

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
1. Математические модели оценки риска столкновения судов	11
1.1. Математическая модель столкновения в потоке встречных судов.....	11
1.2. Математическая модель столкновения судов, движущихся параллельными курсами.....	20
1.3. Математическая модель столкновения судов при пересечении трафика под прямым углом	28
1.4. Математическая модель столкновения судов при движении произвольными курсами.....	34
1.5. Математическая модель столкновения в произвольном потоке судов.....	60
1.6. Краткий анализ состояния проблемы учета человеческого фактора.....	71
1.7. Структура коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях	74
1.8. Учет человеческого фактора при оценке вероятности столкновения судов.....	81
2. Использование новых конструктивных решений с целью ограничения последствий столкновений судов....	85
2.1. Конструкции бульбовых наделок с повышенной продольной податливостью.....	85
2.2. Расчет бульбовых наделок.....	100
2.3. Экспериментальное исследование несущей способности бульб на конструктивно-подобных моделях из жести.....	115
2.4. Оценка эффективности установки на судах предлагаемой конструкции бульб.....	124
2.5. Анализ существующих методов расчета энергоемкости судовых корпусных конструкций	126
2.6. Оценка эффективности подкреплений при столкновении судов.....	139
2.7. Разработка методики расчета поглощенной энергии при столкновении судов и экспериментальные исследования деформационных характеристик ширстречного узла при внедрении в него форштевня таранящего судна.....	142
3. Разработка конструктивных мероприятий, снижающих последствия посадки судов на мель.....	155
3.1. Обеспечение прочности днищевых конструкций судна при движении в условиях ограниченной акватории.....	155

3.2. Математическая модель оценки риска посадки судов на мель.....	166
3.3. Разработка конструктивной днищевой защиты жизненно важных районов корпуса судна.....	171
3.4. Использование трубчатых элементов конструктивной защиты для снижения последствий посадки судов на мель.....	176
3.5. Повышение энергоемкости днищевого перекрытия с трубчатыми элементами конструктивной защиты.....	184
3.6. Другие варианты реализации конструктивной днищевой защиты.....	188
4. Захват волнной носовой оконечности судов на встречном волнении.....	198
4.1. Авария танкера «Находка» в сложной динамической среде...	198
4.2. Результаты моделирования динамики взаимодействия носовой оконечности с волной.....	201
4.3. Определение дополнительных изгибающих моментов, действующих на корпус судна в условиях захвата волной его носовой оконечности.....	205
4.4. Сценарии гибели нефтерудовоза MV «Derbyshire»	207
4.5. Экспериментальное исследование остойчивости судов в условиях захвата волной носовой оконечности.....	215
4.6. Расчетный анализ остойчивости судов в условиях захвата волной носовой оконечности.....	222
4.7. Математическое моделирование качки судов на встречном волнении при зарывании судна носом в волну....	230
4.8. Экспериментальное исследование качки судов на встречном волнении при зарывании судна носом в волну...	236
4.9. Определение гидродинамических характеристик носовой оконечности судна при ее обтекании потоком жидкости.....	242
4.10. Обеспечение безопасности судна в условиях захвата волной носовой оконечности.....	257
4.11. Конструктивные мероприятия, снижающие нагрузки на носовую оконечность судна в условиях захвата волной.....	262
4.12. Конструктивные мероприятия, уменьшающие качку и заливаемость в условиях развитого волнения.....	271
4.13. Разработка конструкций судов с изменяемой геометрией корпуса.....	275
4.14. Использование данных моделирования при построении алгоритма контроля ситуации методами современной теории катастроф.....	283
Заключение.....	285
Литература.....	287

CONTENTS

Introduction.....	7
1. Mathematical models for assessing the risk of collision of ships.....	11
1.1. Mathematical model of collision in the stream of oncoming ships.....	11
1.2. Mathematical model of collision of ships moving parallel courses.....	20
1.3. Mathematical model of collision of ships at the intersection of traffic at a right angle.....	28
1.4. Mathematical model of the collision of ships when moving arbitrary courses.....	34
1.5. Mathematical model of collision in an arbitrary stream of ships.....	60
1.6. A brief analysis of the state of the human factor accounting problem.....	71
1.7. Structure of the coefficient considering the human factor at navigational accidents.....	74
1.8. Consideration of the human factor when assessing the probability of collision of vessels.....	81
2. The use of new design solutions to limit the effects of ship collisions.....	85
2.1. Constructions of bulbs with increased longitudinal flexibility...	85
2.2. Calculation of the bulb endings.....	100
2.3. An experimental study of the carrying capacity of bulbs on structurally similar tin models.....	115
2.4. Assessment of the effectiveness of the installation of the bulbs of proposed design on ships	124
2.5. Analysis of existing methods for calculating the energy intensity of ship hull structures.....	126
2.6. Evaluation of the effectiveness of reinforcements in the collision of vessels.....	139
2.7. Development of methods for calculating the absorbed energy in the collision of vessels and experimental studies of the deformation characteristics of the sheerstrake during the penetration of the stem of the ramming vessel.....	142
3. The development of constructive measures to reduce the effects of landing of ships aground.....	155
3.1. Ensuring the strength of the bottom structures of the vessel when navigating in a limited water area.....	155
3.2. A mathematical model for estimating the risk of landing of ships aground.....	166

3.3. Development of constructive bottom protection of vital vessel hull areas.....	171
3.4. The use of tubular structural protection elements to reduce the effects of landing ships aground.....	176
3.5. Increasing the energy intensity of the bottom ceiling with tubular elements of structural protection.....	184
3.6. Other options for the implementation of constructive bottom protection.....	188
4. The seizure of the bow of vessel by oncoming wave.....	198
4.1. The accident of the tanker “Nakhodka” in a complex dynamic environment.....	198
4.2. The results of modeling the dynamics of the interaction of the ship’s bow with oncoming wave	201
4.3. Determination of additional bending moments acting on the vessel’s hull during seizure of its bow by the oncoming wave.....	205
4.4. Scenarios for the loss of ore-oil carrier MV “Derbyshire”.....	207
4.5. An experimental study of the vessel’s stability during seizure of its bow by the oncoming wave.	215
4.6. Calculative analysis of the vessel’s stability during seizure of its bow by the oncoming wave	222
4.7. Mathematical modeling of the vessel’s rolling on the headwaters when its bow buried in a wave.....	230
4.8. Experimental study of the vessel’s rolling on the headwaters when its bow is buried in a wave.....	236
4.9. Hydrodynamics of the vessel’s bow in the oncoming fluid flow.....	242
4.10. Ship safety ensuring during its bow seizure by wave.....	257
4.11. Constructive measures that limit the load on the vessel’s bow during its seizure by wave.....	262
4.12. Constructive measures reducing rolling and flooding in conditions of rough sea motion.....	271
4.13. Development of ships with controllable hull geometry.....	275
4.14. Using simulated data for construction of algorithm of situational control by means of catastrophe theory.....	283
Conclusions.....	285
References.....	287

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация судов сопряжена с возникновением чрезвычайных ситуаций, связанных с гибелью судов, о чем свидетельствуют данные статистики. Полная потеря судов мирового флота с тоннажем более 500 регистрационных тонн по годам в процентах от мирового флота представлена на рисунке В.1 [104]. Рисунок показывает, что общая тенденция гибели судов несколько снижается, однако если учесть, что и число судов мирового флота ежегодно возрастает, то в абсолютных единицах число погибших судов по годам достаточно высоко.

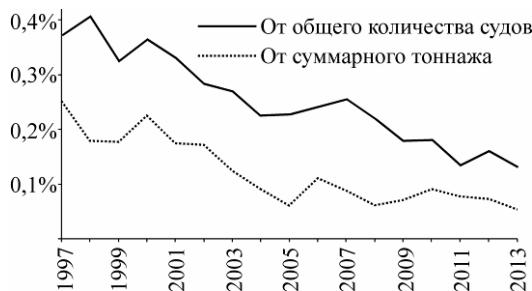


Рис. В.1. Полная потеря судов мирового флота с тоннажем более 500 регистрационных тонн по годам в процентах от мирового флота

Потери судов по видам чрезвычайных ситуаций представлены на рисунке В.2, из которого следует, что, несмотря на постоянное совершенствование навигационного оборудования, чрезвычайные ситуации из-за навигационных ошибок (столкновения, посадки на мель) составляют в сумме почти 40% от всех видов чрезвычайных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации судов [104].

Огромный материальный ущерб нанесла гибель танкеров «Торри каньон», «Амоко Кадис», «Атлантик Эмпресс», «Экссон Вальдез», «Браэр», «Находка» и многих других, сопровождавшаяся к тому же существенным загрязнением окружающей среды. Наряду с материальными потерями аварии на море часто сопровождаются гибелю людей. Катастрофы лайнеров «Титаник», «Андреа Дориа», «Коста Конкордия», парохода «Адмирал Нахимов», паромов «Ян Хевелиуш», «Эстония», «Севоль», траулеров «Севск», «Себеж», «Нахичевань», «Бокситогорск», «Карага», «Кафор», «Дальний Восток» и многих других свидетельствуют о том, что мореплавание является зоной повышенного риска для человека.

Вот некоторые примеры типичных чрезвычайных ситуаций в морской индустрии.

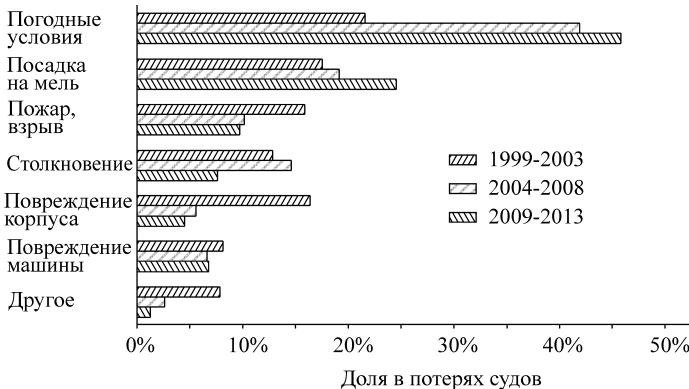


Рис. В.2. Потери судов в различных чрезвычайных ситуациях

К наиболее тяжелым авариям относится столкновение парохода «Адмирал Нахимов» с теплоходом «Петр Васев» 31 августа 1986 г. в Цемесской бухте вблизи Новороссийска [40]. На борту парохода, следовавшего из Новороссийска в Сочи, были 916 пассажиров и 346 членов экипажа, а пересекающимся курсом двигался теплоход «Петр Васев», перевозивший ячмень. В ходе столкновения «Адмирал Нахимов» получил пробоину в районе 90–110-го шпангоутов правого борта в результате удара верхней части форштевня и бульба ниже ватерлинии в машинное и дизель-генераторное отделения. Из-за воздействия бульба в бортовом перекрытии образовалась пробоина площадью 80–90 м², что привело к быстрому затоплению указанных отсеков. Судно резко накренилось на поврежденный борт и стало тонуть. Через 7–8 мин крен парохода «Адмирал Нахимов» достиг 60° при наличии некоторого дифферента на корму, и судно затонуло на глубине 47 м, при этом погибли 423 человека. Анализ показал, что главную роль в данной трагедии сыграла конструкция носовой оконечности теплохода «Петр Васев», содержащая жесткий носовой бульб, который практически не претерпел деформации в ходе столкновения. Данное обстоятельство подтверждает недостаток конструктивных решений при проектировании носовых бульбов и свидетельствует о необходимости совершенствования конструктивного оформления носовой оконечности судов для повышения безопасности мореплавания.

Другим примером тяжелой аварии может служить произошедшее 25 ноября 1975 г. [57] в проливе Ла-Манш столкновение большого автономного траулера (БАТ) «Горизонт» и марокканского теплохода «Ифни». При волнении 3–4 балла и хорошей видимости БАТ «Горизонт» вел промысел на выходе из Северного моря в пролив Ла-Манш, при этом на судне имелись все положенные огни. Однако в 16 ч 50 мин

теплоход «Ифни» (Марокко), который шел с траулером параллельным курсом, развернулся почти на 90° и на скорости около 20 узлов врезался в левый борт БАТ «Горизонт», несмотря на предупредительные сигналы его экипажа. Удар произошел под углом $40\text{--}45^\circ$ к диаметральной плоскости и привел к значительному объему повреждений корпусных конструкций протараненного судна, а также затоплению ряда помещений, в том числе в районе машинного отделения. Судно накренилось на левый борт на величину порядка 20° и приобрело значительный дифферент на корму, при этом ситуация продолжала ухудшаться. Была проведена эвакуация членов экипажа, а судно продолжало погружаться, и его крма коснулась дна на глубине порядка 52 м, причем над водой выступала носовая оконечность, полное погружение которой произошло почти через 6 сут после аварии.

Направлявшийся в английский порт Милфорд-Хейвен танкер «Тотгей Саунд», имея на борту 120 тыс. тонн нефти, 18 марта 1967 г. сел на скалу у островов Силли и получил пробоину [99]. При попытках снять танкер со скалы он разломился, что привело к выбросу еще большего количества нефти. Для воспламенения нефтяного пятна были проведены бомбардировки остатков судна, однако существенного улучшения ситуации добиться не удалось. Большое количество вытекшей нефти привело к экологической катастрофе, заключавшейся в загрязнении побережья и массовой гибели птиц.

Танкер «Sea Empress», перевозивший около 130 тыс. тонн сырой нефти, 15 февраля 1996 г. сел на мель в районе входа в порт Милфорд-Хейвен, в результате чего в море попало 2,5 тыс. тонн нефти [117]. Вследствие приливных явлений танкер снялся с мели, и четыре буксира удерживали его у входа в порт, так как предполагалось выполнить перевозку нефти на другие суда, но произошло ухудшение погодных условий. Была начата буксировка танкера, однако 17 февраля он вновь сел на мель, при этом порвались буксирные тросы и произошло затопление машинного отделения. Экипаж был эвакуирован с танкера 18 февраля, а шторм усилился до 9 баллов, и судно прочно село на скалы. Все дальнейшие попытки снять судно с мели успехом не увенчались. Утечка груза продолжалась, и к 20 февраля в море попало порядка 50 тыс. тонн нефти, что привело к экологической катастрофе. Наконец, 21 февраля при помощи двенадцати буксиров судно удалось отвести в порт, где была проведена откачка оставшегося на борту груза. В результате данной аварии в море попало около 72 тыс. тонн нефти.

Танкер «Находка» Приморского морского пароходства, перевозивший около 17 тыс. тонн дизельного топлива из КНР на Дальний Восток, 2 января 1997 г. в Японском море разломился на две части во время шторма. Авария произошла в 80 милях от побережья японской префектуры Шимане [123]. Кормовая часть танкера затонула на глубине 2,5 км,

а носовую часть, составлявшую примерно треть длины судна, вынесло на побережье префектуры Фукуи. Попадание в море около 5 тыс. тонн груза вызвало одну из крупнейших экологических катастроф в истории Японии. В результате аварии произошло загрязнение традиционных мест промысла морепродуктов, пострадали также морские птицы, занесенные в Красную книгу. Анализом причин гибели танкера «Находка» занимался ряд специалистов в нашей стране и за рубежом, однако единой общепринятой версии гибели судна на сегодняшний день не существует. В настоящей работе на основании анализа аварии танкера «Находка» выявлен ряд особенностей гидродинамического взаимодействия судна с внешней средой на встречном волнении, приводящих к захвату волнной носовой оконечности и гибели судов.

Расследование морских катастроф почти всегда приводит к выводам, что основной их причиной является человеческий фактор, однако это не всегда так. Большое число судов, погибших по причине нарушения устойчивости во время шторма, как полагают авторы, затонули вследствие недостаточно обоснованного архитектурно-конструктивного оформления судов в носовой оконечности, и причины этих аварий к человеческому фактору никакого отношения не имеют.

Изучение этих и множества других аварийных ситуаций позволило сформулировать цели и задачи исследования эксплуатационной прочности судов, предложить математические модели оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций и конструктивные решения, снижающие их последствия.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКА СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ

Столкновения судов являются одним из наиболее распространенных видов аварий на судах мирового флота, поэтому необходимо располагать математическим аппаратом, позволяющим оценить риск возникновения таких происшествий.

В настоящее время появляется большое число работ, посвященных проблеме столкновения судов. Рядом исследователей были предложены математические модели [112], [121], дающие возможность оценивать риск столкновения, однако они не позволяют в полной мере учитывать влияние характеристик потока судов на вероятность возникновения аварии. Главной трудностью является сложная вероятностная природа этого явления, с одной стороны, и значительное влияние на него человеческого фактора (плохо формализуемого математическими методами) – с другой. В данной главе монографии представлены разработанные авторами математические модели, позволяющие оценить риск столкновения судов. В конце главы представлены некоторые подходы к учету влияния человеческого фактора на риск возникновения данного вида аварий.

1.1. Математическая модель столкновения в потоке встречных судов

В данном параграфе представлена упрощенная модель, которая учитывает возможность столкновения со встречными судами. Она не описывает опасные ситуации при обгоне судов, следующих в одном направлении. Уточнению и усложнению данной модели будут посвящены следующие параграфы настоящей главы.

Весь анализ будет проводиться с точки зрения одного судна, которое мы для простоты будем называть просто – «нашим» [20], [101]. Все остальные суда будем называть «встречными», т. е. влияние на ситуацию со стороны всех судов, идущих в одном с нами направлении, игнорируется.

Предположим, что все суда (наше и встречные) двигаются параллельными курсами так, что их центры всегда находятся в пределах ограниченного коридора (борта могут выступать за его границы). Обозначим полуширину коридора K . Среднее число встречных судов в коридоре на протяжении одной мили обозначим Λ .

Для простоты мы будем называть W полушириной нашего судна, хотя на самом деле это полуширина зоны опасного сближения судов из-за эффекта «присасывания» (на практике это примерно трёхкратная полуширина корпуса судна). Скорость нашего судна – V . Случайную

полуширину встречных судов будем обозначать ω , а их случайную скорость – v .

Введём подвижную систему координат (рис. 1.1), начало которой всегда находится в середине коридора, ось Y ориентирована в направлении движения нашего судна. Но начало системы координат перемещается вместе с нашим судном так, что всегда его координата $y_0 = 0$. Ось X перпендикулярна оси Y . X – координата нашего судна, x_0 известна и постоянна. Случайную X -координату встречного судна – обозначим ξ .

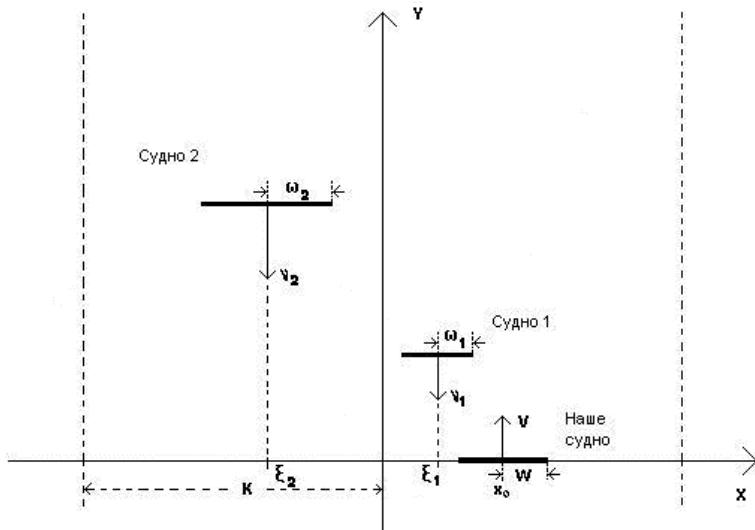


Рис. 1.1. Схема движения судов

В таблице 1.1 дается сводка всех случайных величин, описывающих встречные суда, и их характеристики.

Под столкновением встречного судна с нашим мы будем понимать наложение отрезков этих двух судов при пересечении встречным судном оси X , т. е. ситуацию, когда $|\xi - x_0| \leq W + \omega$.

Рассмотрим задачу в простейшей постановке, когда опасность столкновения игнорируется, т. е. не предпринимается никаких попыток его избежать. Естественно, в такой постановке рано или поздно столкновение неизбежно, но сейчас нас интересует только его вероятность на протяжении некоторого конечного отрезка времени. Ниже, усложнив модель, попробуем учесть попытки маневрирования во избежание столкновения.

Моменты пересечения встречными судами оси X образуют случайный пуассоновский поток с интенсивностью $\Lambda(V + N)$. Все случайные величины, описывающие ситуацию, независимы в совокупности.

Таблица 1.1

Случайные величины и их характеристики

Случайная величина	Обозначение	Функция распределения	Плотность распределения	Математическое ожидание
X -координата	ξ	F_ξ	f_ξ	Ξ
Скорость	v	F_v	f_v	N
Ширина	ω	F_ω	f_ω	Ω
Расстояние при обнаружении	ρ	F_ρ	f_ρ	P

Вероятность столкновения нашего судна с одним из встречных судов при пересечении им оси X в указанной постановке равна

$$P_1(x_0) = \int_0^{\infty} f_\omega(w) \int_{x_0-(W+w)}^{x_0+W+w} f_\xi(x) dx dw. \quad (1.1)$$

Заметим, что эта вероятность тем выше, чем шире наше судно. Обозначим

$$\bar{P}_1(x_0) = 1 - P_1(x_0). \quad (1.2)$$

Вероятность того, что на протяжении отрезка времени $[0, T]$ ровно k , $k = 0, 1, 2, \dots$ встречных судов пересечет ось X , равна

$$\frac{(\Lambda T(V+N))^k}{k!} e^{\Lambda T(V+N)}. \quad (1.3)$$

Таким образом, вероятность того, что в указанной постановке на протяжении отрезка времени $[0, T]$ столкновение не произойдет, по формуле полной вероятности равна

$$\begin{aligned} \bar{P}_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T) &= e^{-\Lambda T(V+N)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Lambda T(V+N) \bar{P}_1(x_0))^k}{k!} = \\ &= \exp\{-\Lambda T(V+N) P_1(x_0)\}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

а вероятность того, что столкновение произойдет, соответственно

$$P_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T) = 1 - \bar{P}_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T). \quad (1.5)$$

Учитывая, что обычно интересуют значения вероятностей $\bar{P}_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T)$, близкие к 1, формулы (1.4) и (1.5) с ошибкой в безопасную сторону можно заменить следующими:

$$\begin{aligned} \bar{P}_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T) &= 1 - \Lambda T(V+N) P_1(x_0), \\ P_\infty(x_0, V, N, \Lambda, T) &= \Lambda T(V+N) P_1(x_0). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Теперь усложним модель, учитывая попытки избежать столкновения за счет маневрирования.

Предположим, что наше судно обнаруживает встречное на случайному расстоянии ρ , после чего оба судна начинают маневрировать, пытаясь разойтись. В этой ситуации уже не имеем права предполагать независимость ρ , ξ , ω и v . Поэтому предположим, что нам известна вероятность $P_0(x_0, V, r, x, w, v)$ того, что нашему судну удастся избежать столкновения со встречным судном при условии, что его обнаружили на расстоянии r , его X -координата равна x , ширина – w , скорость – v . При этом скорость нашего судна равна V .

Заметим, что при $|x - x_0| > W + w$ эта вероятность равна единице независимо от значений прочих параметров, так как в этой ситуации для предотвращения столкновения не требуется никакого маневрирования.

В этом случае полученная выше вероятность $P_1(W, x_0)$ уменьшается:

$$P_1(W, x_0) = \int_0^{\infty} f_v(v) \left(\int_0^{\infty} f_r(r) \left(\int_0^{\infty} f_{\omega}(w) \left(\int_{x_0-(W+w)}^{x_0+W+w} P(V, r, x, w, v) f_{\xi}(x) dx \right) dw \right) dr \right) dv. \quad (1.7)$$

Вероятность того, что на протяжении отрезка времени $[0, T]$ столкновение не произойдет:

$$\bar{P}_1(x_0, V, N, \Lambda, T) = \exp\{-\Lambda T(V + N)P_1(W, x_0)\}, \quad (1.8)$$

соответственно увеличивается.

Для практического применения полученных результатов необходимо конкретизировать входящие в модель распределения.

Для начала рассмотрим вырожденный пример, когда ширины всех встречных судов одинаковы и равны 2Ω . Хотя, на первый взгляд, такая модель не имеет практического интереса, на самом деле её анализ позволит легче понять закономерности поведения более сложных моделей. Более того, окажется, что в типичном случае, когда K намного больше, чем W и Ω , она даёт те же результаты, что и более сложные модели.

Для этой модели формула (1.1) вырождается в

$$P_1(x_0) = \int_{x_0-(W+\Omega)}^{x_0+W+\Omega} f_{\xi}(x) dx, \quad (1.9)$$

а вероятность $\bar{P}_1(x_0)$ примет вид

$$\bar{P}_1(x_0) = 1 - \int_{x_0-(W+\Omega)}^{x_0+W+\Omega} f_{\xi}(x) dx = \int_{-K}^{x_0-(W+\Omega)} f_{\xi}(x) dx + \int_{x_0+(W+\Omega)}^K f_{\xi}(x) dx. \quad (1.10)$$

Первый интеграл этой формулы равен вероятности разминуться со встречным судном левым бортом, а второй – правым.

Учитывая, что $f_{\xi}(x) = 0$ при $x < -K$ и $x > K$, окончательные формулы для этой вероятности зависят от соотношений между K , W и x_0 :

$$\bar{P}_1(\Omega, W, x_0) = \begin{cases} \int_{x_0 - (\Omega + W)}^K f_\xi(x) dx, & -K \leq x_0 \leq -K + W + \Omega \\ \int_{-K}^{x_0 - (\Omega + W)} f_\xi(x) dx + \int_{x_0 + (\Omega + W)}^K f_\xi(x) dx, & -K + W + \Omega < x_0 < K - W - \Omega \\ \int_{-K}^{x_0 - (\Omega + W)} f_\xi(x) dx, & K - W - \Omega \leq x_0 \leq K. \end{cases} \quad (1.11)$$

Исчезновение интегралов вблизи краёв коридора легко объясняется с помощью рисунка 1.2.

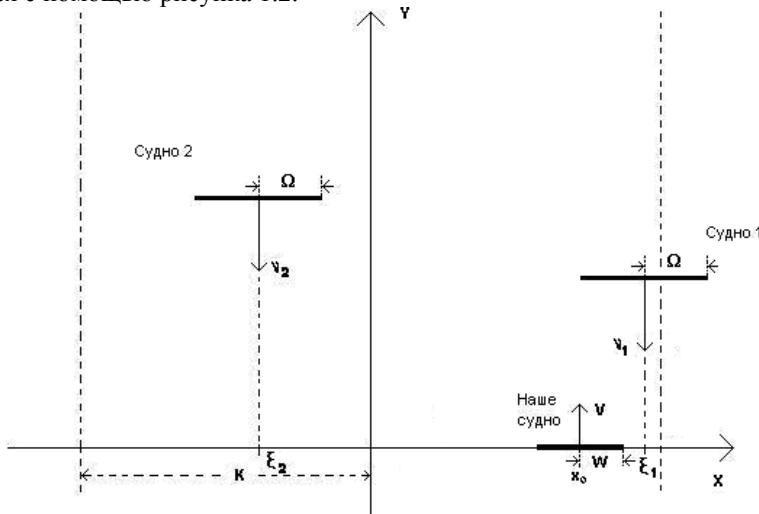


Рис. 1.2. Схема движения при «моноширинной» модели судов

Здесь $K - W - \Omega < x_0 < K$, и встречные суда в принципе не могут миновать наше судно справа, поэтому в формуле (1.10) остается только интеграл, равный вероятности безопасно пройти им слева от нас. Аналогичное поведение вероятностей наблюдается и в более сложных моделях.

В частном случае равномерного распределения встречных судов по ширине коридора, т. е. когда

$$f_\xi(x) = \begin{cases} 1/2K, & |x| < K, \\ 0, & |x| \geq K, \end{cases} \quad (1.12)$$

формула (1.10) упрощается:

$$\bar{P}_1(\Omega, W, x_0) = \begin{cases} (K + |x_0| - W - \Omega)/2K, & K - W - \Omega \leq |x_0| \leq K, \\ (K - W - \Omega)/K, & |x_0| < K - W - \Omega. \end{cases} \quad (1.13)$$

Пусть ширины встречных судов имеют гамма-распределение:

$$f_{\omega,a,b}(w) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} w^{a-1} e^{-bw}, \quad w \geq 0, \quad (1.14)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма-функция:

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx. \quad (1.15)$$

Физический смысл параметров a и b состоит в том, что $\Omega = ab^{-1}$, а дисперсия ширин встречных судов равна ab^{-2} .

Для простоты опять предположим, что встречные суда равномерно распределены по ширине коридора, т. е. $f_\xi(x)$ определяется формулой (1.12).

Поскольку модель симметрична относительно оси Y , то $P_1(-x_0) = P_1(x_0)$ и нам достаточно найти эти вероятности только для неотрицательных x_0 .

Учитывая, что W намного меньше K , мы получим:

$$\begin{aligned} \bar{P}_1(x_0) &= 1 - \frac{b^a}{\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} \left(\int_{-(W+w)}^{W+w} f_\xi(x-x_0) dx \right) dw = \\ &= 1 - \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} \min(K+x_0, W+w) dw - \\ &\quad - \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} \min(K-x_0, W+w) dw = \\ &= \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} (K+x_0 - \min(K-x_0, W+w)) dw + \\ &\quad + \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} (K-x_0 - \min(K-x_0, W+w)) dw = \\ &= \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} \max(0, K+x_0 - W-w) dw + \\ &\quad + \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \int_0^\infty w^{a-1} e^{-bw} \max(0, K-x_0 - W-w) dw = \\ &= \frac{b^a}{2K\Gamma(a)} \left(\int_0^{K+x_0-W} w^{a-1} e^{-bw} (K+x_0 - W-w) dw + \int_0^{\max(0, K-x_0-W)} w^{a-1} e^{-bw} (K-x_0 - W-w) dw \right). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Первый интеграл этой формулы соответствует вероятности разминутся со встречным судном левым бортом, а второй – правым.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru