

В. А. Михальский, А. Г. Кушнарёв, и

НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАВАНИЯ И МАНЕВРИРОВАНИЯ КОРАБЛЯ

Введение

“Ежели штурман потеряет корабль, который возьмется провести, или, ведая, где опасность, а не станет смело говорить том капитану, то тому штурману надлежит учинить штраф смертной, или ссылкой на каторгу...”.

Петр Великий. Устав Морской.

Проблема навигационной безопасности плавания (НБП) кораблей существует так же давно, как и мореплавание. Одно из семи известных в древности рукотворных чудес света – Фаросский маяк, и нерукотворное чудо – Геркулесовы столбы были навигационными ориентирами на подходах к Александрии и Гибралтару и помогали мореплавателям предотвращать посадки их судов на мели. Навигация, корни которой уходят к временам Колумба и Васко да Гамы, вплоть до второй половины XX в. не была связана и не опиралась на теорию вероятностей. Стохастическое содержание теории погрешностей навигационных измерений было придано работами А. П. Ющенко, А. Д. Козлова, Г. П. Попеко, В. Т. Кондрашихина в начале второй половины XX в.

Особенно обострилась проблема безопасности мореплавания от посадок на мель и столкновений судов в начале XX в. в связи с резко возросшей интенсивностью судоходства. В ответ на стихийный рост аварийности торгового флота были созданы интернациональные организации типа Международной ассоциации маячных служб (МАМС), Международной морской организации (ИМО) и др., регламентирующие все важные стороны проблемы безаварийного судоходства. Решения и рекомендации международных конференций типа СОЛАС – 74 после их ратификации правительствами участвующих стран приобретают силу закона; нарушение положений международных конференций ставится в вину должностным лицам при разбирательстве дел о навигационных авариях и столкновениях судов специальными комиссиями и определении степени вины должностных лиц в судах.

Обеспечение навигационной безопасности плавания кораблей и судов и безопасности от столкновений – сложная многоуровневая комплексная проблема, которая решается работой международных организаций, администраций государств, участвующих в мировом судоходстве, и в частности штурманской службой ВМФ РФ, Управлением навигации и гидрографии, Гидрографическими службами флотов, штабами объединений и соединений и кораблями ВМФ. Эта проблема решается

совместным трудом изготовителей морских средств навигации (МСН) и средств навигационного ограждения (СНО) и пользователей этими средствами, а также преподавателей высших учебных заведений, курсантов и слушателей, воспринимающих и в дальнейшем использующих полученные знания. Совместная деятельность упомянутых субъектов образует систему обеспечения безопасного плавания кораблей.

В последние десятилетия находится в стадии создания и развития наука об обеспечении безопасного плавания кораблей и судов в части предотвращения посадок на мель и столкновений судов. Эта наука должна решать проблему НБП со всех сторон и содержать теоретические и методические основы как в направлении создания эргатических (человеко-машинных) систем кораблевождения и управления кораблём, так и в направлении решения на кораблях и в штабах конкретных задач по предупреждению навигационных аварий и столкновений кораблей в процессе плавания. Второй части этих двух направлений главным образом посвящено данное учебное пособие.

Необходимо сказать, что проблема НБП и её отдельные задачи не нашли достойного отражения в литературе. В учебниках и книгах по навигации [30, 33, 32, 68, 118, 15 и др.] вообще нет упоминаний об НБП, хотя первое вероятностное решение задачи НБП было опубликовано в [57] в 1971 г.

Очевидно, что в период 1980...90-х гг. проблема навигационного обеспечения безопасного плавания ещё оставалась неизвестной в навигации, она не была широко поставлена и хотя бы частично решена. За период с 1989 г. по настоящее время отдельные стороны проблемы НБП рассматривались в работах [35, 55, 57, 70., 104]. Однако, в этих работах отсутствует систематическое и достаточно полное изложение решения проблемы. Первое в отечественной навигации обобщённое решение проблемы НБП дано в работе [36], которая, к сожалению, содержит существенные ошибки, недостатки [46, 73 и др.] и пробелы в решении рассматриваемой проблемы.

Таким образом, важная для мореплавания проблема представляется нерешённой. Для её решения необходимо рассмотреть организационные, навигационные, теоретико-вероятностные основы и методы расчетов показателей НБП, а также практические рекомендации по предотвращению навигационных аварий, касающиеся как навигационных решений, так и методов управления кораблём. Эти вопросы решаются в первых пяти главах книги.

Главы 6 и 7 пособия посвящены предупреждению столкновений судов в море. Для решения этой проблемы разработаны Международные правила предупреждения столкновений судов МППСС-72. Однако многим из этих правил свойственна неопределённость, порождаемая многообразием условий, в которых происходит расхождение судов. Проблема неопределённостей такого рода разрешается в комментариях к МППСС-72 различных авторов, например [53, 135]. Комментарии

обобщают опыт мореплавания, который называют «хорошей морской практикой», и который формулируется и юридически оформляется в судебно-арбитражных решениях по определению степени вины судоводителей при столкновениях судов. В главах 6 и 7 пособия рассматриваются и в необходимых случаях обосновываются и развиваются на базе вероятностного подхода правила хорошей морской практики. Кроме того, сделана попытка внести, когда это представляется целесообразным, в методы решения задач расхождения элементы решения задач НБП.

Пособие является обобщением и развитием учебного курса «Кораблевождение» для командиров кораблей на ВСОК ВМФ. Оно вообрало в себя опубликованные идеи и разработки В. И. Алексина, Н. М. Груздева, Р. А. Зубкова, Г. Г. Ермолаева, В. Т. Кондрашихина, О. Г. Морева, Г. П. Попеко, В.И. Цымбала. Ряд задач определения показателей НБП решается в пособии способами, отличающимися от традиционных, т. к. эти новые способы более эффективны. В таких случаях даётся обоснование, содержащее доказательство корректности и более высокой эффективности этих способов.

Предполагается, что читатель знаком с навигацией в объёме курса «Кораблевождение» и с теорией вероятностей в объёме курса «Основы методов исследования операций».

Пособие предназначено для преподавателей и слушателей командирской и штурманской специальностей и может использоваться при подготовке курсантов в училищах.

Глава 1

АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННОЙ АВАРИЙНОСТИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

Северная война, 9 июля 1713 года. Русская эскадра из 10 линейных кораблей под командованием вице-адмирала Корнелиуса Крюйса преследует под всеми парусами значительно более слабый отряд шведов вблизи Гельсингфорса. Поддавшись на хитрость противника, ловко обошедшего известные ему подводные камни, 2 русских корабля - флагманский "Рига" и шедший ему в кильватер "Выборг" из-за отсутствия лоцманов и некачественных карт "взлетают" на камни. Командующий К. Крюйс устраняется от управления сражением, не дает команд к орудийному бою и абордажу и занимается исключительно спасением севших на мель кораблей. Младший флагман капитан-командор Рейс на корабле "Св. Антоний" не берет на себя управление эскадрой, не желая подставлять свою грудь под шведские ядра ради русского флага, и выходит из боя, за ним поворачивают и остальные капитаны. Вся русская эскадра, потеряв "Выборг", отступает перед малочисленным противником под его

торжествующую пальбу и крики. (Специально созданный суд приговаривает К. Крюйса и Рейса за неисполнение своих обязанностей к смерти, которая заменена Петром I ссылкой в Сибирь).

Наверное, после этого и написал в своем уставе Петр Великий: "Никто да не дерзнет под наказанием смерти противиться к бою с неприятелем, не щадя своего живота до самой крайности".

* * *

1.1 Навигационная безопасность плавания - термины и определения

Терминология навигационной безопасности плавания

Морская навигация – наука о выборе пути, определении места и перемещения судна в море с учётом задач, решаемых кораблем и влияния внешней среды на направление движения и скорость судна [30]. Под термином «море» понимаются также океан, морские заливы и морские проливы. По нашему мнению, определение навигации было бы более полным при её формулировке как «наука и сфера деятельности». Термин «море» должен включать подходные морские каналы и фарватеры, судоходные участки рек, внешние и внутренние рейды и акваторию гаваней и портов, поскольку навигационный и/или лоцманский контроль за местом корабля и его перемещением здесь не менее важен, чем в открытом море. Поэтому в данной книге рассматриваются вопросы предупреждения навигационных аварий на маршруте движения от окончания швартовной операции по отходу судна от причала или другого судна (снятия с якоря, бочки) и до начала швартовной операции или буксирной проводки в пункте назначения. Аварии (удары или навалы на причалы и другие суда и т. д.), случившиеся в процессе швартовки, относятся в большинстве случаев к авариям, связанным с ошибками или недостатками в управлении кораблем, а не с навигационным обеспечением его движения.

Навигационная безопасность плавания (НБП) кораблей должна рассматриваться в широком и узком смысле. В самом широком смысле НБП можно определить как комплексную характеристику кораблевождения, определяющую возможность кораблей плавать без угрозы (в навигационном отношении) для жизни людей и целостности кораблей и судов.

В менее широком смысле НБП есть комплекс мероприятий, проводимых штурманской и гидрографической службами, Государственным, научно-исследовательским навигационно-гидрографическим институтом (ГНИНГИ МО РФ), штабами, командирами, штурманами и вахтенными офицерами кораблей с целью создания условий, обеспечивающих выполнение походов и поставленных задач без предпосылок к навигационным происшествиям (НП) и авариям. НБП достигается выполнением комплекса мер и условий:

- а) эффективным навигационно-гидрографическим обеспечением;
- б) четким управлением кораблями, их соединениями и обеспечивающими подразделениями;

в) высокой организацией корабельной штурманской и вахтенной служб;

г) своевременной и корректной проверкой навигационной безопасности маршрута, линии пути и заданной траектории движения (ЗТД), по которой движется корабль или судно, и возможности обеспечения безопасности в условиях плавания; точным плаванием по ЗТД;

д) маневрированием, обоснованным расчетами;

е) строгим соблюдением правил плавания и требований руководящих документов;

ж) высоким уровнем обученности, дисциплинированностью и ответственностью офицерского и личного состава.

В узком смысле НБП есть характеристика положения корабля за пределами навигационных опасностей. Или, другими словами, положение корабля на водной поверхности или в морской среде, в котором отсутствует возможность касания грунта или недопустимого сближения с навигационной опасностью. Поскольку координаты корабля и границ НО из-за наличия случайных погрешностей являются случайными величинами, то и НБП является вероятностной категорией.

Навигационная опасность (НО) определяется следующим образом. В резолюции ИМО А-529 (13) от 12.11.1983 г. [49] НО считается «всякий признанный или нанесенный на карту элемент, либо граница, которые могут представлять или очерчивать опасность для судна, либо ограничивать район плавания». Эта резолюция отменена в 2003 г. [50] в связи с изменением количественных требований к точности судовождения, но никакого другого общего определения для НО в отменяющем документе не дается. Учитывая четкость приведённой формулировки целесообразно оставить её в качестве общего определения НО.

Другие международные документы уточняют это определение НО. Материалы Международной конференции по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74 [67], позволяют рассматривать в качестве навигационных опасностей совокупность элементов, включающую, помимо собственно НО, также льды, покинутые суда, тропические штормы (ураганы в Вест-Индии, тайфуны в китайских морях, циклоны в водах Индийского океана и т. п.), области с температурой воздуха ниже точки замерзания в условиях штормового ветра, вызывающего обледенение; области с ветром силой 10 баллов и более по шкале Бофорта. Все эти элементы должны характеризоваться их координатами на определенный момент времени, размерами и, возможно, вектором скорости или направлением перемещения.

Навигационные опасности подразделяются по происхождению [1, 3] на четыре группы:

а) опасности морского дна (банки, мели, отмели, рифы, коралловые рифы, подводные косы, скалы, осушки, бары, отличительные глубины, ямы, мелководье, районы свалки грунта) и затонувшие суда;

б) опасности, вызванные гидрометеорологическими факторами (ветер, туман, волнение, обледенение, течение и т. п.);

в) дрейфующие объекты (сорванные с якорей мины, бочки, буи, рыболовные сети и пр.);

г) опасности в виде ограничивающих линий, проложенных на карте (границы полигонов, запретных районов для плавания, систем разделения движения, крепостных зон и др.) и разграничительных линий.

Причалы, бочки и другие объекты, с которыми корабль целенаправленно сближается вплотную, к НО не относятся. Однако элементы такого типа, мимо которых корабль проходит, в плохую видимость могут оказаться навигационными опасностями.

С точки зрения обоснования и выполнения маневра на расхождение с НО их удобно подразделить на *визуально наблюдаемые* (непосредственно видимые или имеющие систему ограждения) и *визуально ненаблюдаемые*. При этом радиолокационная наблюдаемость в общем случае не рассматривается из-за возможных ошибок в опознании объектов.

В работах [90, 17] введено понятие *зоны безопасности* и *опасной зоны* вблизи НО. Опасная зона находится между границей НО и элементами плавучего или иного ограждения этой НО. Для ненаблюдаемых (не огражденных) НО обычно в руководящих документах (РД) оговаривается минимальное расстояние $D_{рД}$, на которое допускается сближение с НО, или в качестве опасной изобаты для кораблей с определенной осадкой принимается несколько более глубокая изобата. Линия, проложенная на карте в расстоянии $D_{рД}$ от границ НО, или линия более глубокой изобаты, или линия ограничивающего пеленга является *предупреждающей*. В таких случаях опасная зона находится между границей НО и предупреждающей линией.

Угрожающей навигационной ситуацией (УНС) называют касание или пересечение кораблем границы опасной зоны и нахождение в ней.

Безопасное в навигационном отношении плавание (БП) – плавание в безопасных зонах НО и, следовательно, плавание при отсутствии УНС.

Основной показатель БП - вероятность безопасного плавания $P_{БП}$, или вероятность НБП $P_{НБП}$ (вероятность того, что корабль, следуя по намеченной линии пути, не отклонится от неё вследствие погрешностей координат его места или в результате ошибок штурмана, лоцмана или должностных лиц, управляющих движением корабля, настолько, что оно зайдет в опасную зону НО). Эту вероятность иногда для краткости обозначают буквой P . Если имеется в виду реально обеспеченная вероятность БП, то её обозначают $P_{об}$. В конкретных условиях решения задачи обеспечения НБП используются дополнительные показатели НБП, рассматриваемые далее.

Критерий НБП – заданная вероятность НБП P' , иногда обозначаемая $P_{зд}$. В случаях, когда

$$P_{БП} \geq P', \quad (1.1.1)$$

навигационная безопасность плавания судна или судов в судопотоке может считаться обеспеченной. В противном случае – не обеспеченной.

Документы международной ассоциации маячных служб [66] устанавливают вероятность P' в пределах от 0,95 до 0,999. В 1965 г. Ассамблея ИМО приняла Международный кодекс морской перевозки

опасных грузов (МКМОПОГ), к которым среди прочих отнесены радиоактивные вещества. Конвенция о гражданской ответственности в области морских перевозок ядерных материалов (1971 г.) и Кодекс безопасности ядерных торговых судов, одобренный Ассамблеей ИМО в 1981 г., устанавливают требования к надежности перевозок и ответственности должностных лиц, аналогичные требованиям МАГАТЭ к конструкции и эксплуатации ядерных реакторов. Это делает возможным для кораблей и судов с ядерными энергетическими установками и судов, перевозящих радиоактивные вещества, увеличение вероятности P' сверх величины 0,999.

Для варианта плавания в открытом море с большим запасом расстояния до НО при определении допустимого отклонения судна от линии пути под действием погрешностей места в упоминавшейся выше ИМО Резолюции А-529 (13), посвященной этим же вопросам А-817 (19), и последней по данной теме А-953 (23) [48, 49, 50] принята вероятность $P' = 0.95$.

Пути обеспечения безопасности мореплавания определены в упомянутых выше международных документах и обобщены в [90, 17]. К ним относятся:

а) установление унифицированных требований в отношении конструкции, снаряжения, снабжения судов и укомплектования их квалифицированными экипажами;

б) организация четкой вахтенной службы;

в) своевременное оповещение о морских опасностях;

г) выработка рекомендуемых путей следования через океаны и моря;

д) установление систем разделения движения судов в узкостях и местах интенсивного судоходства;

е) разработка системы унифицированного ограждения навигационных опасностей;

ж) организация лоцманской и ледокольной проводки;

з) разработка и внедрение правил маневрирования и сигнализации при расхождении судов;

и) обязательное расследование морских происшествий с установлением причин и выработкой рекомендаций по их предупреждению.

Известный современных навигатор, основной автор классического труда [102] учил нас: «Штурман, помни, оптимальным путем между точками *A* и *B* является не кратчайший путь, а рекомендованный».

Применительно к кораблям судам, маршруты движения которых полностью или частично не совпадают с рекомендованными маршрутами, приведенный выше перечень путей обеспечения безопасности мореплавания должен быть дополнен следующими:

к) линия предполагаемого пути судна на каждом участке маршрута должна быть проложена на безопасном расстоянии от близлежащих НО в соответствии с заданной вероятностью БП P' и фактической точностью плавания судна;

л) в процессе плавания должен осуществляться постоянный контроль положения судна относительно заданной линии пути и его навигационной

безопасностью (при автоматической обработке навигационной информации в навигационных вычислительных системах (НВС) текущая и/или прогнозируемая на заданное время упреждения вероятность $P_{\text{БП}}$ должна рассчитываться непрерывно и высвечиваться на дисплее);

м) изменения предварительно намеченного маршрута и маневры судна для расхождения с дрейфующими НО и опасностями гидрометеорологического происхождения должны быть обоснованы расчётами;

н) маневрирование корабля для расхождения с судами и подвижными объектами, особенно в условиях ограниченной видимости должно быть обосновано расчётами.

Решение вероятностных навигационных задач, связанных с обеспечением НБП, основано на оценивании точности плавания судна, которая характеризуется показателями точности навигационных параметров (НП) и точки местоположения судна.

Показатели точности НП и других рассматриваемых в навигации одномерных (линейных) случайных величин, используемые в пособии, включают следующие понятия [78].

Полная средняя квадратическая погрешность (СКП) m навигационного параметра - квадратный корень из суммы квадратов СКП всех случайных и рандомизированных остаточных или неисключенных систематических составляющих погрешности рассматриваемого НП. Полную СКП называют также *стандартной погрешностью* НП.

Верхняя доверительная граница m_h для оценки полной СКП - верхняя граница доверительного интервала, который накрывает истинное значение СКП с заданной *доверительной вероятностью* $P_{\text{дв}}$. Величину m_h рассчитывают по формуле

$$m_h = K_{h,m} m, \quad (1.1.2)$$

где $K_{h,m}$ – коэффициент верхней доверительной границы для СКП, который выбирают из табл. 1 приложения в зависимости от закона распределения погрешности d , принятой доверительной вероятности и количества *независимых* измерений, при котором получена оценка m . Здесь d – общее обозначение погрешности НП. Мы для удобства будем также обозначать погрешность НП как случайную величину буквой X (заглавной), а ее конкретные значения x_1, x_2, \dots (строчными), в том числе предельную погрешность символом $x^\wedge = d^\wedge$.

Предельная погрешность НП – верхняя доверительная граница d_h , или d^\wedge (или x^\wedge) для погрешности НП d . Предельную погрешность НП в навигации обозначают символом m^\wedge , который не является строгим, так как по обозначению характеризует предельную погрешность СКП, а не НП, и эквивалентен символу m_h . Предельную погрешность НП традиционно рассчитывают по формуле

$$d^\wedge = K_{p,1} m, \quad (1.1.3)$$

где m – *генеральное* значение СКП (или менее строго – истинное значение СКП); $K_{p,1}$ – коэффициент перехода от СКП к предельной

погрешности НП, который традиционно вычисляется в предположении, что погрешность d является случайной величиной и подчиняется закону распределения (ЗР) Гаусса (нормальному закону). В этом, как показано далее, заключается ограниченность традиционного подхода, выражаемого формулой (1.1.3). Кроме того, коэффициент K_{p_1} в соответствии с данным выше определением целесообразно назвать коэффициентом верхней доверительной границы для погрешности НП d и обозначить символом $K_{h, d, q}$ для обеспечения общности обозначений подобных коэффициентов. Величину $K_{h, d, q}$ выбирают из табл. 2 приложения в зависимости от заданной (доверительной) вероятности предельной погрешности и формы ЗР погрешности рассматриваемого НП. Здесь q – общее обозначение закона распределения.

Интервал корреляции τ_K случайного процесса $X(t)$ погрешности НП – промежуток τ времени между моментами двух измерений (отсчётов) НП y_1 и y_2 , при котором погрешности x_1 и x_2 этих отсчётов можно считать *независимыми*.

Вид и параметры автокорреляционной функции (АКФ) $\rho(\tau)$ случайного процесса $X(t)$ погрешности НП.

Коэффициент корреляции r_{ij} погрешностей i -го и j -го НП, одновременно измеряемых (вырабатываемых) одним и тем же МСН.

Форма (вид) закона распределения погрешности НП.

Максимальная погрешность d_m , или x_m НП – наибольшая по модулю погрешность в выборке $[x]=x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ погрешностей, полученной в процессе государственных испытаний (ГИ) МСН. Максимальная погрешность записывается в формуляры МСН в качестве характеристики его точности. Однако эта характеристика определяется по малому количеству независимых измерений, и имеет поэтом низкую эффективность. Ни в коем случае нельзя считать, что предельная погрешность d^{\wedge} измерения НП, отвечающая некоторой заданной вероятности, равна величине d_m , для которой на ГИ вероятность не проверяется. Поэтому переход от величины $d_m=x_m$ к СКП m осуществляют по формуле [74]

$$m = K_{x \rightarrow m} x_m, \quad (1.1.4)$$

где $K_{x \rightarrow m}$ – коэффициент перехода, который выбирают из табл. 1.1.1 в зависимости от количества N независимых измерений, эквивалентного продолжительности выборки погрешностей $[x]$ и формы закона распределения рассматриваемой погрешности.

Таблица 1.1.1. Коэффициент перехода $K_{x \rightarrow m}$

Число N	5	10	20	30	50	100	286
ЗР Гаусса	0,60	0,54	0,50	0,48	0,47	0,41	0,33
ЗР Лапласа	0,61	0,46	0,37	0,33	0,29	0,25	0,21

Например, для $N = 20$ и ЗР Гаусса коэффициент $K_{x \rightarrow m} = 0,5$. Поэтому СКП $m=0,5d_m$. Предельная с вероятностью 0,997 погрешность в

этом случае равна $d^{\wedge}=3m=1,5d_m$. Этот результат подтверждает, что величину d_m нельзя использовать в качестве предельной погрешности.

Норма погрешности d' , или x' – наибольшее допускаемое при заданной вероятности P' значение погрешности измерения или выработки НП, установленное в тактико-техническом задании (ТТЗ) на разработку и изготовление МСН. Иногда норма погрешности используется в руководящих документах в качестве характеристики точности НП. В таких случаях переходят от нормы погрешности к СКП по (1.1.4) с подстановкой d' вместо d_m .

Обеспечиваемая вероятность $P_{об}$ – вероятность того, что НП измеряется (вырабатывается, вычисляется) с точностью не ниже объявленной в нормативно-технической документации.

Показатели точности места корабля (положения случайной точки (X, Y) на плоскости) включают следующие понятия.

Средний квадратический эллипс (СКЭ) погрешностей, называемый в математике *тензором* – фигура погрешностей с центром в точке (X, Y) местоположения судна, характеризуемая СКП a и b , действующими по направлению большей и малой ортогональных полуосей соответственно, и направлением T_a большой полуоси относительно меридиана. Тензор погрешностей обозначают сложным символом (a, b, T_a) . Вероятность попадания действительного места судна – точки $(X_{дст}, Y_{дст})$ в площадь тензора при нормально распределённых погрешностях X и Y $P_{Э} = 0,39$.

Радиальная средняя квадратическая погрешность M – радиус круга погрешностей, описанного вокруг точки (X, Y) местоположения судна, численно равный

$$M = (a^2 + b^2)^{0,5}, \quad (1.1.5)$$

где a и b – полуоси тензора погрешностей. Вероятность P_K попадания точки $(X_{дст}, Y_{дст})$ в площадь круга погрешностей радиуса M зависит от степени сжатия тензора (от соотношения СКП b/a) и при нормально распределённых погрешностях X и Y изменяется в небольших пределах от 0.63 до 0.68.

Радиальная предельная погрешность M^{\wedge} – радиус круга погрешностей, традиционно принимаемый равным

$$M^{\wedge} = R^{\wedge} = K_{P_2} M, \quad (1.1.6)$$

где K_{P_2} – коэффициент перехода от радиальной СКП M к радиальной предельной погрешности M^{\wedge} , или более строго R^{\wedge} . Его выбирают из табл. 3 приложения обратным входом в зависимости от соотношения b/a полуосей тензора погрешностей, заданной вероятности предельной погрешности и формы ЗР погрешностей НП, по которым определено место корабля. Коэффициент K_{P_2} в принятой нами системе обозначений имеет вид K_{hK} .

Линейные СКП выработки координат (широты и долготы) $m_{ш}$ и $m_{д}$ обсервованного или счислимого места судна, и построенный на них *средний квадратический прямоугольник* погрешностей (СКПП) центр которого совпадает с точкой (X, Y) местоположения судна, а полуоси равны СКП $m_{ш}$ и $m_{д}$. Вероятность $P_{П}$ попадания точки $(X_{дст}, Y_{дст})$ местоположения судна в такой прямоугольник $P_{П} \approx 0,49$.

Предельный прямоугольник погрешностей (ППП) – прямоугольник, полуоси которого равны удвоенным или утроенным полуосям СКПП, например, $3m_{ш}$ и $3m_{д}$. Вероятность попадания точки ($X_{дст}$, $Y_{дст}$) в такой прямоугольник зависит от законов распределения погрешностей широты и долготы.

Линейная (одномерная) СКП m_z места судна, действующая по направлению β_z оси Oz – квадратный корень из квадратичной суммы проекций СКП места судна, $m_{ш}$ и $m_{д}$, направленных по осям координат, на ось Oz . Эта СКП равна

$$m_z = (m_{ш}^2 \cos^2 \beta_z + m_{д}^2 \sin^2 \beta_z)^{0.5}. \quad (1.1.7)$$

Если точность места судна характеризуется тензором погрешностей (a, b, T_a), то СКП m_z вычисляют по формуле

$$m_z = (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha)^{0.5}; \quad \alpha = |T_a - \beta_z|. \quad (1.1.8)$$

Эллипсы погрешностей и радиальные погрешности используют также для оценки точности других двумерных величин, например, векторов.

Статистические характеристики океанских и морских течений включают следующие показатели.

Среднее квадратическое значение (СКЗ) модуля вектора скорости течения σ (иногда обозначают σ_T) – второй начальный момент модуля вектора скорости течения. Далее эту величину будем для краткости называть «СКЗ скорости течения».

Интервал корреляции случайной функции течений τ_T – промежуток времени между замерах вектора скорости течения, при котором результаты замеров можно считать независимыми.

АКФ составляющих скорости течения $\rho_T(\tau)$ по осям географической системы координат.

Форма (вид) закона распределения модуля вектора скорости течения.

Связь характеристик точности места в системе корабль - навигационная опасность с показателями НБП устанавливает выражение для вероятности безопасного плавания судна. Вероятность $P_{БП}$ (или $P_{НБП}$) того, что корабль, текущее или прогнозируемое место которого на навигационной прокладке удалено на дистанцию D от границы опасной зоны НО, не пересечет эту границу под влиянием погрешностей мест судна и НО, определяют по следующей формуле, вытекающей из определения функции распределения случайной величины [24]

$$P_{НБП} = F_q(D / m_{zs}), \quad (1.1.9)$$

где $F_q(D / m_{zs}) = F_q^*(y)$ - интегральная односторонняя функция распределения суммарной погрешности (места судна и положения границы опасной зоны НО), которую выбирают из табл. 4, 6 и 7 приложения для q – го закона распределения суммарной погрешности. Аргументом таблиц является $y = D / m_{zs}$. Здесь $F_q^*(y)$ – стандартная табулированная односторонняя функция распределения; m_{zs} - суммарная генеральная СКП места судна и положения границы опасной зоны НО, действующая по оси

Oz , которая соединяет корабль и опасность; q – общий символ закона распределения погрешностей НП.

Вероятность того, что корабль, следующее по оси симметрии назначенной полосы маневрирования шириной $L_{\text{ПМ}}$, не пересечёт ее границы под влиянием погрешностей, действующих в направлении, перпендикулярном к оси полосы, рассчитывают по формуле

$$P_{\text{НБП}} = F_q^{\text{д}}(L_{\text{ПМ}}/2m_{zs}), \quad (1.1.10)$$

где $F_q^{\text{д}}(L_{\text{ПМ}}/2m_{zs}) = F^{\text{д}}(y)$ – интегральная двусторонняя функция распределения, равная

$$F^{\text{д}}(y) = 2[F^*(y) - 0,5]. \quad (1.1.11)$$

Вероятность $P_{\text{НБП}}$ рассчитывают при автоматических вычислениях непрерывно для двух вариантов:

а) текущую вероятность, соответствующую величине D , которая имеет место в текущий момент времени, и б) минимальную при прохождении данной НО заданным курсом, для кратчайшего расстоянию D_{min} и/или максимальной СКП $m_{zs \text{ max}}$. При ручных вычислениях вероятность $P_{\text{НБП}}$ рассчитывают, как правило, для заданного положения места судна на линии пути.

Основную часть расчетов НБП выполняют, как правило, в процессе предварительной подготовки корабля к выходу в море. Результаты расчетов, выполненных для определенной совокупности условий, сохраняются вплоть до изменения условий и не требуют повторения.

Цели решения расчетных задач НБП состоят в следующем:

- оценивание безопасности маршрута движения или заданной линии пути (ЗЛП) судна и возможностей обеспечения безопасности в конкретных условиях плавания;
- коррекция маршрута или ЗЛП в необходимых случаях;
- обоснование маневра судна с проверкой его безопасности;
- оценивание состояния и степени обеспеченности НБП кораблей соединения, военно-морской базы флота.

Оценка навигационной безопасности маршрута движения, линии пути, площади, в которой маневрирует корабль, состоит в проверке:

- достаточности удаления этих элементов от опасных зон НО;
- наличия достаточного запаса глубины под килем по маршруту движения и по ЗЛП судна с учетом его фактической осадки и проседания на мелководье и вследствие волнения моря.

Коррекция маршрута или линии пути заключается в установлении достаточного их удаления от опасных зон НО. Достаточное удаление линии пути судна от НО характеризуется минимальным допустимым (безопасным) расстоянием $D_{\text{бзп}}$, при котором обеспечивается безопасный проход (без касания предупреждающей линии или захода в опасную зону НО) с вероятностью не ниже заданной.

Требования к точности обсервованного и/или счислимого места судна. В отменённой резолюции ИМО А-529 (13) установлены требования к точности судовождения для двух стадий плавания: первую стадию составляет вход в гавань и подходы к ней, а также воды, у которых ограничена свобода маневра; вторая стадия распространяется на плавание в других водах. На первой стадии плавания требования к точности судовождения определяются местными обстоятельствами. На второй стадии требования к точности судовождения даются в виде предельной с вероятностью 0,95 радиальной погрешности обсервованного или счислимого места судна, равной 4% расстояния до ближайшей НО с максимумом в 4 мили. ИМО Резолюция [48] устанавливает требования к точности места судов на первой стадии плавания в виде радиальной предельной погрешности, равной 10 м при $P'=0,95$.

Наконец, ИМО Резолюция [50] рассматривает три фазы плавания: стеснённые воды при интенсивном судоходстве; стеснённые воды при малой интенсивности судоходства; открытое море. Для первых двух фаз требуемая точность места судна характеризуется предельной с $P' = 0,95$ радиальной СКП $R^{\wedge}=10$ м, для третьей фазы $R^{\wedge}=100$ м. Первое значение оправдывается необходимостью автоматического управления движением судов в стеснённых водах, вплоть до обеспечения швартовных операций. Второе значение можно объяснить необходимостью визуального обнаружения спасательных средств потерпевшего катастрофу судна в плохую погоду и ограниченную видимость при их поиске по известным координатам. В условиях обычного мореплавания, по оценке В. С. Болдырева, радиальная СКП $M = 1$ миля обеспечивает удержание судна на ЗТД с такой точностью, что удлинение пути по сравнению с ЗТД не превосходит десятых долей промили, и эта величина является достаточной для океанского и морского плавания.

Выше говорилось о возможности установления значительно более высокой заданной вероятности до $P' \geq 0,999$. В отечественных документах для судовождения требования к точности плавания в море вдвое выше по сравнению со [49] и составляют 2% от расстояния до НО, но не более 2 миль [38].

1.2 Анализ навигационной аварийности судоходства и кораблевождения

Классификация навигационных аварий

В ВМФ РФ навигационные аварийные случаи с кораблями и судами подразделяются на *аварии* и *аварийные происшествия* в зависимости от тяжести последствий случая. Тяжесть последствий характеризуется, например, продолжительностью восстановительных ремонтных работ. Представляют интерес и другие виды классификации аварийности.

1. В соответствии с «Международным кодексом по проведению расследований аварий и инцидентов на море», принятым в рамках ИМО Резолюции А- 849 (20) 27. 11. 1997 г. , даётся следующая классификация аварийных случаев:

авария на море – событие, которое произошло при эксплуатации или в связи с эксплуатацией судна и представляет собой гибель или серьёзное ранение человека, или

потеря человека с судна; гибель, или предполагаемая гибель или повреждение, или оставление судна; посадка судна на грунт; лишение его возможности движения; участие в столкновении; ущерб окружающей среде, вызванный повреждением корабль или столкновением кораблей;

очень серьёзная авария (катастрофа) – авария, повлекшая полную гибель судна, гибель человека или или серьёзное загрязнение моря;

серьёзная авария – авария, не квалифицируемая как катастрофа, но которая повлекла: пожар, взрыв, посадку на мель, навал, штормовое или ледовое повреждение, трещину в корпусе или предполагаемый дефект корпуса; конструктивное повреждение, в результате которого корабль стало немореходным; загрязнение моря (независимо от количества сброса); поломку, потребовавшую буксировки или помощи с берега;

инцидент на море – событие, связанное с эксплуатацией судна, которое повлекло угрозу судну или человеку, или в результате которого могли произойти серьёзное повреждение судна, пострадать человек или нанесён вред окружающей среде и объектам.

В торговом флоте России с 1990 г. действует «Положение о порядке расследования, классификации и учёта аварийных случаев с судами», (ПРАС-90) и с 1992 г. – «Инструкция по применению ПРАС-90». В этих документах введено понятие *аварийного случая* (АС) как события, которое привело к бедствию в результате воздействия непреодолимых стихийных сил природы или экстремально тяжёлых гидрометеорологических (ГМ) условий плавания, различных повреждений судна, смещения груза или изменения его физико-технических свойств, посадка или касание о грунт, повреждение кораблем береговых сооружений или средств навигационного оборудования, другого судна, потери буксируемого объекта и намотки сетей или троса на винт.

Аварийные случаи подразделяются следующим образом:

кораблекрушение – АС, в результате которого корабль погибло или полностью разрушено (восстановление невозможно), или в результате которого потерян буксируемый кораблем объект;

авария – АС, в результате которого погиб человек, или АС с пассажирским судном, при котором полученные повреждения привели к утрате хотя бы одного мореходного качества, или возникли препятствия к продолжению производственной деятельности;

аварийное происшествие – АС, при котором полученные повреждения привели к утрате хотя бы одного мореходного качества и/или возникли препятствия к продолжению производственной деятельности; АС, при котором корабль находилось на мели менее 24 ч, хотя утраты мореходных качеств не произошло; АС, при котором корабль незначительно повредило подводный кабель или трубопровод, или береговое сооружение и пр.,

Представляет интерес классификация аварийных случаев, принятая в отечественной и международной авиации [16]. Здесь аварийные происшествия (АП) в зависимости от степени повреждений воздушного судна (ВС) и тяжести наступивших последствий подразделяются на:

- катастрофы – АП, приводящие к гибели или пропаже без вести какого-либо лица, находящегося на борту ВС, или к гибели ВС, или к значительному ущербу, нанесённому окружающей среде;

- аварийные происшествия – случаи, связанные с серьёзными повреждениями или с потерей ВС, но без гибели людей;

- инциденты – случаи, связанные с отклонением от нормального функционирования ВС, экипажа, служб управления и обеспечения полетов; инциденты создают угрозу, но не заканчиваются АП благодаря действиям экипажа или стечения благоприятных обстоятельств.

По нашему мнению, целесообразно расширить принятую в кораблеводстве классификацию случаев навигационных происшествий с целью повышения чёткости

классификации и уровня расследования случаев. Вариант классификации может быть таким:

- катастрофа корабля или судна в результате столкновения с НО или попадания в область НО гидрометеорологического происхождения – случай, связанный с гибелью людей, гибелью или потерей судна, или нанесением значительного ущерба окружающей среде (сумма ущерба превышает стоимость судна с грузом);

- навигационная авария - случай с кораблём или судном, в результате которого оно получило повреждения, вызвавшие потерю мореходности, убытки от которых превышают установленную сумму (например, 10 тыс. долларов США), или случай нахождения судна на мели в течение установленного времени (например, 48 ч и более). В качестве «случаев» рассматриваются посадки на мель, рифы и пр.; удары об естественные или искусственные препятствия типа скал, причалов, буровых вышек и т. д.; удары о грунт при движении судна на волнении моря или выбрасывание судна волной на берег; образование трещин в элементах конструкции судна в результате ударов о воду и/или изгибов корпуса при плавании в области урагана, и т. п.;

- навигационное происшествие – событие типа навигационной аварии, сопряжённое с меньшими убытками и более коротким временем пребывания на мели;

- навигационный инцидент – событие с судном типа навигационного происшествия, при котором убытки отсутствуют или не превышают установленной величины, например, 1 тыс. долларов США; в случае посадки на мель инцидент называют касанием грунта;

- угрожающая (опасная) навигационная ситуация - касание или пересечение кораблем границы опасной зоны НО и нахождение в ней, создающее угрозу навигационного происшествия.

Навигационные катастрофы, аварии, происшествия и инциденты расследуются комиссиями разного уровня. Опасные навигационные ситуации могут рассматриваться штабом соединения кораблей с главной задачей выработки рекомендаций по предотвращению подобных ситуаций в будущем.

При дальнейшем изложении мы будем по возможности ограничиваться одним общим термином навигационная авария (НА), или просто авария.

Анализ аварийности судоходства

Анализ аварийности для судов ММФ СССР за период 1976-1986 гг. выполнен в [134].

Наибольший интерес при анализе аварийности судоходства представляет зависимость аварийности от района плавания, времени суток и условий видимости, а также от времени вахты судоводителей, сохраняющая свой характер и в настоящее время.

Влияние района плавания. В табл. 1.2.1 [134] показано распределение посадок на мель и касаний грунта между видами районов плавания, в процентах от общего количества НА. Нетрудно заметить, что эти случаи аварийности преобладают при плавании в реках и каналах, а также в портах и на рейдах. Реже это случается в проливах и на фарватерах и ещё несколько реже в открытом море и на прибрежных участках.

Всего лишь 14% НА за рассматриваемый период пришлось на открытое море и прибрежные участки. Остальные 86% НА происходили на реках и каналах, в проливах и на фарватерах, в акватории портов и на рейдах. Ясно, что именно эти районы являются наиболее опасными для плавания в силу ограниченных (в большинстве случаев) глубин, наиболее интенсивного судоходства, необходимости при движении по рекам и

каналам нередко иметь вынужденно высокую скорость, часто не соответствующую условиям видимости.

Таблица 1.2.1. Распределение аварий по районам плавания

Районы плавания	Доля аварий, %
Реки и каналы	37
Проливы и фарватеры	18
Порты и рейды	30
Открытое море и прибрежные участки	14

Дополнительный анализ характеристик районов показывает, что в мелководных районах, будь то реки и каналы, порты и рейды, доля НА примерно вдвое больше, чем в глубоководных. Это же можно сказать и относительно судов с осадкой, близкой к предельной для плавания на конкретных участках.

Повышенные трудности условий плавания сами по себе не определяют НА. Но они являются тем фоном, на котором быстрее и рельефнее проявляются недостатки теоретической и практической подготовки, ошибки судоводителей и нарушения ими правил и инструкций, недостатки организации судовой и штурманской служб.

Влияние внешних условий плавания. К внешним условиям относятся характер видимости и время суток. Распределение НА в зависимости от времени суток и условий видимости, в процентах от общего числа НА, охарактеризовано в табл. 1.2.2 [134]. Анализ таблицы позволяет заключить, что при плавании в условиях ограниченной видимости корабль подвергается большему риску. Количество НА в указанных условиях составляет 23% их общего числа. Для объективного сравнения частоты НА при ограниченной и нормальной видимости необходимо отнести их число в том и другом случае к суммарному количеству туманных и ясных дней. Поскольку на ограниченную видимость (около 1 мили) приходится в средних и высоких широтах около 5% времени года, то получим, что частота НА при ограниченной видимости в 5 раз выше, чем при нормальной.

Таблица 1.2.2. Распределение НА по времени суток и условиям видимости, проценты

Район плавания	Время суток и условия видимости			
	Ночь		День	
	Туман	Ясно	Туман	Ясно
Реки и каналы	5	15	5	13
Проливы и фарватеры	3	9	2	5
Порты и рейды	3	14	2	11
Открытое море и прибрежные участки	2	7	1	4

Содержащиеся в табл. 1.2.2 данные показывают, что влияние тёмного времени суток на навигационную аварийность судоходства не очень велико по сравнению с другими факторами. Однако, оно всё-таки значительно в районах интенсивного судоходства, где даже кратковременное ослабление внимания может привести к запоздалому манёвру, выходу из безопасного сектора огней, позднему обнаружению огней опасно сближающегося судна и непродуманному изменению курса в сторону НО. С другой точки зрения, при плавании в реках и каналах ночью в тумане береговые и судовые огни, а также огни навигационного ограждения обнаруживаются раньше, чем в светлое время в тумане. По этим причинам в целом частота НА в тёмное время суток в 1,3 раза выше, чем в светлое.

Опасные отрезки времени. Согласно [134], уровень навигационной аварийности на вахтах разных помощников капитана не одинаков. Пики частоты НА приходятся на ночную вахту второго помощника капитана (частота вдвое выше среднего значения) и на конец вечерних вахт четвертого и третьего помощников (частота в 1,6 раза выше). Основными причинами такого положения являются недостатки в организации судовой и штурманской служб, в том числе систематически не планируемый и не контролируемый отдых судоводителей. Не отдохнувший второй помощник через некоторое время после заступления на ночную вахту теряет остроту восприятия обстановки, становится менее активным; качество наблюдения резко ухудшается. Это делает промежуток времени с 23 ч до конца вахты второго помощника капитана наиболее опасным. Два других опасных интервала продолжаются по 30 - 40 мин. и совпадают с моментами указанных выше смен вахт. При этом сменяющийся вахтенный помощник отвлекается на исполнение формальностей, связанных со сдачей вахты, а заступивший ещё не вник в обстановку.

Основные причины навигационной аварийности. В большинстве случаев к НА приводит не одна, а несколько причин. Эти причины, «включаясь» последовательно, способствуют вначале возникновению предпосылки к опасной навигационной ситуации, которая, развиваясь, перерастает в угрожающую ситуацию, после чего корабль садится на мель. В соответствии с этим и с учётом рекомендаций [16] причины НА можно подразделить на главные, непосредственные и сопутствующие. *Главными* являются причины, создающие для судна (и/или судоходства в целом) опасную ситуацию, приводящие к изначальному возникновению угрозы. Обычно главных причин бывает две или большее число. *Непосредственные* причины – те, что ставят корабль в угрожающее положение и затем приводят его к НА. *Сопутствующие* причины усугубляют ситуацию или способствуют эффекту непосредственной причины. На рис. 1.2.1 приведена блок-схема причинных связей НА. В качестве главных причин часто выступают, например, недостаточный уровень профессиональной подготовки судоводителей, сложные условия плавания или их внезапное усложнение, плохая организация судовой и штурманской служб. Сочетание двух – трёх из этих причин является

главным фактором, создающим опасную ситуацию при большинстве НА судов.



Рис. 1.2.1. Блок-схема причинных связей навигационных аварий

В табл. 1.2.3 [134] приведено распределение частот основных (главных и непосредственных) причин аварий судов ММФ за период с 1976 по 1986 г. В 60% случаев аварий основная причина состояла в неудовлетворительном контроле за местом судна. Рассмотрение описаний аварийных ситуаций, приведенных в [134] позволяет добавить сюда отсутствие или некачественную оценку точности места судна и отсутствие проверки уровня навигационной безопасности судна. Очевидно, что, если бы эти задачи стояли перед судоводителями, они вынуждены были бы более качественно контролировать место судна. Не менее важной причиной аварийности является неудовлетворительное наблюдение за обстановкой, сопутствующее значительному числу аварий. Сюда относятся случаи плохо организованного визуального и отсутствия радиолокационного наблюдения. Столь же серьезная причина состоит в плохо организованном дублировании по многим аспектам наблюдения за обстановкой и управления кораблем. Например не выполняются обсервации и не ведется счисление при плавании по обвехованным каналам и фарватерам и не контролируется нахождение вех и буёв ограждения на своих местах; не организуется параллельное наблюдение визуальное и радиолокационное; поворот судна осуществляется глазомерно без контроля времени поворота, поворотных пеленга и/или дистанции, и т.д.

Таблица 1.2.3 Распределение частот основных причин аварий судов ММФ СССР

Одна или две основные причины аварии	Частота
1. Неудовлетворительный контроль за местом судна В том числе:	0,59
- при подходе к якорной стоянке, входе в порт, в процессе девиационных и других специальных работ	0,11
- в узкостях	0,31
- в открытом море, на подходах к берегу	0,15
- на якорной стоянке	0,03
2. Неудовлетворительная организация наблюдения	0,5...0,6
3. Неудовлетворительная организация дублирования	0,5...0,6
4. Потеря ориентировки относительно опасностей	0,13
5. Передоверие управления кораблем лоцману	0,10

6. Плавание без лоцмана в районах лоцманской проводки	0,09
7. Ошибки в управлении кораблем в штормовых условиях	0,12
8. Чрезмерная скорость	0,07
9. Ошибочные действия при расхождении с судами в каналах	0,08
10. Незамеченные вовремя ошибки рулевых	7 случаев
11. Психо-физиологические факторы (сон на вахте, прострация)	11 случаев

Современные данные об аварийности торгового флота РФ приведены в табл. 1.2.4 [103].

Таблица 1.2.4 Распределение числа аврийных случаев по годам

Год	2002	2003	2004	2005	2006
Катастрофы	3	6	7	7	7
Аварии	4	1	4	1	3
АП	55	35	37	58	64

Из всех аварий на долю навигационных в 2006 г. приходится 56, или 88%. По данным [117], торговый флот РФ насчитывает 1064 судна. Интенсивность НА составляет величину $\lambda = 56/1064 = 0,035$. До начала экономических преобразований в СССР эта величина, согласно [134], была равна 0,02. Положение дел торговом флоте РФ ухудшилось в 1,75 раза.

В [134] отмечают также и «объективные» факторы навигационной аварийности, несвязанные непосредственно с деятельностью судоводителей. К ним относятся недостатки организации судоходства и обеспечения мореплавания и внешние физико-географические условия. К первому из этих факторов можно отнести: отсутствие, недостаточность или ненадёжность средств навигационного обеспечения плавания; неточность карт и лоций; неопределенность навигационной информации о временном или постоянном изменении координат или характеристик огней или сигналов средств навигационного оборудования (СНО); отсутствие оперативных данных о направлении и скорости течения и т. д. Свежий пример действия таких факторов даёт столкновение на полном ходу с рифом атомной подводной лодки «Сан-Франциско» военно-морского флота США. Непосредственной причиной столкновения оказалось то, что риф не был нанесен на электронную карту, а сопутствующей – отсутствие дублирующей прокладки на бумажной карте.

Вторым «объективным» фактором могут быть сложные и грозящие катастрофой гидрометеорологические условия. Необходимо ещё раз отметить, что сами «объективные» причины определяют аварии в очень редких случаях. Гораздо чаще они являются катализатором, выявляющим слабые стороны подготовки судоводителей, которые, не преодолев отрицательных факторов обстановки, приводят корабль на мель. Возвращаясь к аварии «Сан-Франциско», нужно сказать, что в отечественном ВМФ существует требование к штурманам проверять навигационную безопасность каждого следующего курса по бумажной карте. Лучше тысячу раз проделать чрезвычайно простую и кажущуюся ненужной работу, чем один раз вернуться в базу с расплющенной в

лепёшку носовой оконечностью и славить Бога, что от удара не сдетонировали и не взорвались торпеды.

Рассмотрение табл.1.2.3 приводит к выводу, что в большинстве случаев одной из важных причин НА является так называемый «человеческий фактор». Влияние человека на события разнообразно. Человек может своими решительными и единственно правильными действиями спасти корабль от НА, а может своими робкими, запоздалыми или ошибочными мерами посадить его на мель или привести к столкновению с другим кораблем. В данной работе под человеческим фактором понимаются только качества и действия, которые имели отрицательные последствия. Человеческий фактор проявляется главным образом через некомпетентность – слабые знания и недостаточные умения, и/или через недисциплинированность, неисполнительность, необязательность. Борьба с навигационной аварийностью кораблей должна предусматривать, в том числе и ограничение влияния человеческого фактора, как в сфере его профессиональной подготовки, так и в сфере выработки необходимых профессиональных качеств.

На основании анализа навигационной аварийности отечественного и иностранного судоходства, учебников по навигации и судовождению и монографий по проблеме навигационной аварийности, программ подготовки судоводителей и качества подготовки выпускников некоторых высших учебных заведений, можно сделать следующий вывод. Решение проблемы сокращения навигационной аварийности требует дальнейшего развития и обобщения навигации, теоретических основ навигационной безопасности плавания, методов и способов решения задач НБП в разных условиях плавания, способов уменьшения влияния человеческого фактора.

Анализ аварийности кораблей ВМФ

В табл. 1.2.5 приведено распределение основной вины должностных лиц при НА в виде частоты (экспериментальной вероятности) \tilde{P} рассматриваемого события, рассчитанная в результате анализа 105 аварийных происшествий. Видно, что недисциплинированность и низкий уровень профессиональной подготовки должностных лиц вносят примерно одинаковый вклад в происхождение навигационных аварий (52 и 48% соответственно). Грубые ошибки, возникающие вследствие недисциплинированности командира корабля или капитана судна, приводят к аварии вдвое чаще, чем такие же ошибки штурмана. Применительно к командирам кораблей недисциплинированность чаще всего бывает связана, с выполнением маневров, которые не предварялись расчетами, а иногда даже и прокладкой линии курса на карте, а низкий профессиональный уровень проявляется в неспособности организовать должным образом штурманскую службу (ШС) корабля и выполнять в ней свои функции.

Таблица 1.2.5. Распределение основной вины должностных лиц

Главная причина аварии	\tilde{P}, %
Грубые ошибки, обусловленные недисциплинированностью	52

должностных лиц, в том числе:	
- командира корабля, капитана судна,	33
- штурмана,	17
- старшего начальника, присутствовавшего на борту	2
Грубые ошибки, обусловленные низким уровнем профессиональной подготовки, в том, числе:	48
- командира корабля, капитана судна,	7
- штурмана	41
Всего:	100

В табл.1.2.6 приведено распределение наиболее важных из совокупности причин, приводящих к авариям. Особенно часто главной причиной аварии являются:

- халатная работа штурмана или судоводителя (отсутствие счисления пути, коррекции счисления обсервациями, нарушение самых элементарных правил штурманской практики),
- не обоснованное расчетами маневрирование,
- не достаточно обоснованный поворот.

Эти причины в сумме дают 68,5% аварий.

При сложении частот \tilde{P} в табл. 1.2.6 получается больше 100%, так как в некоторых случаях имели место 2 одинаково важные причины.

Таблица 1.2.6. Распределение основных причин аварий

Одна или две основные причины аварии	$\tilde{P}, \%$
Халатная работа штурмана	26,5
Маневрирование, не обоснованное расчетами	24
Недостаточно обоснованный поворот корабля	18
Неумелая оценка точности местоположения	11,5
Однообразие средств контроля места	10,5
Неисправности МСН, большие погрешности, отсутствие поправок	8,5
Нерешительный доклад штурмана командиру об опасности	5,5
Неверное ориентирование в обстановке	5
Отсутствие реакции командира на правильный доклад, растерянность командира	4
Плохая организация наблюдения (в том числе не включалась РЛС)	4
Невыполнение команды на изменение режима движения	4
Упущения по подготовке к походу	4

Данные, приведённые в табл. 1.2.5 и 6 говорят о том, что в кораблевождении, также как и в судовождении, человеческий фактор играет определяющую роль при возникновении НА. К слову, этот фактор является причиной 60 – 80% аварий в авиации, на железнодорожном транспорте, автомобильных происшествий, случаев снижения мощности атомных электростанций и пр. По-видимому, это коэффициент адаптации человека вместе с техническими средствами к среде. Поэтому для сохранения достигнутого в советском ВМФ низкого уровня навигационной аварийности (интенсивность НА около 2%) и его дальнейшего снижения, нужно уделять людям, обеспечивающим безопасность плавания, еще

большее внимание, добиваясь уменьшения коэффициента адаптации. Основные пути для этого – воспитание и подготовка специалистов.

Представляет интерес анализ условий, в которых происходили НА (табл.1.2.7). Видно, что 80% аварий возникает вблизи берега, из них 56% – в пункте собственного базирования или на ближних подходах к нему. На такие же условия в ММФ приходится 85% аварий [134]. Это требует от командира корабля и его помощников понимания повышенной степени риска, принятия всех необходимых мер предосторожности, хорошего знания театра и особенно района базирования, высокой организации штурманской службы в этих условиях.

Таблица 1.2.7. Распределение условий аварийных происшествий, \tilde{P} , %

Пункт базирования	Малознакомый порт	Открытое море	Видимость		Время суток	
			плохая	хорошая	ночь	день
56	24	20	77	23	42	58

Экспериментальная вероятность (частость) аварий кораблей ВМФ СССР в сравнительно благополучном 1987 г. оказалась равной:

$$\tilde{P}_A = n / N \approx 5 / 300 \approx 0,02, \quad (1.2.1)$$

где N - приближенное количество боевых кораблей Советского Союза в Европе, согласно Заявления Советского Правительства, n – количество приходящихся на эти корабли аварий.

Проиллюстрируем примером влияние человеческого фактора на развитие аварийной ситуации. На подводной лодке, находящейся в районе мерной линии недалеко от берега, возникла неисправность горизонтальных рулей. Условия погоды: ветер 60°, 9 м/с, море 1 балл, мелкобитый лед сплоченностью 3 – 4 балла, снежные заряды, видимость 0,5...2,5 мили.

Для устранения неисправности командир корабля выбрал курс 255°, обеспечивающий наименьшую заливаемость и качку (это при волнении моря в 1 балл?!), в сторону расположенного близко берега. В 10.10 корабль лег на этот курс, имея скорость 4,3 уз. В этот момент расстояние до берега по курсу равнялось 60 кбт, а до банки с минимальной глубиной 3,9 м, через которую проходила линия курса, – всего 40 кбт. Однако командир корабля не ознакомился по карте или планшету с навигационной обстановкой и не знал этих деталей. Понимая, что корабль движется в сторону опасных глубин, он ограничился командой штурману: «За изобату 30 м не заходить!», после чего все внимание сосредоточил на работах в надстройке, направил туда вахтенного офицера в качестве старшего, запретил вахтенному радиометристу докладывать обстановку («чтобы не отвлекал внимания»?!), разрешил старшему помощнику отдыхать в каюте, сигнальщика на повышение бдительности в наблюдении за обстановкой не ориентировал, не потребован периодических докладов глубины под килем. Таким образом, командир сознательно лишил себя информации о внешней обстановке, отключился от нее, полностью доверив навигационную безопасность штурману.

Штурман действовал вопиюще безграмотно, нарушая элементарные требования навигации, известные курсанту 3 года обучения: после того, как корабль лег на курс 255° места не уточнил, в навигационной безопасности проложенного курса не убедился, не рассчитал и не доложил командиру возможное время движения назначенным курсом, время поворота и новый курс. С получением приказа «За изобату 30 м не заходить»

не рассчитал и не доложил командиру время выхода на изобату и сторону поворота для избегания пересечения указанной изобаты. За рассматриваемый интервал времени от 10.10 до 10.49 не произвел ни единой обсервации. Что делал в это время? Можно предположить, что не делал ничего, надеясь совершить поворот в момент, когда перекрестие автопрокладчика придет в намеченную точку. Но этот момент прозевал, в результате чего корабль пересек запретную изобату и приказание командира было нарушено.

В 10.49 командир корабля обнаружил впереди по курсу в расстоянии 8 кбт торосы льда на банке 3,9 м. Не зная обстановки, он приказал застопорить ход, штурману определить место и доложить сторону поворота. Последней приказание об обсервации не выполнил и, ориентируясь по перекрестию автопрокладчика, накопившего к тому времени невязку 1,5 кбт в сторону опасности, настойчиво в течение нескольких минут рекомендовал поворот вправо. Из-за влияния ветра (в правый борт), льда и малой скорости корабля радиус циркуляции в её начале оказался равным 5 – 6 кбт, момент начала поворота был упущен и на циркуляции подводная лодка коснулась торосов. Учитывая, что слева по курсу расположена банка 4,9 м, следовало отойти от опасностей задним ходом или поворачивать влево с использованием не только руля, но и машин. Однако для принятия такого решения командиру нужно было видеть карту собственными глазами, а не глазами штурмана.

Причин такого развития ситуации несколько.

Во-первых, недооценка командиром корабля задачи обеспечения навигационной безопасности при плавании вблизи берега, его неудовлетворительная морская и штурманская подготовка, да, по-видимому, и обычная человеческая лень. Было же время и до 10.10 и после этого момента спуститься в штурманскую рубку и разобраться в обстановке; тем более необходимо было это сделать с прекращением движения в 10.49.

Во-вторых, неудовлетворительная организация, если не сказать отсутствие организации ГКП и РТС в обеспечении навигационной безопасности плавания, что проявилось прежде всего в полной безучастности БИП.

В третьих, неудовлетворительная подготовка штурмана и из ряда вон выходящая организация ШС на подводной лодке. Только в условиях полной безнаказанности и попустительства со стороны командира корабля штурман может позволить себе в подобной обстановке не производить обсервации с требуемой документацией частотой, не вести ручного счисления, не докладывать после завершения поворота времени лежания на курсе и тем более времени подхода к указанному командиром рубежу.

Нет сомнения, что подобные нарушения общеизвестных правил ШС происходили в каждом походе. Любой грамотный командир, не получив доклада о времени следующего поворота или подхода к указанному рубежу, решительно потребует такого доклада, а также и того, чтобы впредь доклад следовал без напоминаний. При этом грамотность командира определяется не столько знанием: навигации, сколько знанием организации ШС

Опыт показывает, что такие взаимоотношения командира корабля и штурмана могут возникнуть, когда командир, имеющий слабую подготовку по кораблевождению, переоценивает своего штурмана и доверяется ему. Штурман же, вместо того, чтобы быть окрыленным таким доверием и работать еще лучше, зазнается, наглеет, перестает совершенствоваться, теряет добросовестность и при неблагоприятном стечении обстоятельств доводит корабль и командира до аварии.

1.2 Предупреждение грубых погрешностей и ошибок

Ошибки штурмана (иногда рулевого) в управлении траекторией движения судна часто являются основной и почти всегда косвенной или сопутствующей причиной навигационных аварий. Эти ошибки являются разновидностью аномальных и необычно больших погрешностей.

Необычно большие погрешности и ошибки

Аномальными для данного ряда погрешностей называют погрешности, закон распределения которых (форма и/или параметры) отличается от закона распределения этого ряда погрешностей [29]. В кораблевождении рассматривают необычно большие (грубые, экстремальные) погрешности для условий измерений НП по сравнению с априорными значениями погрешностей в этих условиях. Не исключённые своевременно грубые погрешности в измеряемых НП смещают obserвованное или счислимое место судна на значительную величину, что может привести к посадке судна на мель. По источникам происхождения грубые погрешности делятся на аппаратурные и личностные.

Аппаратурные грубые погрешности возникают в МСН в процессе измерений НП и обработки информации под действием внешних или необычно возросших внутренних помех, своевременно не обнаруженных неисправностей или изменений условий работы МСН, а также вследствие естественных выбросов случайных процессов погрешностей за установленный уровень, возникающих со случайной периодичностью. Иногда грубые погрешности такого рода ассоциируются с нарушением информационной надежности МСН [39]. Особенностью аппаратурных грубых погрешностей является возможность их длительного присутствия в отсчётах НП и в результатах решения навигационных задач. Это затрудняет их исключение при повторении измерений и повышает роль способов обнаружения таких погрешностей с использованием избыточной и/или привлечением дополнительной информации.

В качестве примеров долго действующих аппаратурных грубых погрешностей можно привести случаи неверного разрешения многозначности фазовых измерений в РНС; случаи необнаруженного выхода гирокомпаса из меридиана; случаи возникновения систематических и возрастания случайных погрешностей координат в ГНСС в периоды восхода и захода Солнца и магнитных бурь в ионосфере, и др.

Личностные грубые ошибки (промахи) возникают при ручном решении и интерпретации результатов ручного и автоматического решения задач судовождения. Вероятность $P_{\text{ГПЛ}}$ возникновения грубых личностных погрешностей в процессе ручного решения навигационных задач подготовленными штурманами зависит главным образом от сложности задачи, психофизиологических особенностей и степени утомлённости штурмана и в среднем для разных специалистов определяется следующими выражениями [84]:

$$P_{\text{ГПЛ}} = 0,0032N_{\text{д}} \text{ при } N_{\text{д}} \leq 50; \quad (1.3.1, \text{ а})$$

$$P_{\text{ГПЛ}} = 0,1 + 0,00122N_{\text{д}} \text{ при } 50 < N_{\text{д}} < 350, \quad (1.3.1, \text{ б})$$

где N_d – количество элементарных действий, выполняемых в процессе ручного решения задачи, которое характеризует её сложность. Расчеты показывают, что уже при $N_d = 30$ вероятность грубой ошибки недопустимо велика $P_{\text{ГПЛ}}=0,1$. Поэтому необходимо принимать специальные меры для удержания вероятности $P_{\text{ГПЛ}}$ в пределах допустимой величины, например, $P_{\text{ГПЛ}} < (0,05 \text{ или } 0,01)$, при которой возникновение ошибки можно считать событием практически невозможным. К таким мерам относятся:

а) Автоматизация решения сложных задач, которая в настоящее время успешно осуществляется в САРП, ЭКНИС и НВС других типов.

б) Разработка и применение простых способов решения задач кораблевождения, характеризуемых числом $N_d < 0 \div 15$ для обеспечения $P_{\text{ГПЛ}}=0,05$ или даже $N_d=3 \div 5$ для $P_{\text{ГПЛ}}=0,01$. Предлагаемые далее и содержащиеся в Методиках МВР-96 табличные и номограммные способы решения ряда навигационных задач в основном отвечают указанным требованиям.

в) Применение, особенно в случае отсутствия простого способа решения задачи с малым числом действий N_d , метода дублирования, состоящего в производстве наблюдений и/или вычислений дополнительными лицами и/или способами.

г) Применение специальных способов проверки отсутствия грубых ошибок в результатах решения задач и в навигационной прокладке, например, анализ величины невязок при определениях места судна или периметров треугольников погрешностей.

Пункты в) и г) данного перечня подходят и для автоматической обработки навигационной информации.

Эффективность метода дублирования

В случае двойного независимого дублирования вероятность $P_{\text{ГП}}$ прохождения грубой погрешности через систему обработки информации равна, в соответствии с теоремой умножения вероятностей независимых событий [24]

$$P_{\text{ГП}} = P_1 P_2, \quad (1.3.2)$$

где P_1 и P_2 - вероятности возникновения грубых погрешностей в каждом из дублирующих каналов обработки информации. Если, например, $P_1=P_2=0,1$, то $P_{\text{ГП}}=0,01$. Простейший пример двойного дублирования состоит в проверке величины невязки между счислимым (СМ) и обсервованным (ОМ) местами судна на отсутствие грубых погрешностей. Такую проверку можно выполнить, например, по условию [70]

$$L_C \leq 2(M_{\text{ОМ}}^2 + M_{\text{СМ}}^2)^{0,5}, \quad (1.3.3)$$

где L_C – длина невязки; $2=0,71 \times 2,8$; значение 2,8 – коэффициент перехода от СКП к предельной погрешности для закона М-распределения (рассматривается далее) и вероятности 0,99; $M_{\text{ОМ}}$ и $M_{\text{СМ}}$ – радиальные СКП обсервованного и счислимого мест. Считается, что при выполнении этого

условия вероятность наличия грубых погрешностей в одном из сравниваемых мест судна не превосходит 0,01.

В случае сравнения двух НП, например, курсов корабля по гирокомпасу и магнитному компасу условие (1.3.3) имеет вид

$$\Delta x = |x_1 - x_2| \leq 2,8(m_1^2 + m_2^2)^{0,5} \quad (1.3.4)$$

где x_1 и x_2 – одномоментные значения первого и второго НП; m_1 и m_2 – СКП этих НП.

Для обнаружения грубых аппаратурных погрешностей МСН и счисления можно рекомендовать штурману производить анализ невязки по (1.3.3) и расхождений курса по гирокомпасу и магнитному компасу, скорости и пройденного расстояния по лагу и числу оборотов винтов при заступлении на вахту и далее через час или в соответствии с требованиями ПОШС.

Ошибки штурмана при управлении движением корабля

Ошибки командира и штурмана при управлении манёврами и движением корабля в узкостях являются одной из основных причин навигационных аварий. Чаще всего такие ошибки проявляются в виде потери контроля за местом судна, ошибочного назначения курса (или скорости движения) или ошибок в моменте начала манёвра. При анализе подобных ошибок следует рассматривать два варианта условий – плавание в оборудованных в навигационном отношении узкостях при хорошей видимости, и плавание в условиях плохой видимости и/или в необорудованных узкостях. В первом варианте обычно безопасность движения судна обеспечивают лоцманскими способами, т. е. визуальным контролем положения судна относительно береговых ориентиров и плавучего ограждения. Во втором варианте – ведением навигационной прокладки на карте, планшете или с использованием ЭКНИС.

Один из способов сокращения числа ошибок в управлении движения судна по ЗТД во втором варианте условий плавания состоит в выборе рациональной периодичности оценивания обстановки и обстоятельств плавания. В работе [58] исследована зависимость вероятности $P_{БРЗ}$ безошибочного принятия решения на манёвр судна или решения навигационной задачи от коэффициента K_3 загрузки судоводителя (или любого субъекта, решающего любую задачу). Коэффициент K_3 определяется выражением

$$K_3 = t_p / \Delta t, \quad (1.3.5)$$

где t_p – время, необходимое для решения определённой задачи, например, оценки обстановки и выполнения требуемого действия с максимальной возможной скоростью; Δt – заданная дискретность решения этой задачи, или время, которым располагает решающий субъект. Эту зависимость характеризует график на рис 1.3.1.

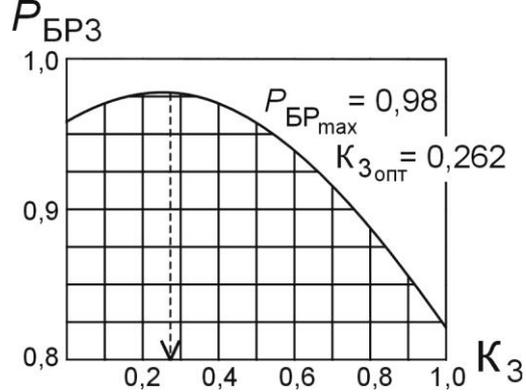


Рис. 1.3.1. График зависимости вероятности $P_{БРЗ}$ от коэффициента K_3

Видно, что максимальное значение вероятности $P_{БРЗ}$ равно 0,98 (к сожалению, не 1,0) и достигается оно при оптимальном коэффициенте занятости $K_{3_{opt}}=0,262$. Представим соответствие этих величин в виде вывода

$$P_{БРЗ} = 0,98 ; 0,97 ; 0,95 ; 0,90 ; 0,85$$

$$K_3 = 0,262 ; 0,42 ; 0,58 ; 0,76 ; 0,91.$$

Дискретность обсерваций при их ручном выполнении и нанесении ОМ на карту или дискретность контроля обстановки командиром по дисплею ЭКНИС или РИС должна позволить не только надежно определить место судна, но также измерить снос и рассчитать курс, обеспечивающий движение по заданной линии пути. При нормально подготовленной карте, на которую нанесены сетки изолиний, линия пути, поворотные пеленги и/или дистанции и пр., хорошо натренированный специалист решает эту задачу за время $t_p=2,5 \div 3$ мин. в случае ручной обработки информации и $1,5 \div 2$ мин. при автоматической обработке. Следовательно, если мы хотим обеспечить безошибочное решение рассматриваемых (и других) навигационных задач при плавании в узкости в плохую видимость с вероятностью, например, 0,97, то дискретность Δt ОМ или контроля обстановки на ЭКНИС хорошо подготовленным специалистом, на основании (1.3.5) при $t_p=3$ мин. должна быть равна

$$\Delta t = t_p / K_3 = 3 / 0,42 \approx 7 \text{ мин.} \quad (1.3.6)$$

Сокращение этого времени, например, до 5 мин. (как в некоторых документах ВМФ), только уменьшает вероятность $P_{БРЗ}$. В случае использования ЭКНИС рациональная дискретность контроля обстановки $\Delta t \approx 5$ мин. В промежутках между операциями на ЭКНИС командир или вахтенный офицер может выполнять другие свои функции. Конечно, перед поворотом судна или при сближении с другим кораблем наблюдения должны производиться чаще или даже непрерывно.