

**О ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ СХЕМЫ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДОВ
НА МОРСКОЙ АКВАТОРИИ***Доктор техн. наук **Гриняк В.М.**

(Владивостокский государственный университет экономики и сервиса),

доктор техн. наук **Девятисильный А.С.**

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН),

Шуленина А.В.

(Дальневосточный федеральный университет)

PLANNING OF SAFE TRAFFIC PATTERN FOR MARINE AREA**V.M. Grinyak**, Doctor (Tech.),

(Vladivostok State University of Economics and Service),

A.S. Devyatisilny, Doctor (Tech.),

(Institute of Automation and Control Processes, FEBRAS),

A.V. Shulenina,

(Far Eastern Federal University)

Безопасность судоходства; управление движением судов; система установления путей движения; интенсивное движение; опасное сближение; моделирование потока судов; алгоритмы на графах.

Maritime safety; marine traffic control; traffic pattern; traffic intensity; collision risk assessment; ships flow simulation modeling; graph algorithms.

Работа посвящена проблеме обеспечения навигационной безопасности движения на морских акваториях. Рассматривается задача планирования схем движения судов, обеспечивающих минимизацию количества опасных сближений, обсуждаются ее возможные модельные представления. Отмечается, что непосредственное решение задачи путём имитационного моделирования характеризуется высокой вычислительной сложностью; это затрудняет нахождение схемы движения для реальных акваторий. Предлагается альтернативный подход, основанный на представлении схемы движения множеством типичных структурных элементов – примитивов. Приводятся примеры расчетов количества опасных сближений для таких примитивов, даются рекомендации по планированию схем безопасного движения судов.

This paper is about navigation safety of marine traffic at sea areas. The problem of traffic pattern planning sea area with highly intensive traffic is considered in this paper. Problems model based on graph representation is presented. Solving of problem by simulation modeling characterized by high computational complexity. This makes it difficult to find a traffic pattern for real water areas. The paper proposes an alternative approach based on the representation of a traffic schema by a set of typical structural elements - primitives. Examples of calculations of the number of dangerous encounters for such primitives and recommendations for planning the traffic schemes are given.

Введение

Навигационная безопасность является одной из основных категорий, связанных с эксплуатацией морского транспорта. Традиционным подходом к обеспечению безопасности движения судов является решение трёх задач: оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения и планирования траектории безопасного движения судов [1]. Вместе с тем эти классические задачи не всегда способны обеспечить необходимый уровень безопасности движения на акваториях с интенсивным трафиком, где необходима дополнительная координация совместных действий участников движения [2]. В том числе – в форме следования определенной на акватории схеме безопасного движения (правил движения). В судоводительской практике в отношении такой схемы устоялся термин «система установления путей движения судов» [3].

Исторически формирование на конкретной акватории той или иной схемы движения происходило исходя из возможности её реализации с учетом географии района и судоводительской практики: наличия удобных визуальных ориентиров, позволяющих судоводителю следовать установленным маршрутом [4]. При необходимости естественные ориентиры (приметные горы, мысы и т.п.) дополнялись искусственными (маяки, светящиеся знаки, буи и т.п.). Соотнесенный с правилами судовождения такой подход приводил к формированию схемы движения не столько безопасной, сколько пригодной для повседневной работы судоводителей и диспетчеров береговых служб в условиях ограниченных возможностей навигационных средств до цифровой эпохи.

Рост интенсивности судоходства в последние годы нередко выявлял ограничения «старых» схем с точки зрения их пропускной способности и безопасности [5].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90018.

Одновременно с этим развитие концепции Е-навигации и приход нового поколения навигационных средств (спутниковые системы позиционирования, системы автоматизированной прокладки, автоматическая идентификационная система) позволили реализовать любые допустимые географией акватории маршруты судов, не ограничиваясь возможностями визуального наблюдения [6, 7]. Это определило необходимость и перспективность разработки новых подходов к планированию схем движения судов на морских акваториях.

Настоящая работа посвящена исследованию задачи планирования схемы движения судов, обеспечивающей безопасность в условиях высокой интенсивности трафика. В основу метода решения задачи положено имитационное моделирование движения по множеству возможных траекторий и оценка метрики, описывающей степень опасности движения. Выбор в пользу того или иного варианта схемы движения из возможных обусловлен необходимостью обеспечения максимальной безопасности коллективного движения и практическими соображениями. Актуальность исследования обусловлена в том числе перспективами развития безэкипажного судоходства [8].

Основные модельные представления

Пусть имеется некоторая акватория, на которой выделены разрешенные и запрещенные для движения судов районы. Имея в виду небольшие размеры типичных акваторий (обычно не более 100 км, можно пренебречь шарообразностью Земли), для их моделирования будем использовать прямоугольную декартову систему координат.

Примем, что на границах и внутри акватории имеются зоны входа судов на акваторию IN_m ($m = \overline{1, M}$) и зоны выхода судов с акватории OUT_n ($n = \overline{1, N}$). Зоны могут быть как непересекающимися, так и пересекаться. Будем считать известной интенсивность судопотока A_{mn} из зоны IN_m в зону OUT_n , выражаемую, например, количеством выходящих судов в единицу времени при заданных характеристиках скоростей, геометрических размерах и траекторных свойствах судов. Такое представление позволяет моделировать потоки судов, проходящих через акваторию [9].

Пусть заданы маршруты судов из зон входа в зоны выхода. Будем осуществлять моделирование трафика акватории в дискретные моменты времени t_i . Модель движения конкретного судна опишем кинематическими уравнениями

$$x_{i+1} = x_i + v_i \sin K_i (t_{i+1} - t_i),$$

$$y_{i+1} = y_i + v_i \cos K_i (t_{i+1} - t_i).$$

Здесь x_i, y_i – декартовы координаты судна в момент времени t_i , v_i и K_i – соответственно скорость и курс судна. Примем, что модель скорости и курса судна включают в себя случайную компоненту, так что $v_{i+1} = v_i + \delta v_i$ (где δv_i – случайная величина с известным распределением), а курс судна K_i выбирается на каждом шаге так, чтобы обеспечивать движение по заданному маршруту, так что $K_i = K_i^* + \delta K_i$ (где K_i^* –

определяемое траекторией значение курса судна, δK_i – случайная величина с известным распределением).

Будем генерировать суда в зонах IN_m согласно заданной интенсивности судопотока A_{mn} и моделировать движение судов к зонам OUT_n , по мере их достижения удаляя суда из обработки. Тем самым получим имитационную модель движения судов на акватории.

В качестве метрики, характеризующей степень опасности движения, выберем количество опасных сближений судов в единицу времени [5]. Будем считать взаимное расположение судов опасным, если расстояние между ними меньше некоторого критического расстояния R^* , зависящего от геометрических размеров судов. Реализуя имитационную модель движения судов, можно вести подсчет опасных сближений судов как на всей акватории, так и на её отдельных участках, выявляя тем самым наиболее проблемные.

Таким образом, ставится задача выбора множества маршрутов судов из зон входа IN_m в зоны выхода OUT_n таким образом, чтобы они обеспечивали минимум количества опасных сближений судов в рамках описанной имитационной модели. Решение этой задачи позволит спланировать схему безопасного движения на выбранной акватории.

Рассмотрим модель поставленной задачи на графе. Пусть на акватории определено множество ребер и множество вершин. Множество вершин графа формируется в виде равномерной квадратной сетки с заданным расстоянием между вершинами. Множество ребер задается так, чтобы каждая вершина была соединена отрезком с каждой. Чтобы число ребер не было чрезмерным, их возможная длина ограничивается. Учитывается география акватории: нет вершин в запрещенных для плавания районах, ребра не должны пересекать такие районы.

Вершины, расположенные в зонах IN_m и OUT_n являются начальными и конечными точками возможных маршрутов судов. Пусть P_{mn} – множество возможных путей на графе, приводящих из зоны IN_m в зону OUT_n . Для уменьшения числа возможных путей целесообразно ввести ряд ограничений: на длину пути, на величину изменения курса судна в вершине, запретить циклические пути и т.п. Моделируя движение по возможным путям получим количество опасных сближений судов для каждой пары путей. Решение исходной задачи планирования схемы движения дают те пути, которые обеспечивают минимум опасных сближений.

Выбор путей из множеств P_{mn} приводит (в случае реальных акваторий) к необходимости имитационного моделирования задачи для очень большого числа судов. Ещё одной проблемой, возникающей при решении описанной задачи, является случайный характер оценки количества опасных сближений для пар выбранных путей. Это не даёт возможность устойчиво различить похожие пути с точки зрения меры их безопасности: разные реализации модели дают существенно различающиеся оценки маршрутов схемы движения судов. Уменьшить случайную составляющую в оценке количества опасных сближений возможно, если на несколько порядков увеличить число моделируемых судов, однако это потребует использования специализирован-

ных вычислительных ресурсов. Другими словами, особенности описанной задачи затрудняют её прямое решение для акватории в целом традиционными методами и средствами.

Альтернативным подходом является конструирование возможных схем движения экспертным способом из структурных элементов (примитивов), представляющих собой принятые в практике судовождения типичные конфигурации траекторий. Реализация описанной имитационной модели изолированно в рамках отдельного примитива вполне возможна на доступных вычислительных и программных платформах общего назначения.

Рассмотрим следующие примитивы траекторий судов:

- пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1а);
- пересечение двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1б);
- пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности (рис. 1в);
- пересечение двусторонних судопотоков с зоной кругового движения (рис. 1г).

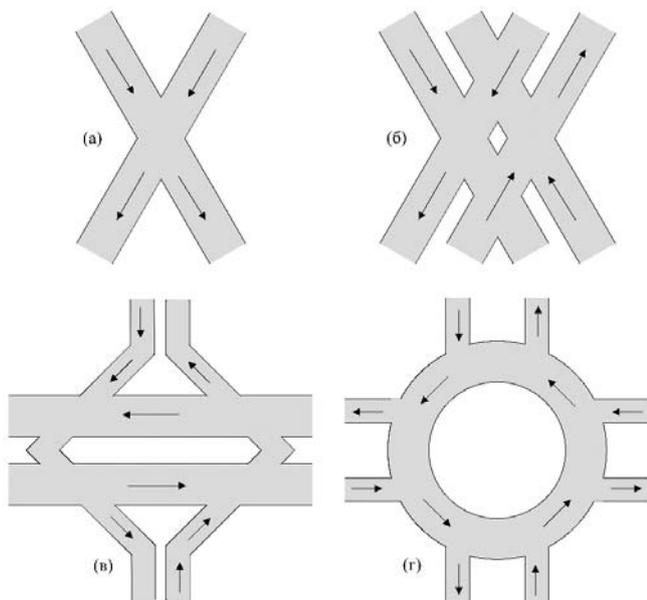


Рис. 1. Модели примитивов траекторий судов

В первом случае (рис. 1а) считается, что односторонние судопотоки равной интенсивности пересекаются под некоторым углом (интенсивность судопотока выражается в количестве судов, проходящих за единицу времени при заданной скорости). Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения судопотоков, их интенсивности и размеров судов (значений параметра R^*).

Во втором случае (рис. 1б) считается, что двусторонние судопотоки равной интенсивности пересекаются под некоторым углом. Эта ситуация соответствует «суммированию» четырёх примитивов, показанных на рисунке 1а. Здесь тоже нужно оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения судопотоков, их интенсивности и размеров судов.

Во третьем случае (рис. 1в) считается, что двусторонний судопоток большей интенсивности пересекается двусторонним судопотоком меньшей интенсивности. Суда, движущиеся в «большом» судопотоке, сохраняют

прямолинейное движение, а суда, движущиеся в «малом» судопотоке, изменяют курс для пересечения «большого» судопотока под возможно меньшим углом. Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения судопотоков, размеров судов, интенсивности потоков судов и их скоростей.

В четвертом случае (рис. 1г) считается, что пересекаются двусторонние судопотоки с одинаковой интенсивностью движения и для уменьшения числа опасных сближений организовано круговое движение. Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от размеров судов и интенсивности их потоков.

Результаты

Рассмотрим пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1а). На рис. 2 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов: по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах). При этом были приняты следующие значения параметров (см. табл. 1): R^* равно 300, 600 и 900 м, временные интервалы между соседними судами, движущимися в потоке, являются случайными значениями и равномерно распределены в отрезке [1,10] и [1,20] минут, скорость судов была равна 10 м/с. Здесь и в следующих примерах моделирование движения судов проводилось на интервале 100 дней.

Таблица 1.

Параметры судопотоков
(односторонних одинаковой интенсивности)

Номер графика	Расстояние между судами R^* , м	Интервал времени между судами, мин.
1	300	[1,20]
2	600	[1,20]
3	900	[1,20]
4	300	[1,10]
5	600	[1,10]
6	900	[1,10]

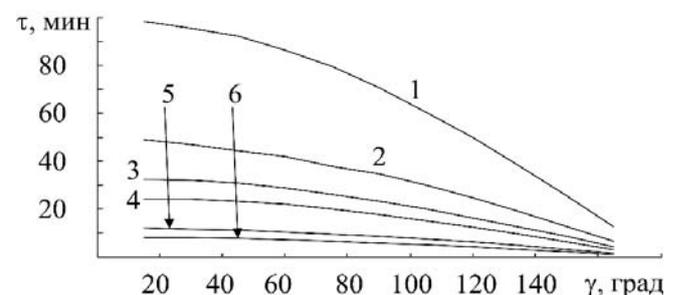


Рис. 2. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности

Из рис. 2 видно, что имеет место близкая к обратной линейной зависимость средних интервалов между опасными сближениями τ от критического расстояния между судами R^* (это хорошо видно, например, при

**Параметры судопотоков
(двусторонних разной интенсивности)**

Номер графика	Расстояние между судами R^* , м	Интервал времени между судами, большой поток, мин.	Интервал времени между судами, малый поток, мин.	Скорость судов, большой поток, м/с	Скорость судов, малый поток, м/с
1	300	[1,10]	[1,40]	10	10
2	300	[1,10]	[1,40]	20	10
3	300	[1,10]	[1,20]	10	10
4	300	[1,10]	[1,20]	20	10
5	600	[1,10]	[1,40]	10	10
6	600	[1,10]	[1,40]	20	10
7	900	[1,10]	[1,40]	10	10
8	900	[1,10]	[1,40]	20	10
9	600	[1,10]	[1,20]	10	10
10	600	[1,10]	[1,20]	20	10
11	900	[1,10]	[1,20]	10	10
12	900	[1,10]	[1,20]	20	10

сопоставлении графиков 1 и 2, 4 и 5). Близкая к квадратичной зависимость наблюдается между длиной интервала времени между соседними судами и τ . Последнее легко предположить априорно, так как при уменьшении интервала времени между судами обратно пропорционально увеличивается число судов в каждом судопотоке. Видно также, что при пересечении судопотоков под острым углом величина τ в несколько раз выше, чем при пересечении под «очень тупыми» углами (больших, чем 135°); разница в величине τ для «очень острых» углов (меньших, чем 45°) невелика (около 10%). Таким образом, при планировании схемы движения следует стремиться к пересечению односторонних судопотоков только под острыми углами, однако уменьшение углов ниже 45° уже не даёт существенного эффекта.

Пересечение двусторонних судопотоков (рис. 1б) сводится к комплексированию четырёх примитивов односторонних судопотоков. На рис. 3 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов для случая двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности и параметров движения, представленных в табл. 1; как и в предыдущем примере по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах).

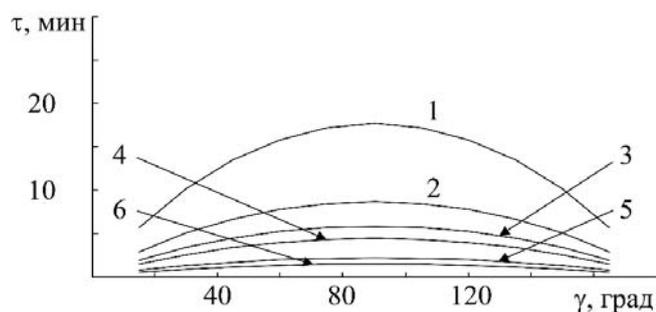


Рис. 3. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности

Из рис. 3 видно, что, как и можно предположить, значения τ симметричны относительно угла $\gamma = 90^\circ$; при таких значениях γ значения τ в четыре раза меньше, чем на соответствующих графиках рис. 2. Так как в точке $\gamma = 90^\circ$ достигается максимум значений τ , при планировании схемы движения следует стремиться к пересечению двусторонних судопотоков под прямым углом.

Рассмотрим пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности (рис. 1в). На рис. 4 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов, были приняты следующие значения параметров (см. табл. 2); как и в двух примерах ранее по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах). Были приняты следующие значения параметров (см. табл. 2): R^* равно 300, 600 и 900 м, временные интервалы между соседними судами, движущимися в «большом» потоке, равномерно распределены в отрезке [1,10] мин., в «малом» потоке – в отрезках [1,20] и [1,40] мин. Скорость судов в «большом» потоке была равна 10 м/с (сплошные линии) и 20 м/с (пунктир), скорость судов в малом потоке была равна 10 м/с.

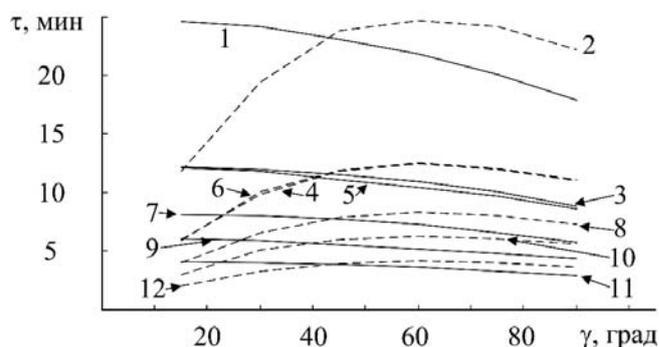


Рис. 4. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности

Из рис. 4 видно, что имеется близкая к обратной линейной зависимость средних интервалов между опасными сближениями τ от критического расстояния между судами R^* . Близкая к линейной зависимость наблюдается также между τ и интервалом времени между соседними судами в «малом» потоке. Это создаёт, например, эффект очень близких (почти совпадающих) графиков 3 и 5, 4 и 6. В том случае, если скорости судов в пересекающихся потоках не равны, величина τ на при острых углах их пересечения резко уменьшается (пунктирные графики). Это объясняется тем, что суда «быстрого» потока догоняют суда «медленного» потока. В случае равных по скорости судопотоков наибольшие значения τ обеспечиваются при углах их пересечения меньше 45° , разница между ними в этом случае незначительна (не превышает 10%). Таким образом, наиболее удобным для практики является пересечение судопотоков под углом в 45° при близких скоростях движения судов.

Рассмотрим пересечение двусторонних судопотоков с зоной кругового движения (рис. 1г). Таблица 3 показывает результат оценки среднего периода между опасными сближениями судов. При моделировании для простоты считалось, что судопотоки имеют одинаковую интенсивность движения и движутся только в направлениях «верх-низ», «низ-верх», «право-лево», «лево-право», что определяет интенсивность движения «на круге». Все судопотоки были равной ширины, внутренний радиус «круга» был принят равным двум расстояниям между противоположными «прямыми» судопотоками.

Таблица 3.

Параметры судопотоков (двусторонних с зоной кругового движения) и среднее количество опасных сближений судов

	Расстояние между судами R^* , м	Интервал времени между судами, мин.	Средний период между опасными сближениями τ , мин.
1	300	[1,20]	24.6
2	600	[1,20]	12.3
3	900	[1,20]	8.2
4	300	[1,10]	6.0
5	600	[1,10]	3.0
6	900	[1,10]	2.0

Из таблицы 3 видно, что и в случае кругового движения имеется близкая к обратной линейной зависимость между R^* и τ ; также как и в примерах ранее наблюдается близкая к квадратичной зависимость между τ и длиной интервала времени между соседними судами. Данные таблицы 3 обосновывают преимущество круговой схемы при пересечении двусторонних судопотоков с интенсивным движением. Так, при $R^* = 300$ м и случайном интервале времени между судами в отрезке [1,20] (строка 1) значения τ для кругового движения (24.6 мин.) примерно на треть выше, чем при пересечении двусторонних судопотоков под прямым углом (около 18 мин., максимум графика 1, рис. 3). Похожее соотношение можно увидеть и для судопотоков с другими параметрами.

Обсуждение

Результаты моделирования движения судов на примитивах дают представление о характерном количестве опасных сближений в том или ином случае. С учетом указанных зависимостей это количество может быть экстраполировано на судопотоки с другими параметрами. Значение τ – это среднее время, которое проходит между опасными сближениями судов на небольшом участке акватории. С учетом типичного времени реагирования судоводителей и ответственных за участок операторов береговых СУДС на предупреждение о риске опасного сближения и на принятие решения и совершение маневра уклонения значения τ менее 10 минут следует считать нежелательными, а менее 5 мин. – опасными [5]. Например, при $R^* = 300$ м. для односторонних судопотоков движение безопасно при острых углах их пересечения при длине интервала времени между судами как [1,20] мин., так и [1,10] мин. При пересечении двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности движение судов с интервалом [1,20] –

безопасно (рис. 3, график 1), а с интервалом [1,10] – опасно (рис. 3, график 4). Это даёт представление о пропускной способности этого примитива траекторий судов. При движении, как на рис. 1в, движение с указанными интервалами безопасно. При движении, как на рис. 1г, интервал [1,20] безопасен, интервал [1,10] также безопасен (в отличие от примитива рис. 1б), хотя и находится вблизи опасной зоны. Сравнение рис. 4 и табл. 3 даёт представление о необходимости организации кругового движения при тех или иных параметрах судопотоков.

Кроме количества опасных сближений возможны и другие метрики опасности движения. Так, в работе [10] рассматриваются метрики «интенсивность движения», «интенсивность плюс скорость движения», «интенсивность плюс размеры судов». Первая характеризует количество судов, проходящих через некоторый участок акватории за единицу времени. Вторая аналогична первой метрике, но судам соответствует «вес», зависящий от скорости движения, то есть скоростные суда дают больший вклад в метрику; так выявляются участки акватории с наибольшей скоростью. Третья аналогична второй, но «вес» судна зависит от его длины: более длинные суда имеют больший вес. Метрика выявляет участки акватории, где движутся самые большие суда. Похожие метрики, связанные с интенсивностью движения рассматриваются и в других исследованиях [11]. Следует отметить, что интенсивность движения и опасность связаны неявно, косвенно. Трафик может быть интенсивным, но безопасным или разреженным, но опасным.

В работах [10, 12] обосновывается метрика «стабильность параметров движения», которая характеризует вариативность скоростей и курсов. Она позволяет выявлять участки акватории со стабильным или нерегулярным, «хаотичным» движением. В статьях [10, 13] предложена метрика «насыщенность трафика», характеризующая плотность находящихся на участке акватории судов с точки зрения их возможности совершать манёвры. Она оценивает потенциальную опасность трафика, которая может обернуться в реальные опасные ситуации при неблагоприятном стечении обстоятельств, формализует эмоциональную нагрузку на участников движения. Возможна интегрированная комплексная оценка безопасности движения на акватории [10], получаемая по результатам вычисления нескольких метрик.

В качестве примера использования обсуждаемых результатов моделирования для планирования безопасных схем движения судов рассмотрим схему судопотоков на рис. 5а.

Здесь имеется двустороннее движение судов в направлениях «север-юг», «север-восток» и «юг-восток» таким образом, что образуется фигура, похожая на треугольник. Такой элемент трафика встречается на акваториях довольно часто: например, он присутствует у схемы движения судов в заливе Находка. В варианте рис. 5а имеется 6 пересечений односторонних судопотоков: по два пересечения под углами 45°, 135°, и 90°. Если обратиться к данным графиков рис. 2 и 3, то можно определить, что, например при $R^* = 300$ м и случайном интервале времени между судами в отрезке [1,10] мин. будем иметь значение $\tau = 2.85$ мин., которое относится к опасному диапазону.

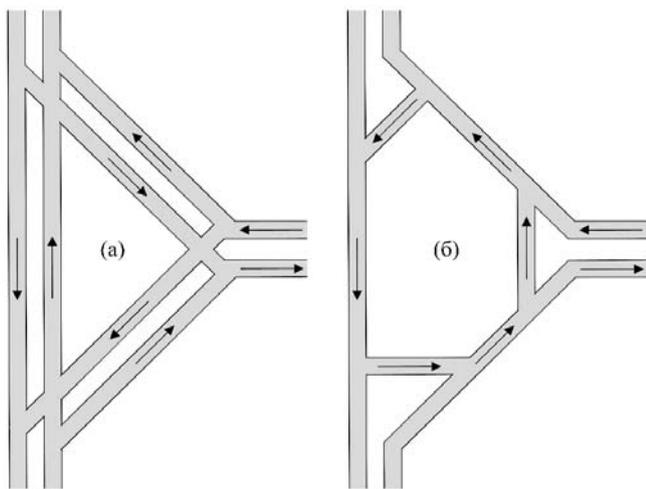


Рис. 5. Варианты схем движения судов

Заменим схему рис. 5а на эквивалентную ей по связности схему рис. 5б (похожую на круговое движение). В ней имеем всего 3 пересечения односторонних судопотоков под углом 45° , что даёт значение $\tau = 8.33$ мин., которое относится к безопасному диапазону. Пропускная способность схемы рис. 5б оказывается почти в три раза выше. Разумеется, речь идёт об идеальном случае, для вывода об опасности и пропускной способности конкретной схемы движения реальной акватории потребуется провести более ёмкое моделирование. Тем не менее, рассматриваемый в настоящей работе подход, основанный на использовании данных моделирования движения на примитивах, даёт вполне информативные результаты.

Заключение

1. В работе рассматривается задача планирования схемы движения судов, обеспечивающей безопасность трафика морской акватории. Сформулированы общие модельные представления задачи, отмечается, что перебор возможных маршрутов судов (в том числе с использованием различных эвристик) не даёт возможности адекватно оценить меру их безопасности. В качестве альтернативы предлагается конструирование возможных схем движения экспертным способом из типичных конфигураций траекторий (примитивов).

2. Предложено 4 модели примитивов траекторий судов: пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности, двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности, двусторонних судопотоков разной интенсивности и двусторонних судопотоков с зоной кругового движения. Отмечается, что такие структурные элементы траекторий судов широко распространены в судоводительской практике.

3. Результаты статистического моделирования движения судов по траекториям выбранных примитивов дают представление о характерном числе опасных сближений при тех или иных характеристиках судопотока. С учетом статистического характера задачи, величиной, характеризующей опасность того или иного примитива траекторий судов, удобно выбрать среднее время, которое проходит между опасными сближениями. Возможны и другие меры оценки опасности трафика. В работе приведён пример использования полученных результатов моделирования для планирования безопасных схем движения судов.

4. Предложенный подход позволяет достаточно информативно оценивать степень опасности схемы движения с качественной точки зрения. Однако трафик реальных акваторий характеризуется многообразием возможных маршрутов и траекторных свойств движущихся судов. Нередко на них присутствует множество судов, движение которых не носит характер устойчивых потоков (прогулочные катера и яхты, рыбопромысловые суда, плавсредства береговых служб и т.п.), а их движение характеризуется значительной случайной компонентой. В этом случае для решения задачи потребуется более ёмкое моделирование движения, возможно, с использованием специализированных программных систем, чему авторы планируют посвятить отдельное исследование.

Литература

1. Tam Ch. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // *Journal of Navigation*. – 2009. – Vol. 62. – Is. 3. – Pp. 455-476.
2. Кирсанов М.Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов / М.Н. Кирсанов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2016. – № 2. – С. 183-190.
3. Лентарёв А.А. Проблемы организации движения судов в дальневосточных водах / А.А. Лентарёв // *Транспортное дело России*. – 2015. – № 6. – С. 256-257.
4. Таратынов В.П. Судовождение в стесненных районах / В.П. Таратынов. М.: Транспорт, 1980. – 128 с.
5. Гриняк В.М. Оценка опасности трафика морской акватории по данным Автоматической идентификационной системы / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.И. Люлько // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 681-690.
6. Титов А.В., Состояние и перспективы реализации технологии Е-навигации / А.В. Титов, Л. Баракат, А. Хаизаран // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 621-630.
7. Малыгин И.Г. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой промышленной революции / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский, О.А. Королев // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2017. – № 8. – С. 3-12.
8. Титов А.В. Системы управления безэкипажными судами / А.В. Титов, Л. Баракат, В.А. Чанчиков, Г.А. Тактаров, О.П. Ковалев // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 1-4 (43). – С. 109-120.
9. Лентарёв А. А. Основы теории судопотоков / А.А. Лентарёв. Владивосток: «Интермор», 1995. – 76 с.
10. Гриняк В.М. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях / В.М. Гриняк, Ю.С. Иваненко, В.И. Люлько, А.В. Шуленина, А.В. Шурыгин // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8. – № 1 (28). – С. 40-41.
11. Weng J. Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // *Journal of Navigation*. – 2015. – Vol. 68. – Is. 03. – Pp. 602-618.

12. Гриняк В.М. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, Ю.С. Иваненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 436-449.

13. Гриняк В.М. Оценка опасности схемы движения на акватории мерой нагрузки на судоводителей / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, А.В. Шуленина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 12. – С. 35-40.

Сведения об авторах:

Гриняк Виктор Михайлович, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, профессор кафедры информационных технологий и систем.

Адрес: 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41.

Телефон +7(904)6234235,

e-mail: victor.grinyak@gmail.com.

Девятисильный Александр Сергеевич, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, главный научный сотрудник сектора управления и навигации.

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

Телефон +7(914)6614992,

e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru.

Шуленина Алена Викторовна, Дальневосточный федеральный университет, старший преподаватель кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения.

Адрес: 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

Телефон +7(924)2442668,

e-mail: shuleniinaav@mail.ru.