – 0,005; в феврале – 0,003; в марте – 0,024; в апреле – 0,037. Вероятность аварийных ситуаций из-за сжатий льда в другое время года равна нулю. Планируется выполнить серию экспериментов с моделью для определения вероятностей аварийных ситуаций и объемов ущерба при долгосрочном функционировании морских систем транспортировки углеводородного сырья по стандартным маршрутам плаваний в Баренцевом и Карском морях. Это позволит учитывать величину ожидаемого ущерба при стратегическом планировании морских транспортных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берковиц А.В., Биненко В.И., Донченко В.К. Экологические риски, связанные с транспортировкой углеводородов, и безопасность Балтийского моря // Сборник тезисов VII Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: ООО «Изд-во “Диалог”», 2006. С. 532–538.

Бузев А.А. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 74 с.

Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Л.: Судостроение, 1967. 224 с.

Светлов И.Б., Гулькова С.Г. Механизм управления природно-техническими системами ТЭК. Владивосток: Дальнаука, 2006. 123 с.

Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е. Определение структуры формул для оценки взаимодействия ледяного покрова с конструкциями // Труды ААНИИ. 1985. Т. 391. С. 55–62.

Фрумин Г.Т., Белов Д.М. Оценка рисков аварий танкеров // Материалы Всероссийской конференции «Риск-2006». М.: Изд-во РУДН, 2006. С. 279–281.

Фрумин Г.Т., Мохсен А.М.А. Анализ риска при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов // Сборник тезисов X Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: ООО «Макси-Принт», 2009. С. 67–69.

V.YU.TRETYAKOV, S.V.FROLOV

MODEL OF AN ESTIMATION OF NAVIGATION RISKS IN DRIFTING ICE

Methodology of simulation of risk of accidental situations which are caused by nip of vessels due to ice compacting is considered. The model simulates static impact of drift ice upon a ship hull by means of the Monte-Carlo method. There is taking into account both level ice impact and one of the consolidated layer of the ridge. The results of the model testing for the navigation operations along the standard route between the oil field “Prirazlomnoye” and the port of Murmansk are presented.

Keywords: navigation risk simulation, ice compression, ice conditions.