

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ
ФАКУЛЬТЕТ МОРСКОГО СУДОВОЖДЕНИЯ

КАФЕДРА «УПРАВЛЕНИЕ СУДНОМ»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по предмету
«Теория и практика управления судном»

Разработал капитан дальнего плавания
кандидат технических наук
профессор Мальцев Анатолий Сидорович

У Т В Е Р Ж Д Е Н О
на заседании кафедры «Управление судном»
11 сентября 2001 года, Протокол №2

Одесса
2001 год

Содержание

	стр.
Введение	4
1. Теоретические основы управления судном	5
1.1 Система управления движения судна	5
1.2 Средства обеспечения движения судна и его управляемости	12
1.3 Маневренные характеристики судна	42
1.4 Силы и моменты действующие на судно	46
1.5 Определение маневренных элементов из натуральных наблюдений	55
1.6 Управляемость судна	61
1.7 Элементы циркуляции	65
1.8 Влияние параметров корпуса и руля на управляемость	66
1.9 Учет характеристик поворотливости при маневрировании	68
1.10 Совместное влияние гребного винта и руля при маневрировании	71
1.11 Влияния ветра и волнения на управляемость	75
1.12 Условие выполнения реверса на судах с разными пропульсивными комплексами	78
1.13 Расчетные определения коэффициента сопротивления и силы упора	79
1.14 Универсальная диаграмма торможения и ее использование	81
1.15 Экспериментально расчетный метод определения коэффициента сопротивления и силы упора винта	82
2. Якорные операции	84
2.1 Силы действующие на судно стоящее на якоре	84
2.2 Держащая сила якорного устройства	85
2.3 Теоретическое обоснование безопасной якорной стоянки	86
2.4 Выбор места якорной стоянки	87
2.5 Способы постановки судна на якоря	88
2.6 Съемка с якоря	90
2.7 Стоянка судов на бочках	90
3. Швартовные операции	92
3.1 Управление судна при швартовых операциях	92
3.2 Отход судна от причала	94
3.3 Использование буксиров	94
3.4 Особые случаи швартовых операций	96
3.5 Взаимодействие с причалом при навале	99
4. Швартовка с использованием САУ	101
4.1 Теоретические основы действия САУ	101
4.2 Маневрирование с использованием САУ	104
5. Управление судном в узостях и на мелководье	106
5.1 Влияние мелководья и стенок канала на поведение судна	106
5.2 Потеря скорости на мелководье	107
5.3 Особенности поведения судов при плавании на мелководье и в каналах	108
5.4 Проседание судов на мелководье	109
5.5 Способы расчета величины проседания на мелководье	109
5.6 Универсальный метод расчета проседания на мелководье и в каналах	110
5.7 Маневрирование в узостях и каналах	111
5.8 Выбор оптимального маневра по уклонению от опасности	113
5.9 Маневр последнего момента	115
6. Управление судном при плавании в штормовых условиях	121
6.1 Основные факторы действующие на судно в штормовых условиях	121
6.2 Универсальная диаграмма качки судна	123
6.3 Скорость и управляемость на волнении	123
6.4 Штормование судов	124
7. Плавание во льдах	126
7.1 Организация плавания во льдах	126

7.2 Основные принципы управления судами во льдах	127
7.3 Самостоятельное плавание во льдах	128
7.4 Плавание под проводкой ледокола	130
7.5 Теоретическое обоснование выбора параметров движения каравана	132
8. Грузовые и пассажирские операции в море	134
8.1 Операции на открытых рейдах и в море	134
8.2 Передача груза и пересадка людей с судна на судно	135
9. Буксировка судна морем	138
9.1 Способы буксировки судов морем	138
9.2 Влияние ветра и волнения на скорость	140
9.3 Расчет буксирных линий	140
9.4 Организация и проведение буксировки	145
10. Снятие судов с мели	146
10.1 Оценка состояния судна и внешней обстановки при посадке судна на мель	148
10.2. Определение силы давления корпуса на грунт	150
10.3. Основные расчеты по снятию судна с мели	151
10.4. Снятие судна с мели собственными силами с помощью других судов	154
10.5. Эргономические аспекты безопасности мореплавания	157
10.6. Анализ навигационных аварий	165

Введение

История мореплавания насчитывает более 6000 лет. С самого начала навык по управлению судном приобретался исключительно на практике, методом проб и ошибок. При этом процесс приобретения специфических навыков по управлению судном, а через них и знаний, как о нем, так и о процессе маневрирования был слишком длительным.

По мере развития мореплавания личный опыт многих поколений судоводителей различных стран стал распространяться по всему миру, превращаясь постепенно в коллективный. Совокупность навыков анализировалась, обобщалась, систематизировалась и постепенно превращалась в науку об управлении судном.

По мере развития межгосударственных связей и участия военных судов в международных конфликтах, возникла необходимость плавать в районах мирового океана, сведений о навигационных условиях, в которых, не было. По этой причине в дополнение к капитану появился человек, знающий данный район моря досконально – лоцман.

Первоначально он управлял движением судна при подходе к порту и заходе в него единолично, поскольку был монополистом на знание навигационных условий плавания. Постепенно, с появлением подробных карт, капитан имел возможность ознакомиться с районом предстоящего плавания заблаговременно, мог заходить в порт и выходить из него самостоятельно. Однако обязательная лоцманская проводка сохранилась повсеместно, а лоцман из лица, управляющего судном единолично, превратился в советника.

В дальнейшем, с увеличением водоизмещения судов и специализацией их по характеру перевозимых грузов, четко начала прослеживаться тенденция к возникновению конфликта между капитаном и лоцманом, суть которого обусловлена природой процесса управления движением судна.

Консерватизм судоводительской науки и бурное внедрение на мостике судна персонального компьютера существенно облегчило выполнение рутинных штурманских расчетов, однако не позволило решить ряд проблем, которые постоянно возникают перед судоводителем. Среди них необходимо отметить – действие судоводителя при чрезмерном сближении, знание маневренных характеристик и их учет при планировании движения судна, выбор маневра при решении задачи расхождения и ряд других. Необходимо отметить, что маневрирование судна при заходе/выходе из порта и во время швартовых операций производится только по команде капитана и автоматизация этих процессов невозможна, по крайней мере, в ближайшем будущем.

Многие поколения капитанов, кораблестроителей и ученых внесли свой вклад в развитие науки управления маневрами судна. Результаты как теории, так и практики управления движением судна содержатся в работах советских [1,2,3,4,5] и зарубежных [6,7] авторов.

Однако, процесс познания судна, как объекта управления, и его маневрирование нельзя считать законченным. Причиной тому является появление большого количества новых типов судов, многообразие задач, которые выполняют суда на море, а также отсутствие единой систематизированной концепции теории построения систем управления движением судна при маневрировании.

Одним из результатов научно-технического прогресса на морском транспорте является специализация судов по родам грузов для максимального приспособления их к скоростной обработке в портах. По этой причине появились новые типы судов, существенно отличающиеся по конструкции, маневренным и мореходным качествам от прежних. К таким судам необходимо прежде всего отнести: крупнотоннажные танкеры; контейнеровозы с повышенной скоростью хода; использующие новые принципы движения. Появление новых типов судов обусловило некоторые специфические требования к системам и средствам управления их движения, а также к судоводителям, которые входят в состав системы управления.

В этой связи повысились требования к обеспечению безопасности мореплавания, особенно в районах интенсивного судоходства, в узостях и на подходах к портам. Решение этой задачи представляет собой основную проблему защиты окружающей среды от загрязнения. Актуальность этой проблемы возросла с появлением опасных специфических грузов, что предъявляет повышенные требования к обеспечению безопасного управления движением судна.

До тех пор, пока идет сбор, накопление и обобщение опыта по управлению маневрами различных типов судов методом проб и ошибок, приобретение соответствующих знаний будет происходить долго. Для ускорения процесса познания и формирования необходимых навыков по управлению маневрами используются различные виды тренажеров, включая тренажеры с визуализацией обстановки на море. Тем не менее, аварийные происшествия на море часто случаются из-за неверных действий человека при маневрировании. Оказывается, что он не подготовлен к действию в нестандартных и чрезвычайных ситуациях, хотя техника при этом работает исправно.

При рассмотрении вопросов управления судном обычно выделяют и обсуждают вопросы практического маневрирования. При этом основным является изложение личного опыта по выполнению тех или иных морских операций – швартовки, буксировки, постановки на якорь, штормовании и др.

Меньше уделяется внимания способам обеспечения безопасного мореплавания за счет формирования состава и структуры системы управления судном, через знание физических процессов, происходящих при маневрировании.

1. Теоретические основы управления судном.

1.1. Система управления движением.

Движение судна происходит на границе двух сред – воды и воздуха, поэтому на него действуют гидродинамические и аэродинамические силы. Величины, которые описывают состояние судна и его перемещение будем называть параметрами. Очень часто, особенно в теории корабля и автоматического управления, их называют координатами, что вызывает путаницу, при рассмотрении процессов маневрирования в судовождении.

Для обеспечения заданных параметров движения судном необходимо управлять. Управление в обобщенном понимании можно определить как, такая организация функционирования процесса движения судна, которая обеспечивает выполнение поставленных целей, способствующих выполнению функционального назначения судна.

Сам процесс движения с изменяющимися параметрами называется маневрированием. В указанном смысле судно является управляемой системой.

Системой называется, по определению профессора Овчинникова П.Ф., совокупность объектов любой природы, объединенных какими-либо (минимум одним) признаками. Такое определение является обобщенным. Уточняя такое определение, для процесса судовождения, можно предложить такую формулировку понятия "система управления судном": совокупность судовых устройств и элементов, обеспечивающих управление судном при выполнении производственных задач и маневрировании.

Основным свойством системы управления движением судна является его экстремальность. Она имеет двоякую природу. Во первых это означает, что задачей управления является достижение экстремума функции, которая описывает состояние объекта управления (например прийти из одного порта в другой кратчайшим путем, за минимальное время и т.д.).

Во вторых вопрос об экстремальности управления встает при необходимости достижения цели управления минимальными затратами, т.е. использовать ее с максимальной эффективностью (например управление по курсу минимальным числом перекладок руля, с минимальными отклонениями от заданного пути и т.д.).

В первом случае экстремальность управления определяется экстремальностью целей этого управления. Во втором она связана с экстремальностью самого процесса управления. Это означает, что он должен быть оптимальным в определенном смысле. Таким образом управление обладает несколькими иерархическими уровнями, которые схематически изображены на рис.1.1.

При различной степени детализации и использовании других подходов такую иерархию можно строить и дальше. Практически иерархия управления движением судна невелика и существует до 2-го, 3-го уровня. Из рис 1.1. видно, что органами управления, на которые воздействует 2-ой уровень, являются, прежде всего цель и алгоритм 1-го уровня. Кроме того 2-ой уровень может воздействовать непосредственно на первый, с целью повышения эффек-

тивности его функционирования. Растригин Л.А. [11] считает, что экстремальное управление является универсальным, которое обобщает все другие способы.

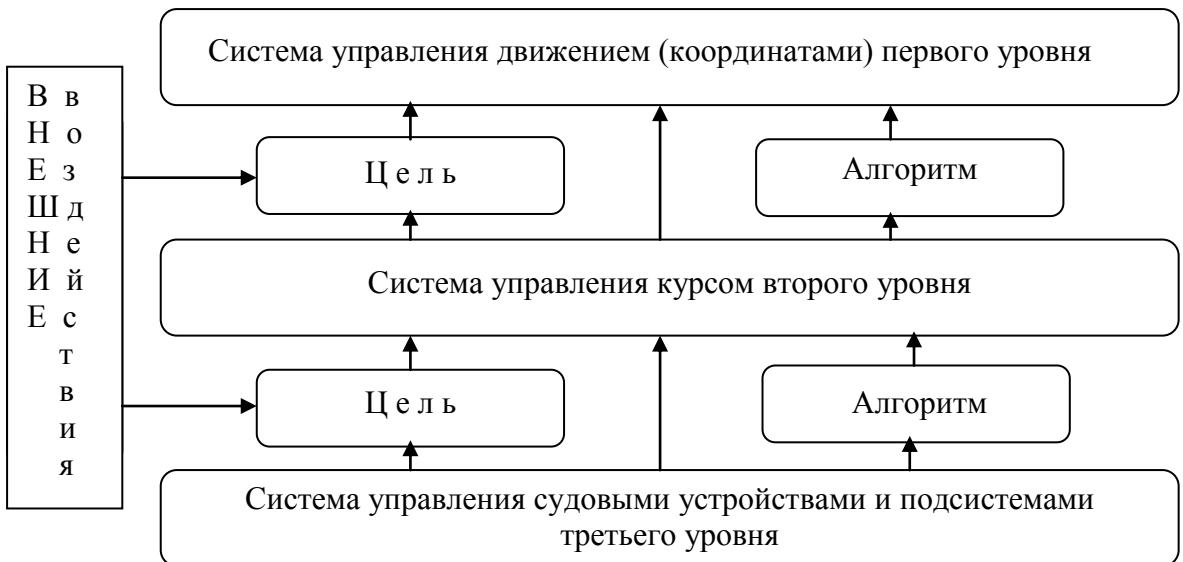


Рис.1.1. Блок-схема иерархической системы управления движением судна.

Применительно к процессу управления судном система имеет функциональную и пространственную замкнутость. По одну сторону стоит судно и его устройства, а по другую внешняя среда. У системы можно выделить составляющие объекты двух типов - множество устройств, элементов и множество связей. Процесс разделения системы на устройства и связи называется структуризацией.

В зависимости от количества устройств и элементов системы можно разделить на два вида: простые и сложные. Если в состав системы входит большое количество взаимосвязанных устройств и элементов различной физической природы, включая человека, которые взаимодействуют между собой для достижения единой цели, то система называется сложной. Поскольку в состав контура управления входит человек, то такие системы называются человеко-машинными (ЧМ). Таким образом, систему управления судном можно определить как сложную структурированную человеко-машинную систему. ЧМ система обладает свойством адаптивности, поскольку она позволяет решать основную задачу при изменяющихся условиях плавания.

Для изучения поведения сложной системы при различных режимах работы, необходимо создать ее модель. Здесь будет уместно отметить, что, несмотря на сложность системы управления судном, цель ее является достаточно четкой и описывается небольшим количеством критериев.

Сложную систему можно разделить на подсистемы, которые, обладая определенной самостоятельностью, подчинены единой цели функционирования системы в целом. Процесс декомпозиции (разделения) на подсистемы предназначен для анализа алгоритма ее функционирования и оптимизации структуры ее синтеза. Для того, чтобы определить важность подсистемы и ее место в системе управления предлагается рассматривать два вида подсистем - главная и подчиненная. Структура системы представляет собой фиксированную совокупность устройств и элементов, а также порядок взаимодействие между ними.

Для описания процесса функционирования системы ее изображают в виде графов, структурной или блок-схемы. Для понимания закономерностей взаимодействия между устройствами и элементами необходимо произвести их упорядоченное размещение в соответствии с существующими связями и поставленной функциональной задачей.

Организация системы управления судном состоит в том, чтобы определенным образом построить упорядоченное расположение судовых устройств и элементов, показать алгоритм их взаимодействия и порядок функционирования при управлении для достижения поставленной цели. При этом возможны различные способы организации системы. Каждый способ

организации определяет ее структуру и набор различных устройств и элементов для обеспечения поставленной цели.

Различают структурную и функциональную организацию. При структурной организации определяется совокупность и назначение отдельных устройств и элементов. При функциональной организации определяется способ распределения обязанностей и взаимодействия между устройствами и элементами. Состояние системы характеризуется параметрами, описывающими ее начальное состояние и протекание процесса при управлении.

На систему действуют различные факторы, которые принято называть входные величины, и они численно характеризуются входными параметрами. Их будем подразделять на внутренние и внешние. Если источник воздействия лежит за пределами судна, то они называются внешними. Если воздействия происходят от судовых устройств, то они называются внутренними. Для судна, как объекта управления, внешними являются силы от воздействия ветра, течения, волнения, взаимодействия с причалом, от буксира, взаимодействия с другими судами и другие. Внутренними воздействиями являются силы от руля, движителя, подруливающего устройства. Их можно также подразделять на контролируемые, те, которые назначает судоводитель, и неконтролируемые, действующие на судно произвольно по времени и величине.

Реакция системы на эти воздействия описывается параметрами, которые называются выходными. Для судна, как объекта управления, выходными являются кинематические параметры движения судна и его координаты на земной поверхности. Выходные параметры, изменение либо сохранение значений которых является целью управления, называются управляемыми. Если управляемые параметры, характеризующие направление и скорость перемещения судна являются неизменными, то можно говорить о том, что судно движется в уставновившемся режиме. Если курс и/или скорость преднамеренно изменяются, то это означает, что судно маневрирует.

Управление системой представляет собой процесс сбора, обработки информации и выработки управляющего воздействия для изменения выходных параметров, с целью приведения системы в заданное состояние. Основой для функционирования любой системы - простой или сложной является заданный алгоритм ее работы (функционирования). Без выработки "заданного алгоритма функционирования системы", ее работа невозможна, поскольку именно таким способом задается цель и назначение данной системы или подсистемы. Кроме того необходимо особенно подчеркнуть, что при синтезе заданного алгоритма внешние возмущения не учитываются. Он определяется только конфигурацией акватории для маневрирования.

Сложность системы определяется количеством устройств и элементов, которые она содержит, а также числом целей, которые перед ней стоят. По числу целей системы бывают одно-целевые и многоцелевые. Количество устройств и элементов определяет число контуров управления, по которым проходят потоки информации. При этом преобладающим является, по-видимому, число целей. Например, подсистема управления якорным устройством имеет одну цель - отдача или выборка якоря, и один контур управления, поэтому ее логично назвать простой.

В зависимости от расположения источника воздействия или информации будем различать внутренний и внешний контуры управления. Внешним контуром будем называть путь прохождения информации, при котором ее источник расположен за пределами судна. Внутренним контуром будем называть путь прохождения информации, при котором ее источник расположен на самом судне.

Управление судном представляет собой многоцелевую задачу. При этом цели управления бывают различной природы и направленности. Они направлены на обеспечение навигационной и мореходной безопасности мореплавания, а также эффективного выполнения производственных задач. Наличие в контуре управления человека, при сбоях в функционировании системы, дает основание говорить о влиянии "человеческого фактора" на безопасность мореплавания и эффективность работы судна.

На основании многочисленного выполнения автором швартовок судов в море (1645) и в порту (980) был произведен анализ функционирования системы управления движением. В

соответствии с полученными результатами выше, анализом и систематизацией существующих сведений в технической литературе по вопросу исследования процесса судовождения, структурную схему системы управления судном предлагается представлять так, как это приведено на рис. 1.2.

В соответствии с указанной схемой в системе можно выделить три главных подсистемы - "Управление движением судна", "Управление технической эксплуатацией судна" и "Управление экипажем судна". Для целей обеспечения навигационной безопасности мореплавания определяющее значение имеет подсистема "Управление движением судна".

Поскольку рассмотрение всех аспектов управления судном представляет собой многостороннюю задачу, мы в дальнейшем будем рассматривать только подсистемы обеспечения навигационной безопасности.

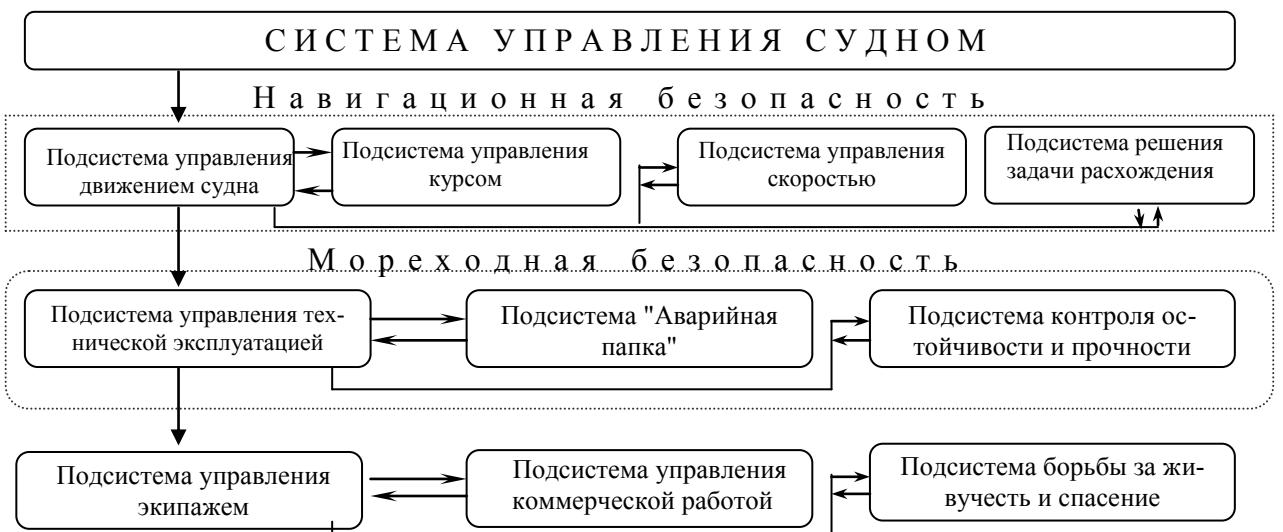


Рис.1.2. Структурная схема системы "Управление судном"

В самом общем виде целью (задачей) управления движением судна, является проводка его, по заданной на карте точками линии безопасного пути, с минимальными отклонениями.

При этом линия пути задается совокупностью прямолинейных и криволинейных участков. Задача управления движением может быть распределена по нескольким уровням- подсистемам и контурам управления (внешним и внутренним). Подчиненными по отношению к этой подсистеме являются подсистемы управления курсом, скоростью и решения задачи расхождения.

Систему управления движением судна можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис.1.3.

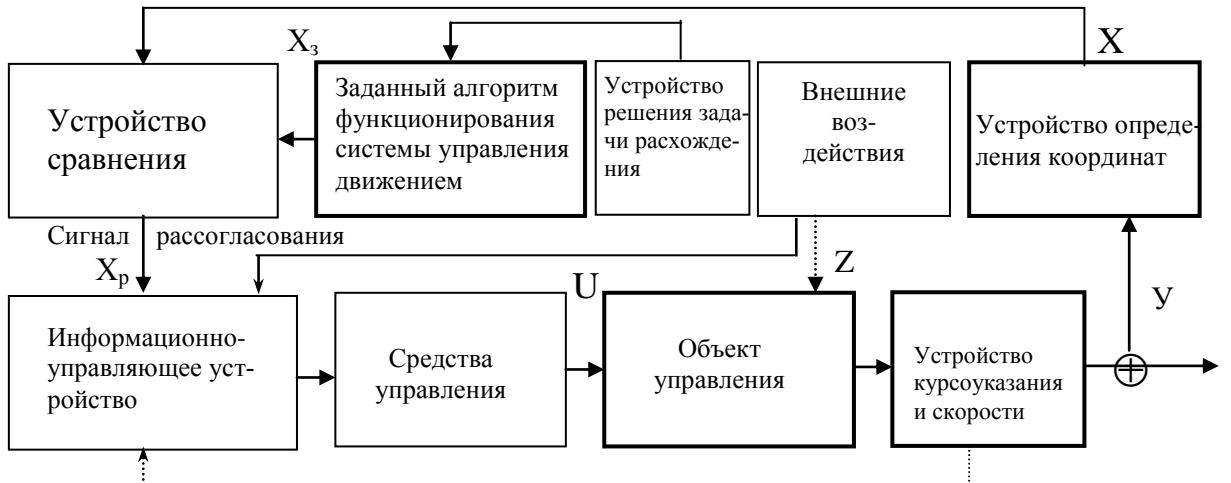


Рис.1.3. Обобщенная структурная схема подсистем обеспечения навигационной безопасности

Объектом управления является корпус судна, который при рассмотрении процесса маневрирования будем представлять в виде траектории точки, расположенной в центре тяжести G.

Информационно-управляющее устройство, получая сведения о курсе, скорости судна, глубине моря, параметрах внешних воздействий и сигнале рассогласования вырабатывает команду на средства управления , для приведения системы в заданное состояние. В качестве элемента этого устройства входит человек-оператор (ЧО).

Средствами управления (устройства - рулевое, движительное, подруливающее, якорное, тормозные и буксиры) вырабатывается управляющее воздействие U, которое приводит систему в заданное состояние X. Величину и продолжительность управляющего воздействия назначает судоводитель, который является ответственным за процесс маневрирования.

Внешние воздействия(Z) -ветер (угол дрейфа α), течение (снос от ветрового, приливного или постоянного течений β_t), волнение(качка, слемминг, заливаемость), взаимодействия (с судами при обгоне и расхождении на небольших расстояниях, с причалами, стенками каналов и фарватеров, дном моря) действуют на судно и вызывают его смещение относительно линии заданного пути. При этом существует два подхода: поправки на их учет вводят при выработке управляющего воздействия; поправки не учитывают при выработке управляющего воздействия, а их действие учитывается по величине сигнала рассогласования. В таком случае сигнал рассогласования может быть настолько большим, что управляющего воздействия будет недостаточно, чтобы привести систему в заданное состояние. Как следствие происходит потеря управления системой, возникают предпосылки для возникновения аварийного происшествия. Если координаты судна выходят за пределы допустимых, то возникает авария.

Заданный алгоритм функционирования системы управления движением определен технологически конфигурацией акватории для маневрирования и представляется в виде географических координат точек на карте, через которые судно должно и может пройти при перемещении и маневрировании. Обычно разрабатывается судоводителем на основании сведений о предстоящем переходе, содержащихся на картах, в лоциях и других пособиях. Он заключается в выборе прямолинейных участков пути и нанесении на карту или в память ЭВМ координат точек пересечения линий пути до и после поворота и прокладке или расчете истинных курсов из предыдущей в последующую. Для построения криволинейных траекторий требуется знание характеристик поворотливости и методов построения или расчета координат точек по их значениям. Необходимо особенно отметить, что он не зависит от внешних и внутренних воздействий. Другой особенностью является то, что он подлежит корректировке только тогда, когда навигационные условия плавания изменяются из-за наличия других судов, которые не позволяют безопасно пройти по линии заданного пути.

Если заданный алгоритм разрабатывается судоводителем устно, а контроль фактического положения производится визуально, без использования технических средств, то надежность системы управления существенно снижается. Обычно по этой причине происходит конфликт между капитаном и лоцманом. Заданный алгоритм функционирования системы управления разрабатывает лоцман, на основании знания им местных условий, и фактически управляет судном, а ответственность за его реализацию, несет капитан. При маневрировании в момент захода в порт и выполнении швартовых операций заданный алгоритм вырабатывается устно, а судном управляют на основании визуальной оценки его положения на акватории, как правило без использования технических средств.

Кроме того, он позволяет объяснить причину навигационных аварий. Можно предложить такое ее определение - "происшествие с судном в процессе маневрирования, при котором управляющего воздействия недостаточно для приведения его в заданное состояние".

Устройство решения задачи расхождения вырабатывает исходные данные для формирования заданного алгоритма функционирования системы управления движением с учетом наличия опасных судов и его корректировки при изменении ситуации сближения с ними.

Устройство сравнения оценивает значения фактических и заданных допустимых координат и вырабатывает сигнал рассогласования X_p , на основании которого информационно-управляющее устройство вырабатывают команду на средства управления. Если устройства сравнения нет и сигнал X_p не вырабатывается, то судно никогда не сможет выполнить по-

ставленную цель управления и прийти в пункт назначения. Необходимо особо подчеркнуть, что система управления движением не может функционировать, без наличия информации о фактическом положении судна. Подсистема управления курсом и скоростью может работать без наличия информации о местоположении.

Устройство определения координат работает на основании использования различных способов получения данных о местоположении - астрономических, визуальных, РЛС, радионавигационных, спутниковых и других.

Устройство курсоуказания и скорости определяет направление движения судна по гирокомпасному или магнитному компасам, а также скорость по лагу или оборотам винта.

Подсистема управления движением судна работает по следующему алгоритму. Заданный алгоритм функционирования системы управления движением вырабатывает координаты точек пути следования. Данные о фактическом положении, поступающие от устройства определения координат, и заданные координаты поступают в устройство сравнения и вырабатывается сигнал об отклонении X_p , значение которого поступает на информационно-управляющее устройство. Сюда же поступают данные о предыдущем заданном курсе, фактических координатах, информация о величине внешних воздействий. На основании полученных данных рассчитываются поправки курса на внешние воздействия и погрешности приборов, и определяется новое значение курса, которое приводит объект управления на линию заданного пути.

Приведенный алгоритм функционирования подсистемы управления движением судна будем называть работающим по внешнему контуру. В ее состав входят подчиненные подсистемы, которые, находясь в составе главной подсистемы, работают по внутреннему контуру и обеспечивают управление определенными устройствами и элементами.

Подсистема управления движением и подчиненные подсистемы образуют систему управления навигационной безопасностью. Блок-схема устройств, обеспечивающих навигационную безопасность движения судна при маневрировании, приведена на рис.1.4.

В процессе функционирования подсистемы управления движением используются основные, фундаментальные принципы, которые определяются способом учета влияния внешних возмущений и использования подсистемы управления курсом. Предлагается рассматривать четыре основных принципа: курсовой, курсовой по возмущению, курсовой по отклонению и комбинированный курсовой.

Курсовой принцип. Структурная схема подсистемы управления движением судна при курсовом принципе управления приведена на рис.1.5. Ее особенностью является отсутствие элементов - устройства определения координат, определения параметров и учета внешних воздействий и устройства сравнения. При функционировании системы работает только подис-

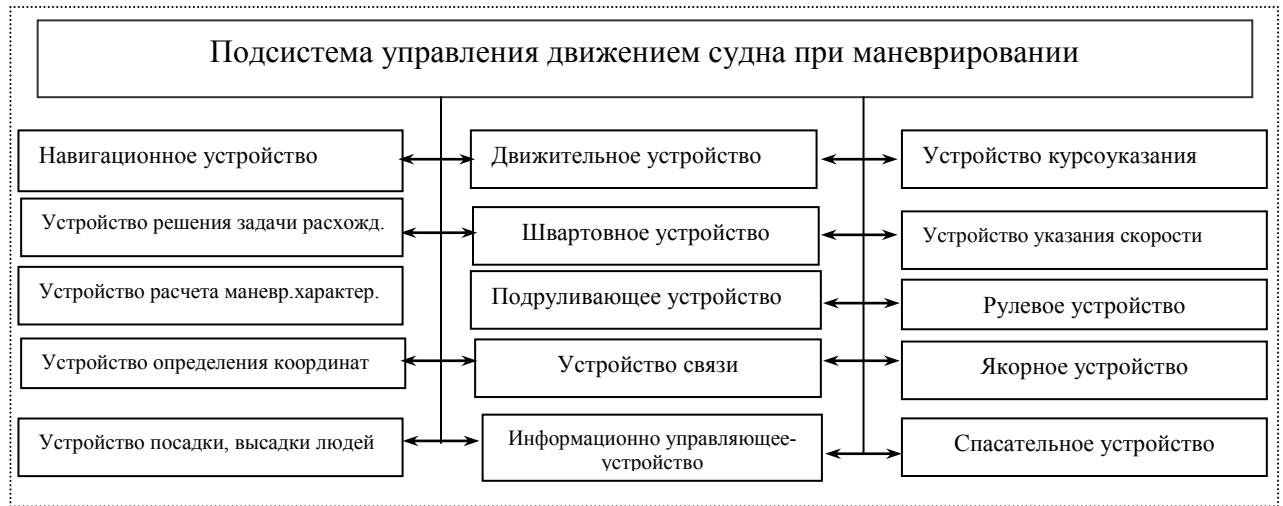


Рис.1.4. Блок - схема устройств, обеспечивающих навигационную безопасность.

тема управления курсом по внутреннему контуру. Заданный алгоритм функционирования вырабатывается вручную или автоматически, путем графического определения, аналитиче-

ского расчета вручную или автоматически пути судна, исправляется поправками компаса и поступает в информационно-управляющую систему, которая автоматически или вручную поддерживает его значение постоянным. Влияние внешних условий, путем введения поправок на их действие на судно, не производится. Это не означает, что они отсутствуют, а просто их влияние не учитывается при выработке управляющего воздействия системы U .

Обычно при математическом описании системы управления движением объект управления рассматривают в виде "черного ящика" и описывают функциональную зависимость между управляющим воздействием на входе U , выходом Y и ее состоянием X .

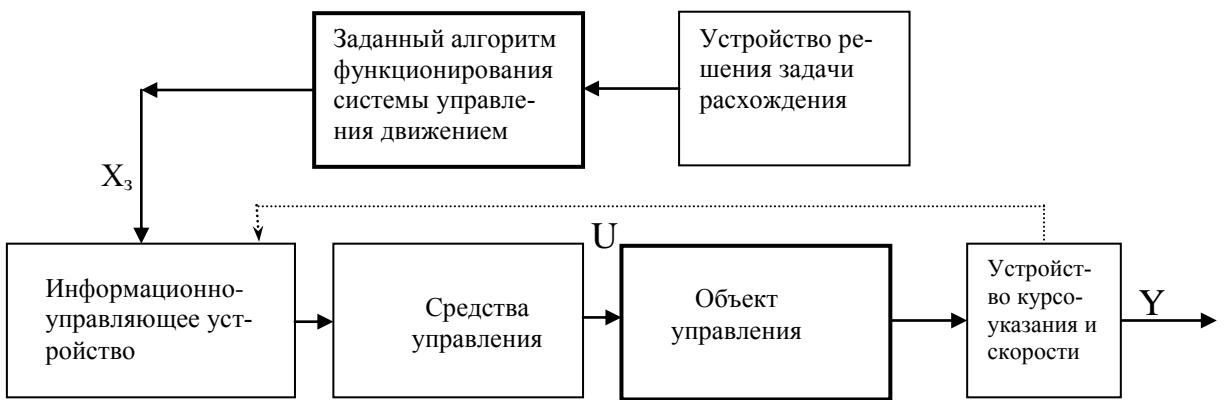


Рис.1.5. Структурная схема курсового принципа управления движением судна

Курсовой по возмущению. . Структурная схема подсистемы управления движением судна при курсовом по возмущению принципе приведена на рис.1.6. Ее особенностью является отсутствие элементов - устройства определения координат, и устройства сравнения. При функционировании системы работает только подсистема управления курсом по внутреннему контуру, с учетом поправок на действие внешних возмущений. Заданный алгоритм функционирования вырабатывает вручную или автоматически, путем графического определения, аналитического расчета вручную или автоматически пути судна, исправляется поправками компаса и за счет действия внешних возмущений, поступает в информационно-управляющую систему, которая автоматически или вручную поддерживает его значение постоянным. Определение положения судна не производится из-за отсутствия системы определения места или возможности произвести такую процедуру.

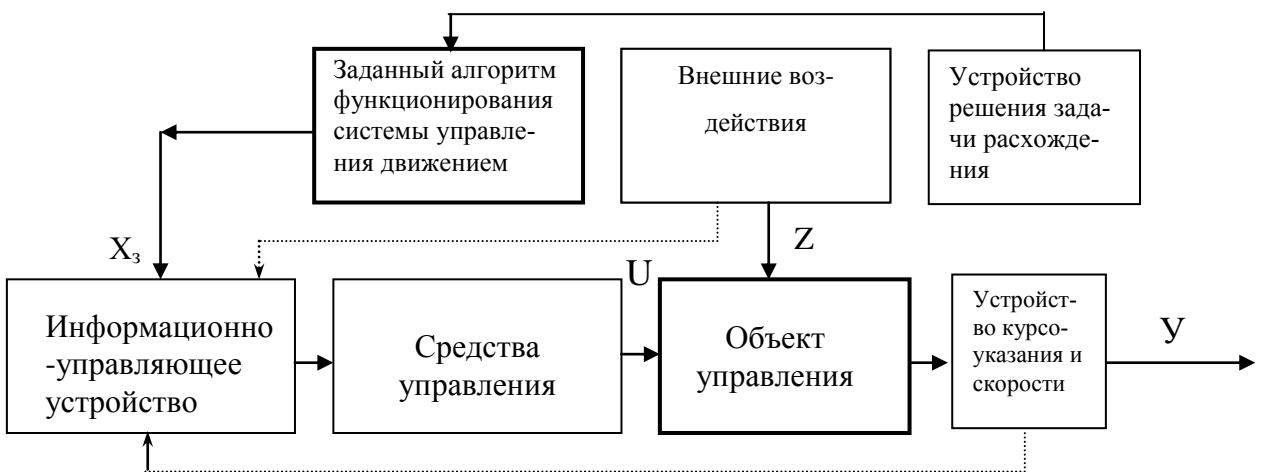


Рис.1.6. Структурная схема курсового по возмущению принципа управления движением судна

Курсовой по отклонению. . Структурная схема подсистемы управления движением судна при курсовом по отклонению принципе приведена на рис.1.7. Ее особенностью является от-

существие элементов - устройства определения действия поправок на внешние воздействия. При функционировании системы работает подсистема управления курсом по внутреннему контуру без учета поправок на действие внешних возмущений, и внешнему контуру. Заданный алгоритм функционирования вырабатывается вручную или автоматически, путем графического определения, аналитического расчета вручную или автоматически пути судна, исправляется поправками компаса без учета действия внешних возмущений, поступает в устройство сравнения, вырабатывается сигнал рассогласования, который поступает в информационно-управляющую систему, которая автоматически или вручную приводит объект управления в заданное состояние. Влияние внешних условий, путем введения поправок на их действие на судно, не производится. Это не означает, что они отсутствуют, а просто их влияние не учитывается при выработке управляющего воздействия .

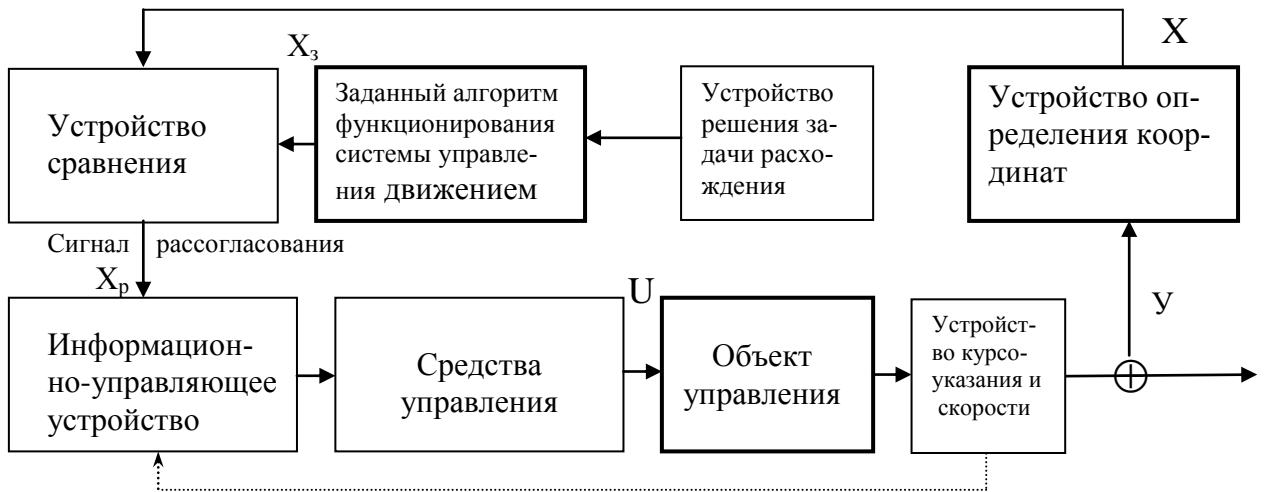


Рис.1.7 . Структурная схема курсового по отклонению принципа управления движением судна

Курсовой комбинированный. Структурная схема подсистемы управления движением судна при курсовом комбинированном принципе совпадает с обобщенной структурной схемой, приведенной на рис.1.3. Ее особенностью является наиболее полное присутствие устройств и элементов подсистемы. При функционировании системы работает подсистема управления курсом по внутреннему контуру с учетом поправок на действие внешних возмущений, и внешнему контуру. Заданный алгоритм функционирования вырабатывается вручную или автоматически, путем графического определения, аналитического расчета вручную или автоматически пути судна, исправляется поправками компаса и с учетом действия внешних возмущений, поступает в устройство сравнения, вырабатывается сигнал рассогласования, который поступает в информационно-управляющую систему, и она автоматически или вручную приводит объект управления в заданное состояние.

Предложенный системный подход к управлению движением судна позволяет аргументировано планировать организацию процесса его перемещения, с учетом маневренных характеристик, навигационной обстановки и интенсивности судоходства.

Рассмотренные принципы управления и приведенные их структурные схемы, позволяют строить различные модели управления движением судна, анализировать их функционирование, синтезировать систему и определять оптимальный ее состав для обеспечения безопасности мореплавания в различных условиях плавания. Кроме того, такой подход позволяет производить адекватное математическое описание процесса управления движением судна, формализовать и автоматизировать его .

1.2. Средства обеспечения движения судна и его управляемости.

Движение морского судна относительно воды обеспечивается различного типа движителями, наиболее распространёнными из которых является гребной винт - располагаемый за кормой судна.

Сила упора винта создаётся за счёт реакции струи, отбрасываемой винтом назад или вперёд в зависимости от направления вращения.

Грузовые суда чаще бывают одновинтовыми, а пассажирские - двухвинтовыми.

Полезная сила упора движителя-сила тяги P_e - равна(при прямолинейном и равномерном движении судна и отсутствии ветра) и прямо противоположна силе сопротивления воды R , т.е.

$$P_e = R \quad (1.1)$$

Эффективность движителя, создающего полезную мощность за счёт подводимой к нему мощности двигателя, измеряется величиной пропульсивного коэффициента

$$\eta = \frac{P_e \cdot V}{N_p} \quad (1.2)$$

где P_e –сила тяги, кН; V -скорость судна, м/с; N_p -подводимая к движителю мощность, кВт.

Силой тяги движителя и силой сопротивления воды определяется мореходное качество-ходкость судна, под которой подразумевается способность преодолевать сопротивление внешней среды и двигаться с заданной скоростью.

Основным и наиболее распространённым средством управления (СУ) судном является рулевое устройство, рабочим органом которого является руль(перо руля), располагаемый в корме судна.

Расположение руля в струе от винта повышает его эффективность. Так руль, расположенный в диаметральной плоскости на одновинтовом судне, более эффективен, чем на двухвинтовом. Иногда двухвинтовые суда имеют два пера руля, располагаемые за винтами, что резко повышает их эффективность.

Средства управления как движущий и управляющий, а, следовательно, неотъемлемый элемент судна существуют столько времени, сколько существует судоходство и судостроение. Первыми СУ были парус, весла, рули. С развитием судостроения появились новые типы СУ, конструкции, и свойства которых связаны с типом и назначением судов, условиями их эксплуатации, особенностями энергетических установок.

В настоящее время на транспортных судах применяются многие десятки различных видов СУ, а число запатентованных СУ исчисляется многими сотнями. Наибольшее число видов СУ используется на судах внутреннего и смешанного (река - море) плавания эксплуатируемых в сложных условиях ограниченного фарватера и требующих повышенных маневренных качеств.

СУ, обеспечивающие маневрирование судна, подразделяют на главные, вспомогательные и ограничивающие. Их классификация приведена на рис. 1.8.

Главные устройства управления. Главные СУ характерны тем, что для их использования необходима работа главных двигателей судна. К ним относятся главные движительные устройства судна, рулевые устройства, главные движительно-рулевые устройства.

Главные движительные устройства создают силу, приближенно по направлению совпадающую с диаметральной плоскостью судна, поэтому они используются, когда цель управления состоит в поддержании или изменении скорости судна. В качестве главных движительных устройств могут использоваться винты фиксированного шага (ВФШ), винты регулируемого шага (ВРШ), водометные движители и гребные колеса. ВФШ и ВРШ для повышения их эффективности могут быть помещены в неподвижные или поворотные насадки.

Винты фиксированного шага (ВФШ). Наиболее распространенными главными движителями водоизмещающих судов являются ВФШ. Объясняется это простотой конструкции ВФШ, удобством его размещения на судне и передачи вращающего момента, малым весом, надежностью и высоким к. п. д. (60—65%, иногда до 75%). На судне может быть установлена одновальная (одновинтовая), двухвальная (двухвинтовая) и более установки.

С точки зрения пропульсивных качеств наиболее эффективной является одновальная механическая установка ВФШ. В этом случае можно максимально уменьшить выступающие части и достигнуть наиболее высокого значения коэффициента влияния корпуса. Однако в некоторых случаях (невозможность установки, например, винта большого диаметра) приходится отказываться от такой установки. Увеличение числа гребных винтов диктуется требо-

ванием повышения живучести судна, а также стремлением повысить его экономичность путем применения разных двигателей для малых и полных ходов. В последнем случае особенно удобна трехвальная компоновка, когда средний винт (или бортовые винты) обеспечивает экономичный ход.

На больших пассажирских судах для достижения повышенной скорости требуемая мощность столь велика, что затруднительно использование суммирующего редуктора большой мощности. Это обстоятельство обусловило применение на таких судах двухвальной движительно-двигательной установки.

Трех- и четырехвальные установки применяются на быстроходных судах большого водоизмещения и ледоколах.

В одновальных гребных установках направление вращения гребного винта определяется направлением вращения двигателя. При следовании судна прямым курсом, когда руль расположен в диаметральной плоскости, оно может уходить с курса: вправо - при правом вращении гребного винта и влево - при левом его вращении (для некоторых судов в балласте при оголении винта и руля имеет место обратная закономерность). Причина этого явления - действие сил С (влияние работы гребного винта на перо руля; для винта правого вращения стремится повернуть корму влево), b (сила, возникающая из-за неравномерности поля скоростей, вызванной попутным потоком; для винта правого вращения стремится повернуть корму влево) и D (возникающей вследствие возникновения на нижней лопасти винта большей силы реакции чем на верхней; для винта правого вращения стремится повернуть корму вправо). Неравенство этих сил приводит к появлению их результирующей, которая в итоге влияет на уклонение судна с курса. При установке на судне двух гребных винтов одинакового вращения результирующие силы от каждого винта суммировались бы и для компенсации потребовалась бы значительная перекладка руля. Поэтому на двухвинтовых судах направление вращения гребных винтов принимается противоположным. Наружное вращение гребных винтов (лопасти в верхнем положении движутся к борту) предпочтительнее и с эксплуатационной точки зрения. При этом уменьшается вероятность повреждения лопастей винта плавающими предметами, а также заклинивания гребного винта битым льдом. Исходя из этих соображений, наружное направление вращения придают гребным винтам трех- и четырехвальных судов. Средний винт у трехвального судна может вращаться так же, как и у одновального, т. е. в произвольную сторону.

Направление вращения внутренних гребных винтов четырехвального судна выбирается исходя из модельных испытаний каждой серии судов отдельно.

Винты регулируемого шага (ВРШ). Одна из первых конструкций винта регулируемого шага (ВРШ) была предложена в 1844 г. В то время пароходы еще сохраняли парусное вооружение. Когда такое судно шло только под парусами, лопасти винта ставили во флюгерное положение (по потоку). Это уменьшало сопротивление винта.

В дальнейшем, с применением в качестве главных двигателей дизелей, паровых турбин и, особенно, с появлением нереверсивных газовых турбин снова возрос интерес к ВРШ, теперь уже как к реверсивному устройству.

Все более широкое распространение ВРШ на морских судах объясняется еще и следующим. Известно, что обычный винт фиксированного шага (ВФШ) может использовать полную мощность двигателя только при определенном значении сопротивления движению судна. Если это сопротивление в процессе эксплуатации судна изменяется (например, при переходе со свободного хода на режим буксировки или тралиния), то винт будет соответствовать двигателю лишь при каком-либо одном значении сопротивления, а при остальных его значениях он будет либо «тяжелым» (двигатель не может развить полного числа оборотов при полной мощности), либо «легким» (винт не использует при полном числе оборотов полной мощности двигателя).

Для полного использования мощности двигателя при всех значениях сопротивления необходимо, чтобы каждому значению сопротивления соответствовал определенный шаг гребного винта. Идея совмещения серии гребных винтов различного шага в одном движителе и нашла воплощение в конструкциях ВРШ.

В настоящее время ВРШ устанавливают на судах различного назначения.

Состав установки ВРШ. Система управления всеми видами ВРШ принципиально одинакова. ВРШ проектируется так, чтобы поворот лопастей винта осуществлялся из рулевой рубки. Обычно установка ВРШ состоит из следующих основных элементов (рис. 1.9.):

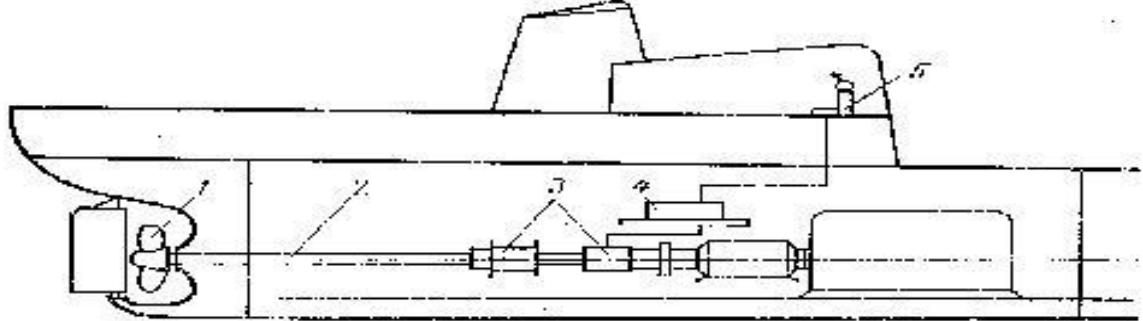


Рис.1.9. Схема установки ВРШ на судне

гребной винт 1 с поворотными лопастями (ВПЛ); в ступице ВПЛ размещается механизм поворота лопастей (МПЛ);

гребной вал 2;

механизм изменения шага 3 (МИШ), состоящий из сервомотора, создающего усилие для поворота лопастей, устройства для подведения энергии к сервомотору и устройства, управляющего положением лопастей;

силовая часть системы управления 4, которая служит для преобразования имеющейся на судне энергии в такой вид, который наиболее удобен для подведения к сервомотору;

пост дистанционной системы управления 5, функции которого заключаются в непосредственном управлении регулирующим элементом силовой части (например, распределительным золотником в ВРШ с гидравлическим приводом).

Классификация ВРШ. ВРШ классифицируются по:

диапазону поворота лопастей:

всережимные - лопасти могут быть зафиксированы в любом положении внутри диапазона «Полный вперед» - «Полный назад»,

многопозиционные, обеспечивающие несколько режимов (чаще всего три),

двухпозиционные - лопасти могут быть зафиксированы только в двух положениях, соответствующих крайним точкам диапазона;

принципу создания усилия, необходимого для поворота лопастей, т. е. с приводом:

гидравлическим - усилие создается в гидравлическом сервомоторе,

электромеханическим - усилие создается электродвигателем,

механическим - усилие создается за счет энергии вращающегося гребного вала,

ручным - перекладка лопастей производится мускульной силой человека;

принципу построения системы управления винтом системы:

следящая - каждому положению управляющей рукоятки соответствует определенное положение лопастей, т. е. лопасть как бы «следит» за управляющим органом;

не следящая - отклонение рукоятки от нейтрального положения влечет за собой поворот лопасти, а возвращение ручки в нейтральное положение останавливает лопасть.

Наибольшее распространение получили всережимные ВРШ с гидравлическим приводом и следящей системой управления.

Достоинства и недостатки ВРШ. Опыт многолетней эксплуатации ВРШ на судах различного назначения в самых разнообразных условиях показывает, что движитель является достаточно надежным механизмом, а применение его экономически вполне оправдано.

ВРШ обладают следующими преимуществами по сравнению с ВФШ:

обеспечение реверса судна без изменения направления вращения винта, что позволяет обойтись без турбины заднего хода на судах с паровыми и газовыми турбинами;

получение при неизменном числе оборотов (в том числе и при максимальном) любого значения скорости - от нулевой до наибольшей - за счет изменения шага лопастей путем их поворота;

возможность установки при длительном ходовом режиме наивыгоднейшего сочетания шага винта и оборотов главного двигателя;

сокращение на 30 - 40% времени реверса судна, причем сам реверс значительно упрощается;

существенное увеличение моторесурса главных дизелей благодаря резкому уменьшению числа их пусков и остановок при швартовке или плавании в сложных условиях;

возможность дистанционного поворота лопастей винта с мостика без подачи команд в машинное отделение;

облегчение швартовых и буксировочных операций, постановки и выборки сетей, тралиния благодаря большому диапазону изменения ходов;

уменьшение времени торможения и длины тормозного пути за счет ускоренного реверса;

уменьшение нагрузки на якорную цепь при съемке с якоря благодаря широкому выбору необходимого хода;

использование на электроходах с ВРШ в качестве гребных электромоторов наиболее простых синхронных электродвигателей переменного тока;

снижение на двух-трех винтовых судах сопротивления неработающего винта разворотом его лопастей;

практически постоянное соответствие винта двигателю, чего нельзя достичь при наличии ВФШ из-за возможного износа двигателя, обрастания корпуса и т. д.; в случае с ВРШ несоответствие всегда может быть устранено небольшим изменением шага;

получение на швартовных испытаниях полной мощности при полных оборотах двигателя путем уменьшения шага винта.

Наряду с перечисленными достоинствами ВРШ не свободны и от недостатков, так:

ВРШ по сравнению с ВФШ имеют более сложную конструкцию, а следовательно, и меньшую надежность;

диаметр ступицы ВРШ примерно в 1,5 раза больше, чем ВФШ, длина ступицы также несколько больше, что усложняет задачу создания обтекаемого комплекса «дайдвуд - ступица - руль»;

масса ВРШ в 2-2,5 раза больше массы ВФШ с теми же геометрическими элементами лопастей; это требует усиления подшипника кронштейна или дайдвуда;

коэффициент полезного действия (к. п. д.) ВРШ, как правило, несколько ниже к. п. д. ВФШ (на 1 - 3%);

главный двигатель в установке с ВРШ должен иметь регулятор числа оборотов: при проходе лопастей через положение «Стоп» винт снимает с двигателя очень малую нагрузку, поэтому при отсутствии регулятора в указанном положении двигатель начнет работать «вразнос».

ВФШ и ВРШ в неподвижных насадках. Направляющая насадка на гребной винт впервые была предложена в 1887 г. русским ученым Ф. А. Бриксом. Цель ее применения - повышение скорости, улучшение тяговых характеристик и маневренных качеств судов.

Направляющие насадки на гребные винты являются эффективным средством повышения пропульсивных качеств судов с тяжело нагруженными двигателями. Направляющими насадками оборудуются буксируемые суда и промысловые траулеры. Значительное распространение направляющие насадки различной конструкции получили также на транспортных судах и крупнотоннажных танкерах. В отдельных случаях направляющие насадки на гребные винты устанавливают для защиты лопастей от повреждений при плавании на мелководье, во льдах и других специфических условиях.

По конструктивным особенностям и назначению направляющие насадки разделяют на обычные осесимметричные и несимметричные. Обычная осесимметричная насадка образуется вращением крылового профиля заданной формы вокруг оси гребного винта. Несимметричная насадка характерна тем, что профили каждого ее меридионального сечения имеют различную форму, размеры и угол с осью гребного винта.

Неподвижная направляющая насадка жестко связана с корпусом судна и плавно сопрягается с ним.

Воздействие направляющей насадки на скорость потока в диске гребного винта является определяющим фактором в ее влиянии на КПД этого движительного комплекса. Значение и направление дополнительной скорости, вызываемой насадкой в диске гребного винта, зависят от ее геометрической формы. Для достижения наибольшего КПД комплекса и упора насадки необходимо при ее конструировании стремится к максимальному увеличению скорости протекания через диск гребного винта. Сложная картина формирования и отрыва трехмерного пограничного слоя на поверхности насадки не позволяет в настоящее время теоретически решить задачу выбора оптимальной геометрической формы ее профиля.

Направляющая насадка, увеличивая скорость протекания воды через гребной винт, разгружает сечение винта, и это должно приводить к отдалению начала его кавитации. Однако увеличение скорости протекания связано также с понижением давления вблизи гребного винта, что приближает начало его кавитации. Исследования показывают, что второе обстоятельство превалирует над первым и гребной винт комплекса, спроектированного на ту же мощность, что и открытый винт, при одинаковой площади лопастей начинает кавитировать раньше. Только на швартовном и близких к нему режимах наблюдается обратная картина, и значение необходимого для обеспечения одинакового запаса против возникновения кавитации дискового отношения гребного винта в насадке примерно на 5% меньше, чем для открытого винта. При этом развиваемый комплексом упор на 20-25% больше, чем у открытого гребного винта.

ВФШ и ВРШ в поворотных насадках. Пропульсивные свойства гребного винта в поворотной направляющей насадке аналогичны пропульсивным свойствам гребного винта в неподвижной насадке. Однако поворотная направляющая насадка обеспечивает также управление судном как рулем. Поворотные направляющие насадки будут более подробно рассмотрены ниже в разделе главных рулевых устройств. Здесь же следует еще указать на то, что поворотные направляющие насадки обычно бывают со стабилизатором для уменьшения момента на баллере и улучшения управляемости (рис. 1.10). По способу крепления к корпусу различают подвесные и двух опорные поворотные насадки. Кроме кольцевых насадок существуют и другие модификации (рис. 1.11).

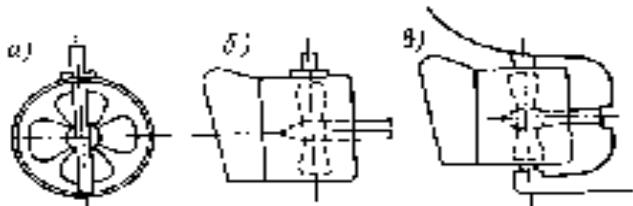


Рис.1.10.Поворотные насадки: а) со стабилизатором; б)-подвесная; в) -двух опорная

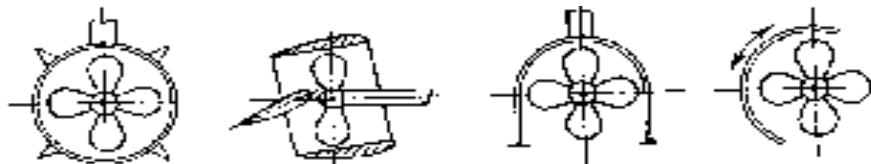


Рис.1.11. Модификация поворотных насадок

Водометные движители. Водометный движитель (рис.1.12) включает следующие основные части:

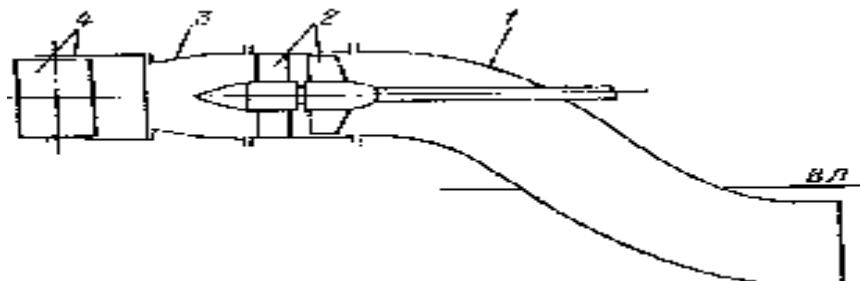


Рис.1.12. Схема водометного движителя: 1-водозаборное устройство; 2-рабочее колесо; 3-сопло; 4-реверсивно-рулевое устройство.

водозаборное устройство, предназначенное для приема воды из свободного потока и подачи к рабочему колесу;

рабочее колесо, которое передает энергию двигателя потоку, протекающему через движитель;

сопло, формирующее струю, реактивная сила которой создает тягу движителя;

реверсивно-рулевое устройство, обеспечивающее изменение направления действия тяги движителя без реверса приводного двигателя.

Коэффициент полезного действия водометного движителя и кавитационные качества рабочего колеса в значительной степени обусловлены гидродинамическим и внешним со- противлением водозаборника, степенью равномерности потока, подводимого водозаборни- ком к рабочему колесу.

Гидравлическое и внешнее сопротивление водозаборника, а также структура потока перед рабочим колесом зависят от конфигурации водоприемного патрубка и трубопровода, их геометрических размеров, относительной скорости протекания воды через водозаборный трубопровод, чистоты обработки поверхностей и т. п.

В качестве рабочих колес водометных движителей обычно применяют осевые и цен- тробежные насосы. Путем комбинации нескольких насосов можно получить необходимое для водометного движителя сочетание напора и расхода.

Если не удается обеспечить требуемый напор (или расход) одной ступенью, возможно использование двух- и трехступенчатых рабочих колес (число ступеней может быть и больше). Полный напор рабочего колеса определяется как сумма напоров ступеней. Рассчитан- ный как сумма напоров одноступенчатых насосов напор многоступенчатого рабочего колеса в достаточно широком диапазоне постуки отличается от измеренного не более чем на 3-5 %. Это справедливо также при работе лопастей осевого насоса в условиях развитой кавитации.

На кратковременных режимах работы (например, во время выхода судна на крылья) для улучшения компоновки движителя иногда выгодно допустить кавитацию лопастей рабо- чего колеса, если обеспечиваются требуемые тяговые характеристики. Напорные характе- ристики насосов при развитой кавитации можно определить только по данным модельных испытаний. Напор рабочих колес с кавитирующими лопастями в реальных условиях меньше, чем в однородном потоке. Снижение напора зависит от характера неоднородности потока, конструкции рабочего колеса, режима работы и должно быть в каждом конкретном случае определено в результате испытания моделей. Модельные испытания показывают, что уменьшение напора вследствие неоднородности потока может достигать 25 %; момент на валу рабочего колеса снижается в меньшей степени. Эффективность рабочего колеса в этих случаях уменьшается на 10 – 20 %.

Проблема стабильной работы движителей вблизи свободной поверхности воды, когда попадание атмосферного воздуха в гидравлическое сечение движителя, особенно при волне- нии, неизбежно, радикально решается использованием в движителях вентилируемых лопаст- ных систем. При работе подобных движителей на лопастях образуются воздушные каверны, полости которых соединены с атмосферой. Тяга вентилируемых водометных движителей (ВВД) создается на основном режиме работы только за счет повышения давления на нагне- тающей стороне лопасти. Поэтому такие движители практически не изменяют гидравлические характеристики во время работы в потоке, насыщенном воздушными пузырями, и в случае частичного оголения гидравлического сечения. ВВД состоит из водозаборника, при- водного вала с кронштейном и рабочего колеса, размещенного на выходном участке водоза- борника. Для полной вентиляции лопастей, которая происходит при смыкании воздушной каверны на лопастях с атмосферным воздухом, компоновка движителя на корпусе судна должна предусматривать контакт струи с атмосферным воздухом, т. е. надводный или полу- затопленный выброс струи. Пример компоновки ВВД с корпусом быстроходного судна по- казан на рис. 1.14.

Сопло водометного движителя формирует струю, необходимую для обеспечения тяги. Площадь на срезе сопла меньше, чем на входе в него, поскольку рабочее колесо создает из- быточную потенциальную энергию - повышенное давление, которое необходимо преобразо-

вать в кинетическую энергию струи, т. е. получить приращение скорости. Поджать сечение сопла можно в результате сужения наружного трубопровода, как это показано на рис.1.15., либо расширением центрального тела, которое является продолжением ступицы спрямляющего аппарата. В этом случае струя, истекая из кольцевого отверстия, будет иметь форму полого цилиндра. Второй вид оформления сопла рационален при большом диаметре ступицы последней ступени рабочего колеса, так как позволяет значительно сократить длину сопла.

Водометные движители снабжаются реверсивными устройствами. Эти устройства отклоняют струю, истекающую из сопла движителя на $\sim 180^\circ$ что приводит к изменению на-

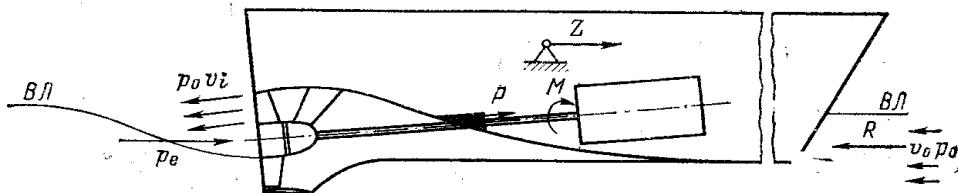


Рис.1.14. Компоновка вентилируемого водометного движителя

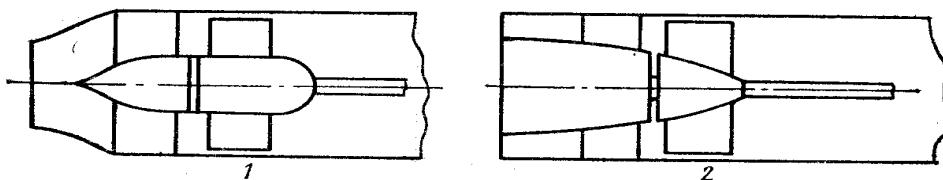


Рис.1.15. Схема сопл водометного движителя: 1-поджатие стенкой водовода; 2- поджатие внутренним телом.

правления действия силы реакции струи, а значит и направления тяги движителя. Путем отклонения струи движителя с помощью рулевого устройства можно получить боковую силу для управления судном. Обычно реверсивное и рулевое устройства совмещают в единую конструкцию, которая получила название реверсивно-рулевого устройства (РРУ).

Эффективность реверсивного устройства оценивается тягой заднего хода на швартовых, которая измеряется в долях от тяги переднего хода при одинаковой мощности приводного двигателя или одинаковой частоте вращения рабочих колес. Тяга заднего хода у лучших образцов РРУ достигает 60-65% от тяги переднего хода; в среднем она составляет 45-55 %.

Водометные движители при умеренных скоростях судна уступают по КПД гребным винтам и применяются, когда необходимы малая осадка и лучшая защищенность рабочего органа. При больших скоростях судна эффективность водометных движителей близка к эффективности гребных винтов и вследствие конструктивных преимуществ они широко применяются на судах на воздушной подушке и подводных крыльях.

Гребные колеса. Гребное колесо представляет собой вращающуюся цилиндрическую конструкцию с осью, расположенной поперек судна, и укрепленной на ней по окружности прямоугольными лопастями – плицами. Относительно ватерлинии гребное колесо размещается так, что находящиеся в нижнем положении плицы погружены в воду. Упор гребного колеса создают силы, возникающие на погруженных в воду плицах. Для уменьшения потерь энергии из-за образования брызг при входе и выходе плиц из воды они шарнирно соединяются с эксцентриковым механизмом, регулирующим положение плиц при повороте колеса. Гребные колеса применялись на судах с начала XIX века. Первым колесным судном, совершившим регулярные рейсы, был п/х “Клермонт” (США). В начале XX века на смену гребным колесам пришли более эффективные движители – гребные винты.

Главные рулевые устройства. Рулевые устройства (РУ) отличаются тем, что их действие проявляется только при наличии скорости судна. Рулевые устройства поэтому эффективны только при работе главных движителей (или в течение короткого времени после остановки последних) и непригодны для обеспечения управляемости судна на предельно малых скоростях хода и без хода.

Под термином «ход» понимается процесс перемещения судна в направлении ДП под действием приложенной к судну тяги. Термин «без хода» не означает, что судно неподвиж-

но, а свидетельствует лишь об отсутствии продольной тяги, либо об отсутствии продольной проекции скорости движения судна. В последнем случае судно может двигаться лагом или вращаться относительно точки, расположенной на ДП. Под термином «предельно малая скорость хода» следует понимать скорость около 1 м/с и менее.

В качестве рабочих органов РУ применяются рули, рули повышенной эффективности, много перьевые рулевые комплексы, поворотные насадки на гребные винты, сопла водометных движителей.

Рули. Руль представляет собой крыло, которое поворачивается вокруг вертикальной оси и располагается в потоке воды за корпусом судна. Для увеличения скорости обтекания руля его часто размещают полностью или частично в струе, отбрасываемой гребным винтом.

Действие руля основано на том, что гидродинамическая сила, возникающая на пере руля при наличии угла атаки, через связи руля с корпусом передается на корпус судна.

Сила, возникающая на руле, пропорциональна квадрату скорости обтекания руля или приближенно квадрату скорости движения судна. Поскольку гидродинамические силы и моменты, возникающие на корпусе судна, также пропорциональны квадрату скорости движения, эффективность работы руля на малых скоростях практически от скорости хода не зависит (при безветрии). Если скорость хода велика, эффективность руля может уменьшаться в результате кавитации руля или в результате проникновения к рулю атмосферного воздуха (аэрации). Для защиты от аэрации руль следует размещать за кормой судна таким образом, чтобы при перекладке его профиль не выходил за горизонтальную проекцию действующей ватерлинии и по возможности был удален от нее, в особенности от транца кормы. Руль состоит из пера руля и баллера руля (рис. 1.16). Пере руля представляет собой тело, непосредственно воспринимающее гидродинамическое давление. Часто под термином «руль» понимают только пере руля. Баллер руля служит для поворота пере руля относительно вертикальной оси и для крепления пере руля к корпусу судна. Судовые рули могут быть классифицированы следующим образом:

А. По способу соединения пере руля с корпусом судна (рис. 1.17): а) простые - с несколькими опорами на ахтерштевне; б) полуподвесные - висящие на баллере и опертые на корпус или специальный кронштейн в одной точке по высоте руля; в) подвесные - полностью висящие на баллере.

Б. По положению оси баллера относительно пере руля (рис. 1.17): а) небалансирующие - с осью баллера, размещенной в носовой части руля непосредственно в районе передней кромки пере; б) балансирующие - с осью баллера, расположенной на некотором удалении от передней кромки пере руля.

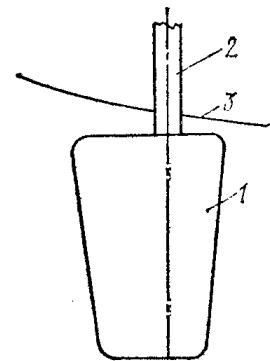


Рис.1.16 Схема руля.
1-перо руля; 2-баллер;
3-обвод ахтерштевня.

Рули	Простые	Полуподвесные	Подвесные
Небалансирующие		-	
Балансирующие			

Рис.1.17. Классификация рулей

В. По форме профиля руля: а) плоские; б) обтекаемые.

В настоящее время простые плоские рули иногда применяются на несамоходных судах. Современные рули самоходных судов имеют обтекаемый профиль.

Простые рули применяются на транспортных судах, имеющих развитый кормовой дейдвуд. Полуподвесные и подвесные рули, как правило, бывают балансирными. Эти рули весьма широко используются на судах всех классов и назначений. Небалансирные подвесные или полуподвесные рули практически не применяются.

Разновидностью простых небалансирных рулей являются рули за рудерпостом, отличительная особенность которых заключается в том, что они имеют общий профиль с рудерпостом (в не переложенном положении). Таким образом, комплекс руль - рудерпост представляет собой разрезной руль, передняя часть которого (рудерпост) не перекладывается. Как правило, протяженность (хорда) рудерпоста составляет 0,10-0,25 хорды профиля всего комплекса.

На судне могут быть установлены один, два, три и больше рулей. Один руль размещается в ДП (за винтом у одновинтового судна), два руля, как правило, устанавливаются за гребными винтами двухвинтовых судов. Рули за рудерпостом применяются чаще всего на крупнотоннажных одновинтовых судах и всегда устанавливаются за гребным винтом.

Угол поворота рулей относительно ДП судна называется углом перекладки рулей. Под термином «перекладка» понимается процесс поворота руля из одного положения в другое. Максимальный угол перекладки обычных рулей составляет, как правило, 35° . Дальнейшая перекладка руля невыгодна, поскольку она приводит лишь к небольшому увеличению силы, действующей на руль, но одновременно ведет к резкому увеличению момента на баллере, что диктует необходимость утяжеления привода рулей и роста мощности рулевой машины.

Суммарная площадь рулей, необходимая для обеспечения управляемости, зависит от размеров и назначения судна, формы кормы, максимальной скорости хода и расположения руля относительно винта.

Площадь руля реального судна выбирается с учетом как приведенных данных по коэффициенту К, так и результатов расчета управляемости либо данных модельных испытаний.

Рули повышенной эффективности. К рулям повышенной эффективности относятся рули с изменяемой геометрией профиля и роторные рули.

Рули с изменяемой геометрией профиля составляют большую группу конструктивных типов, отличительной чертой которых является наличие закрылка, предкрылка, щитков. Наибольшее распространение в этой группе получили рули за рудерпостом, представляющие собой рули с неподвижным предкрылком. Преимуществом этих рулей является удобство их размещения на ахтерштевне и высокая степень защищенности, чем и определяется их распространенность, так как поперечная сила рулей за рудерпостом меньше поперечной силы обычных рулей той же суммарной площади.

В группе рулей с закрылками выделяются рули Беккера, обладающие высокой эффективностью при относительно небольшом гидродинамическом моменте на баллере. Смысл конструкции рулей Беккера заключается в механизме совместного привода руля и его закрылка. Схема механизма привода руля Беккера приведена на рис. 1.18.

Перекладка основного руля 4 производится с помощью обычного баллера вокруг оси 3. Закрылок 1 поворачивается при этом вокруг оси 2. Положение закрылка относительно основного руля определяется направляющей 5, которая, будучи жестко связанной с закрылком, скользит своим пазом по штырю 6, закрепленному на корпусе судна.

Роторный руль представляет собой поворотное перо, перед которым расположен цилиндр, способный вращаться вокруг собственной оси, соосной с осью поворота основного

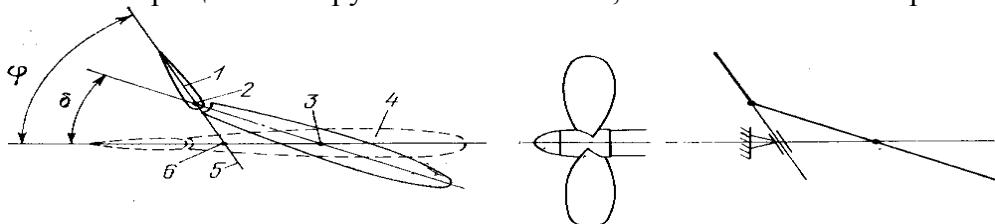


Рис.1.18. Схема перекладки руля Беккера

пера. Лобовая часть этого цилиндра и основное перо образуют общий крылового профиль (рис. 1.19).

Вращение цилиндра может осуществляться различными способами: с помощью гидравлических двигателей, механических и гибких передач, электродвигателей, расположенных в самом теле руля или корпусе судна.

Направление вращения цилиндра зависит от знака угла перекладки пера руля, за исключением зоны углов $\pm 10^\circ$, внутри которой цилиндр остается неподвижным.

Благодаря вращению цилиндра, расположенного в носовой части руля, обтекание основного пера при углах перекладки, больших $35-40^\circ$, происходит без срыва потока, как это бывает у рулей обычной конструкции. Вследствие этого роторные рули могут перекладываться на углы $70-80^\circ$, при этом эффективность рулей увеличивается пропорционально углу перекладки. Судно, на котором установлен роторный руль, может разворачиваться практически на месте. Эффективность роторного руля как средства управления судном существенно повышается в случае установки его в струе гребного винта. Это свойство роторных рулей особенно важно для обеспечения маневрирования на малых скоростях хода (при маневрировании в портах, при швартовых операциях и др.), когда обычные рули работают плохо.

На ходовых режимах, при которых не требуются большие перекладки руля, эффект вращения цилиндра практически отсутствует. Цилиндр останавливают, и роторный руль работает как обычный.

Многоперьевые рулевые комплексы (рис.1.20) нашли широкое применение на современных крупнотоннажных и судах внутреннего плавания. Число существующих модификаций многоперьевых систем рулей достаточно велико. Общим принципом построения всех таких систем является образование при больших углах перекладки рулей направляющих «каналов», обеспечивающих эффективный поворот струи двигателя и значительную попеченную силу ДРК, сопоставимую с попеченной силой поворотных насадок.

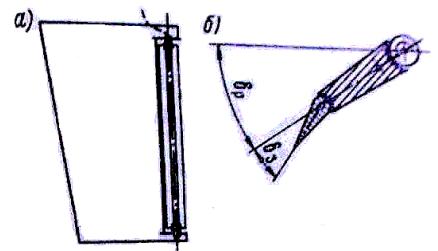


Рис.1.19.Активизированный руль
а-с вращающимся ротором; б-з крылком и вращающимся ротором

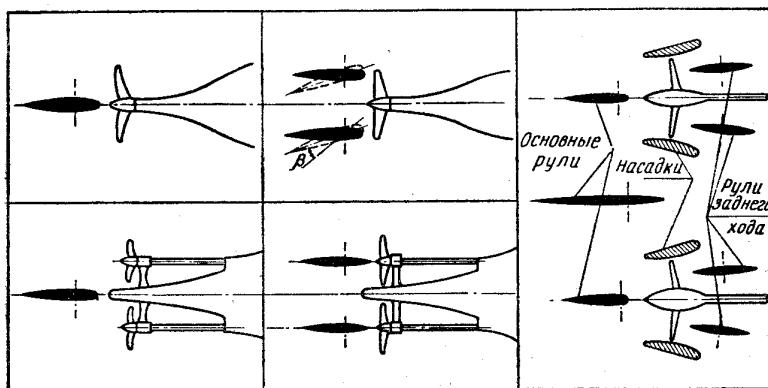


Рис.1.20. Многоперьевые рулевые комплексы

Другим важным достоинством много перьевых систем рулей является значительная величина развиваемой ими при больших углах перекладки отрицательной, т. е. тормозящей судно продольной силы, способствующей уменьшению размеров акватории, необходимой для маневрирования судна.

Парные рули обычно поворачиваются синхронно на одинаковый угол, но больший поворачивающий эффект можно получить, если один из рулей в своем повороте отстает от другого на некоторый угол порядка 25° . Парные рули с отдельным приводом на каждом руле позволяют в широких пределах изменять направление струи от винта и даже давать судну задний ход.

Еще более эффективным средством улучшения поворотливости судна является применение строенных рулей или трехбаллерного рулевого устройства с рулями большого удлинения. Их эффективность резко возрастает, если эти рули перекладываются на углы, превышающие в два и более раза предельный угол перекладки обычных рулей, практически пере-

крывают поток гребного винта и направляют его под углом к ДП, близким к 90° , создавая значительные боковую силу и поворачивающий судно момент.

Поворотные и синхронные поворотные направляющие насадки. Поворотная направляющая насадка на гребной винт представляет собой обычно кольцевое крыло, закрепленное на баллере и окружающее гребной винт. Кроме баллера, насадка может быть также шарнирно соединена со специальным кронштейном на корпусе судна. Насадка, прикрепленная только к баллеру, именуется подвесной. Если она опирается на кронштейн - полуподвесной (рис. 1.21). Основное назначение любой (в том числе и поворотной) насадки заключается в повышении КПД движительного комплекса.

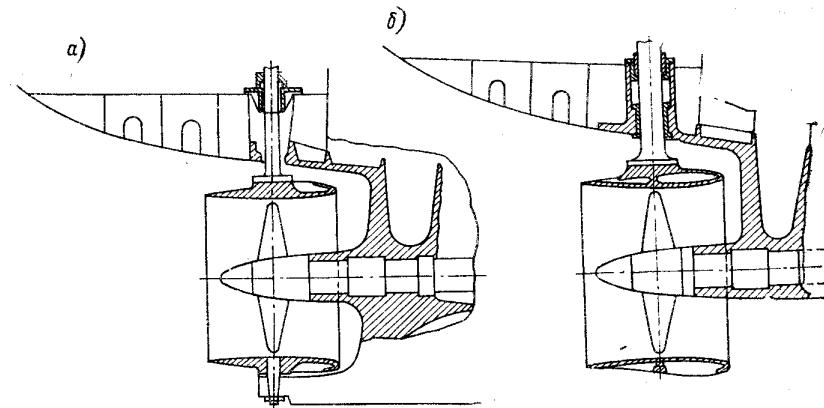


Рис.1.21. Поворотная насадка: а – полуподвесная; б – подвесная.

Поворотная направляющая насадка на гребной винт в качестве органа управления судном по своему действию аналогична рулю. При перекладке насадки на ней возникает гидродинамическая сила, передающаяся на корпус и вызывающая поворот судна. Если сопоставить боковую (подъемную) силу, возникающую при ходе судна на переложенной насадке и на размещенном в винтовой струе руле аналогичной формы в проекции на ДП судна, то на насадке эта сила оказывается примерно на 40 - 50 % большей. Преимущество насадки в этом отношении обусловлено тем, что перекладка насадки ведет к интенсивному отклонению потока, отбрасываемого винтом, и, как следствие, к значительному повороту вектора тяги комплекса винт - поворотная насадка. Этот поворот тем больше, чем меньше скорость хода и больше нагрузка винта, поэтому наибольшее отклонение вектора тяги наблюдается в швартовном режиме работы комплекса.

Важной характеристикой поворотной насадки является расположение оси баллера по длине насадки. Для осуществления поворота насадки необходимо, чтобы плоскость, в которой располагаются вершины лопастей гребного винта, совпадала с поперечной плоскостью, проходящей через ось баллера. Поскольку гребной винт всегда располагается в сечении с наименьшим внутренним диаметром, от положения оси баллера по длине насадки зависит форма профиля насадки.

Положение оси баллера по длине насадки в сильной степени влияет на гидродинамический момент на баллере насадки, который должен быть преодолен при ее перекладке. При переднем ходе момент на баллере оказывается минимальным в случае расположения оси баллера на 25-30 % длины насадки от носовой кромки. С ростом отстояния оси баллера от носовой кромки момент на баллере резко возрастает. На заднем ходу момент на баллере при указанном смещении оси баллера уменьшается.

Если на двухвинтовом судне устанавливают раздельные поворотные насадки, ось баллера целесообразно размещать посередине длины насадки. При этом с целью уменьшения гидродинамического момента на баллере в хвостовой части насадки должен быть укреплен стабилизатор, чаще всего неподвижный относительно насадки.

Угол поворота насадки относительно ДП судна составляет, как правило, $30\text{--}35^\circ$. В не-переложенном положении ось поворотной насадки чаще всего совпадает с осью гребного винта.

На судне могут быть установлены одна или две поворотные насадки. Если на одновинтовом судне имеется одна насадка, то она в соответствии с приведенной классификацией всегда относится к группе рулевых устройств. Если же на двухвинтовом судне поворотных

насадок две, то к группе рулевых устройств они будут относиться лишь в том случае, если конструкция привода обеспечивает **синхронную** (т. е. в одном направлении и на одинаковый угол) перекладку насадок. В том случае, когда привод допускает раздельную перекладку (т. е. каждая насадка может быть переложена на любой угол в любом направлении независимо от другой насадки), насадки называются раздельными, и тогда они относятся к группе главных движительно-рулевых устройств. Однако, даже и в последнем случае эти насадки при движении судна, на скоростях выше 3-4 уз перекладываются совместно (либо перекладывается только одна насадка).

Известны многочисленные модификации поворотных насадок, преследующие цели увеличения поперечной силы насадки, в особенности при неработающем гребном винте, улучшения ее стабилизирующего действия, уменьшения момента на баллере. Наиболее характерные модификации: установка в диаметральной плоскости насадки стабилизатора большого размера, выступающего далеко вверх за пределы струи движителя (рис. 1.22, а); установка на насадке продольных ребер (рис. 1.22, б) с целью улучшения стабилизирующего действия ДРК и повышения управляемости судна при ходе судна по инерции; установка бо-

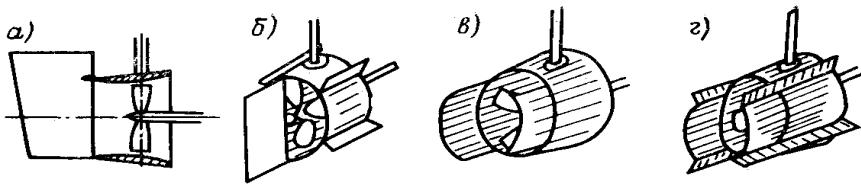


Рис.1.22. Модификация поворотных насадок

ковых цилиндрических стабилизаторов (рис. 1.22, в), представляющих собой частичное продолжение насадки с целью увеличения ее поперечной силы.

Одним из наиболее результативных путей повышения эффективности поворотной насадки как средства управления судном является установка на ней поворотного стабилизатора.

Неподвижную часть стабилизатора (рудерпост) устанавливают внутри насадки. Поворотную часть стабилизатора навешивают на рудерпост.

Привод поворотной части стабилизатора осуществляют по схеме, аналогичной схеме привода рулей Беккера, для чего на корпусе судна устанавливают штырь, входящий в паз на-

правляющей стабилизатора. Положение штыря относительно баллера выбирают таким образом, чтобы при перекладке насадки на максимальный угол 30° угол перекладки стабилизатора составлял 60° . Кинематическая схема поворотной насадки с поворотным стабилизатором изображена на рис. 1.23, а ее геометрические характеристики показаны на рис. 1.24.

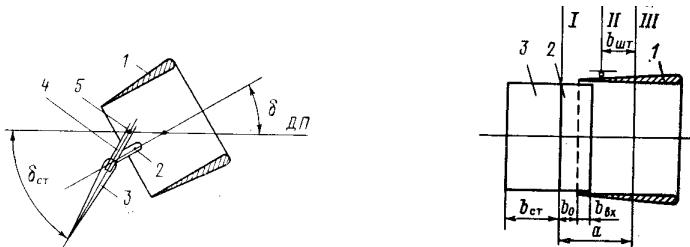
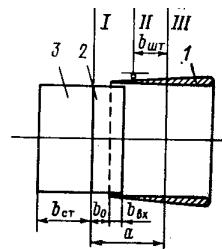


Рис.1.23.Кинематическая схема поворотной насадки с поворотным стабилизатором.
1-поворотная насадка; 2-рудерпост; 3-поворотный стабилизатор; 4- направляющая; 5-штырь на корпусе.



1.24. Геометрические характеристики поворотной насадки с поворотным стабилизатором.
1-поворотная насадка; 2-рудерпост; 3-поворотный стабилизатор; 11-ось штыря; 111- ось баллера.

Сопла водометных движителей. Реверсивно-рулевое устройство (РРУ) водометных движителей можно условно подразделить на две группы. К первой относятся РРУ, состоящие из камеры за соплом водометного движителя и каналов заднего хода (рис. 1.25). При реверсировании задняя стенка камеры перекрывается рулями или специальными заслонками; вода, истекая через каналы заднего хода создает тягу обратного направления. Каналы заднего хода могут быть изготовлены поворотными, что позволяет обеспечить повышенную управляемость судна на заднем ходу. Разновидность подобной конструкции РРУ с поворот-

ным барабаном-соплом приведена на схеме рис. 1.26. При реверсировании РРУ с камерами изменяется режим работы водометного двигателя; скорость протекания воды через движитель снижается, нагрузка двигателя увеличивается.

У второй группы РРУ реверсирование струи движителя осуществляется в пределах специальных профилированных заслонок, которые иногда примыкают к каналам заднего хода.

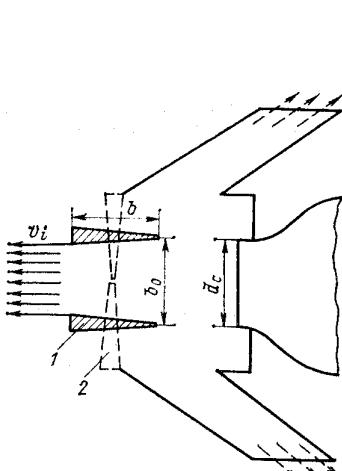


Рис.1.25 Схема РРУ с камерой и каналами заднего хода (вид сверху).
1 и 2 – положение рулей соответственно.

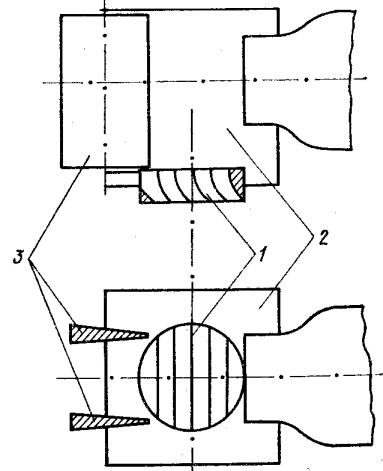


Рис.1.26. Схема РРУ с поворотным барабаном.
1- поворотный барабан с каналами заднего хода; 2-камера; 3 – клиповые рули заслонки камеры.

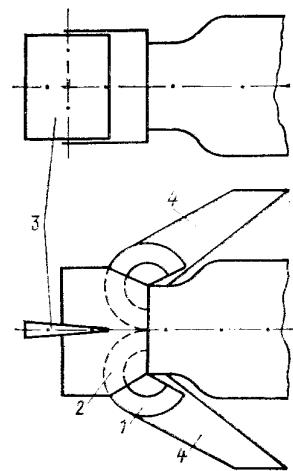


Рис.1.27. Схема РРУ с заслонками и каналами заднего хода. 1- положение реверсивной заслонки на заднем ходу; 2- положение при реверсе; 3- положение руля; 4- каналы задн. хода

Схема РРУ с заслонками показана на рис. 1.27. РРУ этой группы оказывают меньшее влияние на режим работы движителя в процессе реверсирования.

В качестве рулевого элемента устройства используют один или два клиновых руля, установленные за соплом движителя, реже применяют коробчатые и кольцевые рули, а также поворотные сопла водометных движителей.

На РРУ водометных движителей с надводным выбросом струи не рекомендуется применять рули обтекаемой формы, поскольку на таких рулях в диапазоне углов перекладки до $\sim 15^\circ$ практически нет боковой силы, необходимой для управления судном. Физически это объясняется тем, что на выпуклой нагнетающей стороне руля осредненное давление не становится больше атмосферного при перекладке его на $\sim 15^\circ$, а на засасывающей стороне давление не снижается вследствие прорыва на ее поверхность атмосферного воздуха. На РРУ обычно применяют рули клиновидной формы; для улучшения прочностных характеристик руля форма его сечения может быть принята в виде параболического клина.

1.3. Главные движительно-рулевые устройства.

Главные движительно-рулевые устройства (ГДРУ), в отличие от рулевых устройств (РУ), обеспечивают управляемость судна не только при наличии скорости хода, но и без нее. К рабочим органам ГДРУ относятся любые главные движители и насадки к ним, способные менять направление тяги в широких пределах. На средних и больших скоростях хода боковая сила этих устройств меняется пропорционально квадрату скорости, однако при уменьшении скорости хода боковая сила падает не до нуля, а до некоторого определенного значения, различного для разных устройств. В случае если судно оборудовано ГДРУ, рулевое устройство на нем может отсутствовать. Аналогично РУ действие ГДРУ сопряжено с работой главных движителей.

К ГДРУ относятся парусные движители, фланкирующие рули, гребные винты, работающие в противоположные стороны, П-образные поворотные насадки, раздельные поворотные насадки, неподвижные несоосные насадки, поворотные винтовые колонки и крыльчатые движители.

Парусные движители. Парусные движители предназначены для преобразования энергии ветра в работу полезной тяги судна, а также для придания судну нужного направления движения. Парус представляет собой полотнище из льняной, хлопчатобумажной или синте-

тической ткани, укрепленное на деталях рангоута, которое ставится поперек судна (прямой парус) или вдоль него (косой парус). К парусам также относятся аэродинамически эквивалентные им жесткие оболочки (парус-крыло). Совокупность парусов, рангоута, такелажа, палубных механизмов и дельных вещей, предназначенных для постановки, уборки и управления парусами называется парусным вооружением.

Паруса и парусное вооружение появилось 5-6 тысяч лет назад в Египте и Месопотамии, несколько позже и независимо – в Китае, Восточной Азии, Океании и Южной Америке. В настоящее время существует довольно большое разнообразие в парусном вооружении, и парусные суда различают по числу мачт (от 1 до 7) и типу парусного вооружения.

До середины XIX века парусные суда были основным средством транспорта на море. В настоящее время парусные суда используются в качестве спортивных, прогулочных и учебных судов.

Несмотря на сложность парусного вооружения и управления им, а также зависимость управляемости парусного судна от направления и силы ветра, рост цен на топливо и ужесточение требований к охране окружающей среды привели к разработке проектов и постройке ряда новых коммерческих парусно-моторных судов.

Фланкирующие рули. Фланкирующие рули (рис. 1.28) отличаются от многоперьевых рулевых комплексов наличием рулей не только за, но и перед винтами, что улучшает управ-

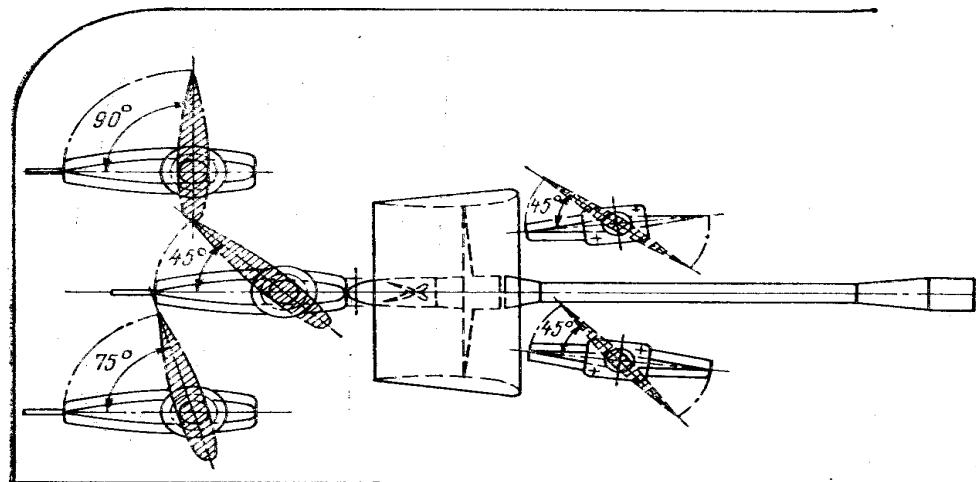


Рис.28. Фланкирующие рули

ляемость судна при работе винтов на задний ход. Причем совместная перекладка всех рулей, размещенных перед винтами, происходит независимо от совместной перекладки рулей за винтами. Работа винтов «враздрай» при соответствующей перекладке рулей обеспечивает получение боковой силы желаемого направления. Фланкирующие рули применяются на речных и озерных буксирах-толкачах. Часто под термином «фланкирующие рули» понимают только рули, расположенные перед винтами.

Гребные винты, работающие в противоположные стороны. На многовинтовых судах управление судном можно осуществлять работой одних лишь винтов в разные стороны («враздрай»). Разворачивающий момент у многовинтового судна появляется за счет смещения гребных винтов от диаметральной плоскости. Благодаря наличию момента от винтов многовинтовые суда при использовании винтов «враздрай» и руля обладают повышенной управляемостью.

Результаты действия на судно вращающихся винтов и руля для двухвинтового судна показаны на рис. 1.29. Стрелкой показано направление смещения оконечностей судна (носа или кормы). Создаваемое гребным винтом разрежение среды под кормовым подзором облегчает смещение кормы в сторону, одноименную борту работающей машины. Кроме того, с момента начала работы гребного винта горизонтальная составляющая сил поддержания на его борту станет меньше по сравнению с противоположным бортом. В обоих случаях работы гребного винта со стороны одного борта судна появляется разворачивающий момент, кото-

рый является главным фактором, определяющим маневренность (поворотливость) многовинтового судна.

Трехвинтовые суда практически объединяют в себе маневренные свойства одно- и двухвинтовых судов. Благодаря наличию трех винтов судно может в широких пределах менять циркуляцию и даже разворачиваться на месте. Быстрый разворот трехвинтового судна получается, если средняя машина будет работать вперед, а бортовые машины - «враздрай» при руле, положенном на соответствующий повороту, борт.

При движении кормой, поскольку на заднем ходу судно плохо слушается руля, рекомендуется два режима работы:

- 1) работать средней машиной на задний ход, а управлять судном при помощи бортовых машин;
- 2) все время работать на задний ход бортовыми машинами;

при отклонении судна от заданного курса следует переложить руль в сторону уклона кормы и дать ход вперед средней машиной.

П-образные поворотные насадки. Одним из новых вариантов ГДРУ, получающих в последние годы широкое распространение, является гребной винт в П-образной или Г-образной поворотных насадках, предложенных Г.И. Беззубовым. (рис. 1.30). Высокая технологичность изготовления, простота ремонта, возможность агрегатной замены, меньшая забиваемость битым льдом и другие эксплуатационные преимущества обусловили внедрение этого типа ДРК взамен обычных поворотных насадок.

Гребной винт в П-образной поворотной насадке отличается от гребного винта в обычной поворотной насадке как по своим пропульсивным качествам, так и по особенностям работы в качестве средства управления.

Отличительной чертой ДРК гребной винт - П-образная поворотная насадка является асимметрия его действия. В верхней части своего диска гребной винт комплекса работает в зоне скоростей, вызванных полукольцом насадки, т. е. в зоне повышенных скоростей протекания и соответственно меньших нагрузок на лопасть. В нижней части своего диска гребной винт работает в условиях, близких к условиям работы открытого гребного винта, и нагрузки на лопасть соответственно выше. Различие в тангенциальных составляющих сил, действующих на лопасти в верхней и нижней половинах диска гребного винта, создает на винте при не переложенной насадке поперечную силу, направление которой зависит от направления вращения гребного винта. На переднем ходу у гребных винтов правого вращения эта сила направлена вправо, у гребных винтов левого вращения - влево (при взгляде с кормы).

Образование поперечной силы на гребном винте вызывает реактивное отклонение его струи. Не переложенная насадка оказывается в зоне неравномерного косого обтекания, и на ней возникает поперечная сила, направленная в сторону, противоположную поперечной силе гребного винта.

Степень взаимной компенсации поперечных сил, развивающихся на гребном винте и насадке в этих условиях, зависит от конфигурации комплекса, т. е. от геометрических характеристик насадки и положения в ней гребного винта.

Испытания модели ДРК этого типа показали, что гидродинамические характеристики П-образной насадки в качестве средства управления линейны в широком диапазоне углов перекладки и дрейфа и несколько хуже, чем у обычной кольцевой.

Раздельные поворотные насадки. Раздельные поворотные насадки (РПН) на двухвинтовых судах при работе винтов «враздрай» развивают значительную боковую силу при отсутствии хода, т. е. обладают качествами, присущими САУ. При этом направление равно-

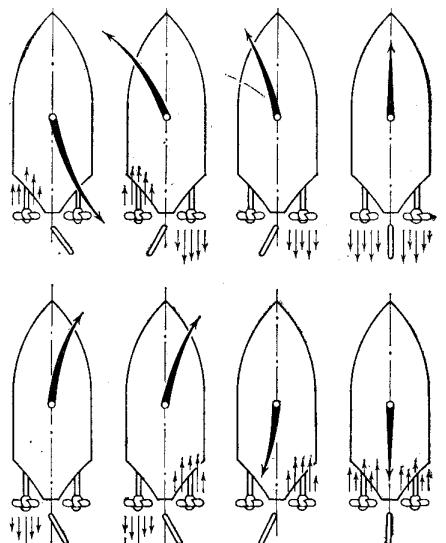


Рис.1.29. Результат действия на двухвинтовое судно винтов и руля при различных комбинациях их режимов работы

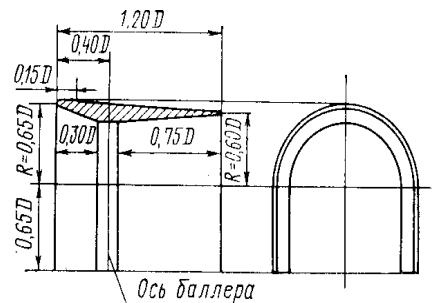


Рис.1.30. П-образные насадки

действующей тяг комплексов и ее положение по длине судна зависят от того, как переложены насадки.

При перекладке обеих насадок внутрь (рис. 1.31, а) равнодействующая приложена в точке диаметральной плоскости за кормой судна, и последнее разворачивается на месте тем интенсивнее, чем больше углы перекладки насадок.

Когда обе насадки переложены наружу (рис. 1.31, б), равнодействующая перемещается в нос и в корму соответственно, судно не только дрейфует, но и поворачивается в сторону, зависящую от величины и направления упоров винтов. При некотором среднем угле перекладки точки приложения равнодействующей может совпасть с центром сопротивления воды при боковом движении судна. В этом случае оно дрейфует без вращения, т. е. движется лагом.

Итак, раздельная перекладка насадок при одновременном изменении величины упора винтов (за счет изменения числа оборотов двигателя) позволяет получить необходимую величину, точку приложения равнодействующей.

РПН установлены на многих судах, главным образом речного флота - оуксирах-толкачах, сухогрузных и наливных судах. Испытания показывают высокую эффективность РПН, обеспечивающих судам повышенную маневренность.

Неподвижные несоосные насадки. Неподвижные несоосные насадки представляют собой средство управления, предложенное Г. Я. Першицем. В отличие от обычных неподвижных насадок, соосных с гребным винтом, эти насадки повернуты вокруг вертикальных осей задними кромками к ДП судна с таким расчетом, чтобы продолжения осей насадок пересекались на ДП за кормой судна (рис. 1.32). Угол отворота насадок от осей гребных валов

составляет около $4-8^\circ$. Поскольку при малых углах отворота насадки от линии вала, тяга комплекса винт - насадка практически совпадает с осью насадки. Равнодействующая тяг обоих комплексов приближенно располагается в точке пересечения осей насадок, а изменением частоты

вращения винтов, в том числе винтов, работающих враздрай, направление равнодействующей может быть изменено на любой угол.

Рис.1.32.Неподвижные несоосные насадки

Поворотные винтовые колонки. Поворотная винтовая колонка (ПВК) представляет собой гребной винт (или комплекс винт-насадка), направление тяги которого может меняться в широких пределах вследствие поворота устройства относительно оси, перпендикулярной к оси гребного винта (рис.1.33).

Если ось гребного вита колонки параллельна ДП судна, ПВК является главным движительным устройством. Действие ПВК как ГДРУ проявляется при повороте ее на некоторый угол относительно вертикальной оси. Как правило, угол поворота ПВК составляет 360° , что позволяет менять направление тяги ПВК, не прибегая к реверсированию приводного двигателя. Поворотные винтовые колонки в качестве ГДРУ применяются на судах, к маневренным свойствам которых предъявляются высокие требования, а скорость их невелика. К таким судам относятся, например, плавучие краны, паромы, портовые буксиры, рыбодобывающие и пожарные суда и др.

Если на судне установлены две ПВК, каждая из которых может поворачиваться независимо от другой, эффективность их действия повышается. Принципиально схема действия на судно сил от ПВК не отличается от соответствующей схемы, относящейся к раздельным поворотным на-

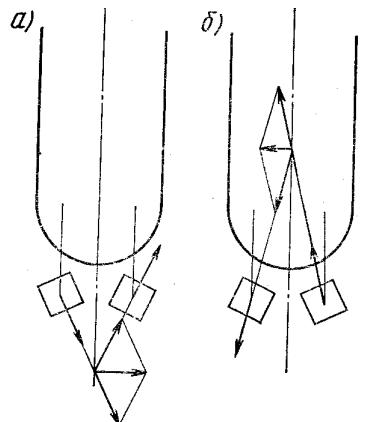


Рис.1.31.Раздельная перекладка поворотных насадок

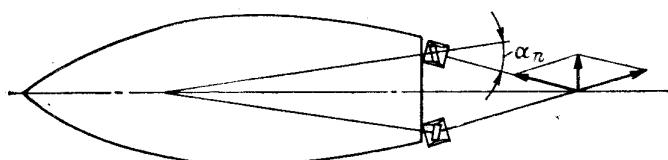


Рис.1.32.Неподвижные несоосные насадки

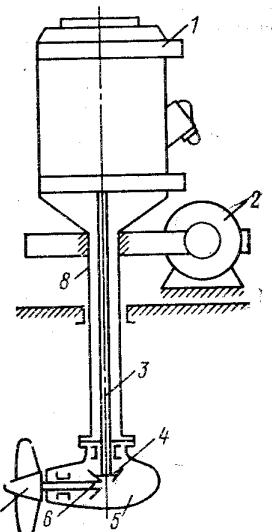


Рис.1.33. Принципиальная схема поворотной колонки.

1- приводной двигатель; 2- двигатель поворота колонки; 3-приводной вал; 4- конический редуктор; 5-гondola; 6- гребной вал; 7- гребной винт; 8- баллер.

садкам, однако углы отклонения векторов тяг в случае ПВК не ограничены, а поэтому и эффективность двух ПВК, используемых как ГДРУ, оказывается много большей эффективности РПН (при равной мощности устройств),

В 70-х годах некоторые зарубежные фирмы начали выпускать устройства, состоящие из двух ПВК, объединенных с автоматизированной системой управления ими. Такие устройства кардинально упрощают управление ПВК, сводя участие человека (рулевого) к постановке в определенное положение рукоятки, задающей требуемое направление перемещения или поворота судна. Автоматизированная система по сигналу от этой рукоятки поворачивает в необходимое положение обе ПВК.

Крыльчатые движители. Впервые крыльчатый движитель, получивший практическое применение, был предложен в 1926 г. австрийским инженером Шнейдером. Крыльчатый движитель (рис. 1.34.) - это устройство, использующееся не только для создания упора, но и для изменения его направления. Помимо этого, крыльчатый движитель позволяет регулировать его гидродинамические характеристики, т. е. сочетает в себе свойства движителя регулируемого шага и средства управления.

В настоящее время крыльчатые движители применяются на судах как в качестве основного движителя (буксиры, паромы, плавкраны, рыболовные суда), так и в виде вспомогательного средства управления (большие морские суда - пассажирские, танкеры и т. д.). В первом случае движитель располагается непосредственно под днищем судна, во втором - чаще всего в поперечном канале корпуса.

Конструктивно крыльчатый движитель представляет собой диск (ротор) с вертикальной осью вращения, установленный заподлицо с днищевой обшивкой (либо с платформой, если движитель расположен в поперечном канале). Диск несет на себе четыре-восемь поворотных вертикальных лопастей, размещенных на равном расстоянии друг от друга по окружности диска и представляющих собой профилированные крылья. При вращении движителя каждая лопасть совершает вращательное движение по отношению к диску и вместе с диском относительно воды. В воде находятся только лопасти, а механизмы вращения диска и поворота лопастей размещены внутри корпуса судна.

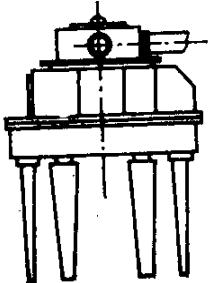
Для уяснения принципа действия КД рассмотрим рис. 1.35. Как видно из рисунка, при вращении диска лопасти поворачиваются так, что перпендикуляры, восстановленные из середины хорд лопастей, в любой момент времени пересекаются в одной точке N. Эта точка называется центром управления. Лопасть движется в воде подобно крылу со скоростью v , являющейся геометрической суммой окружной скорости и скорости поступательного вместе с судном перемещения диска. При движении лопасти под углом атаки на ней возникает сила, составляющая которой P создает упор лопасти в направлении движения судна, а окружная составляющая T образует момент относительно центра диска, преодолеваемый машиной. С помощью привода лопастей центр управления N может быть установлен в любой точке внутри окружности.

Перемещение точки N вдоль диаметра движителя изменяет величину упора, зависящую от длины отрезка ON. Направление упора перпендикулярно этому отрезку.

Регулируя величину упора, можно осуществить все режимы движения судна от «полного хода вперед» через «Стоп» до «Полного хода назад». Положение «Стоп» соответствует совмещению точки N с центром диска O. В этот момент упор лопастей равен нулю.

Перемещением точки N в стороны от диаметра меняется не только величина, но и направление упора, т. е. производится поворот судна. Скорость и направление вращения диска движителя при этом могут оставаться постоянными.

Управление судном при помощи КД показано на рис.1.36. Суда, оборудованные крыльчатыми движителями, имеют ряд преимуществ перед винтовыми:



1.34.Крыльчатый движитель

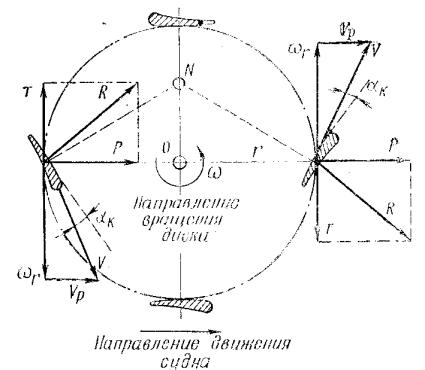


Рис.1.35.Принцип действия КД

сочетание функций винта и руля, вследствие чего отпадает необходимость в рулевом устройстве;

возможность направления силы тяги в любую сторону;

некоторое повышение к. п. д. установки в сравнении с ВФШ;

возможность расположения буксировщика при буксировке лагом как в носовой, так и в кормовой оконечности судна, так как упор буксировщика на переднем и заднем ходу одинаков;

осуществление перемены хода без реверса двигателя;

возможность создания упора в направлении, перпендикулярном борту швартующегося судна при любом положении буксировщика.

Хорошие маневренные качества судов с КД позволяют особо выгодно использовать эти движители на буксировщиках.

Судно, имеющее КД, способно легко разворачиваться в любом направлении даже из положения «Стоп». Наличие двух КД позволяет судну двигаться лагом (со скоростью около 2 уз). Можно осуществлять плавное наращивание (практически от нуля) и гашение скорости. Это имеет важное значение при подходе к судам, причалам и т. д.

Путь торможения судна с КД обычно не превышает длины корпуса, так как выступающие лопасти движителя быстро гасят инерцию;

существенно сокращается и время торможения. Буксировщик с КД затрачивает на прием буксира на ходу на 30 - 40% времени меньше, чем винтовой буксир, а при сильном ветре и течении время сокращается в 3-4 раза. При швартовке транспортных судов к причалу примерно в 5 раз сокращается время, необходимое для соответствующего маневрирования буксировщика.

Необходимо отметить и некоторые недостатки судов, оборудованных КД:

суда, имеющие КД в качестве основного движителя, для плавания в открытом море не приспособлены, так как на волнении несущий диск и лопасти будут подвергаться чрезмерным напряжениям;

для плавания во льду КД требует надежной конструктивной защиты;

сложность конструкции самих КД и относительно большая масса (10 кг на 1 л. с. и более) позволяет применять их лишь при небольших мощностях нереверсивного двигателя;

КД увеличивают фактическую осадку судна.

Вспомогательные устройства управления (ВУУ) характерны тем, что для их работы включения главных двигателей не требуется, поскольку ВСУ оборудованы собственными двигателями. Предназначены ВУУ для обеспечения управляемости судна только на предельно малых скоростях и без хода, и эффективность их, как правило, растет по мере уменьшения скорости хода. Судно, оборудованное ВУУ, должно иметь обычный руль или любое другое РУ. Иногда ВУУ устанавливаются на суда, снабженные ГДРУ.

Вспомогательные устройства управления по характеру своего воздействия на судно подразделяются на подруливающие устройства и вспомогательные движительно-рулевые устройства, изгибающие устройства и буксирные устройства.

Подруливающие устройства (ПУ) является одним из наиболее распространенных вспомогательных средств управления судном. Оно представляет собой автономную систему, независимую от главных двигателей, размещенную в корпусе судна. ПУ, кроме откидных винтовых колонок, создают поперечную силу (тягу ПУ) путем засасывания зaborтной воды и выбрасывания ее в поперечном по отношению к ДП судна направлении.

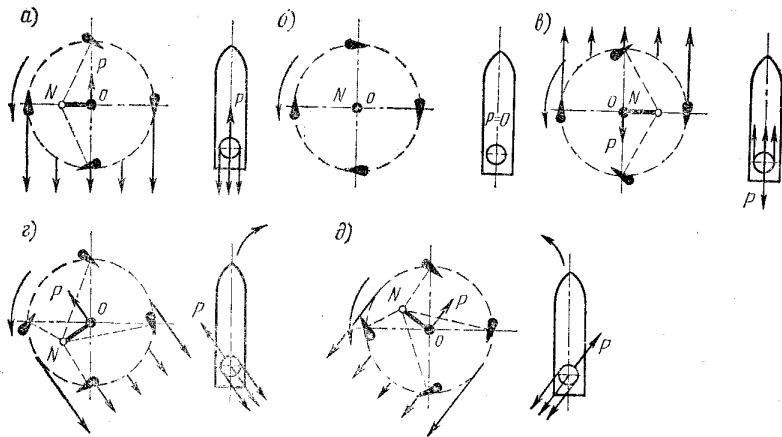


Рис.1.36. Управление судном с помощью КД. а) –вперед; б)–стоп; в)–назад; г)–поворот вправо; д)–поворот влево.

Подруливающее устройство предназначается для управления судном в условиях, в которых эффективность основных средств управления оказывается недостаточной. Подруливающее устройство должно обеспечивать маневрирование судна, не имеющего хода, при швартовных операциях, при отходе от стенки, при развороте в условиях ветра и течения, оно должно способствовать маневрированию судна на малых скоростях при самостоятельном движении на акваториях портов, при различных ограничениях фарватера, в узостях и т. п.

Носовые и кормовые подруливающие устройства. Общим конструктивным признаком этих ПУ является наличие поперечного канала в корпусе судна и встроенного в него импеллера или насоса.

Носовые ПУ (НПУ) и кормовые ПУ (КПУ) различают по месту расположения на судне. Для увеличения действующего на судно вращающего момента носовое ПУ размещают на возможно большем удалении от миделя.

Кормовое ПУ устанавливают в дополнение к носовому для обеспечения судну движения лагом или других специальных маневров. Для увеличения вращающего момента кормовое ПУ также размещают возможно дальше от миделя. Размещение КПУ вызывает обычно значительные трудности, связанные с расположением в этом районе валопроводов гребных винтов. На судах с большой осадкой КПУ может размещаться ниже линии гребного вала (рис.1.37). На судах с малой осадкой применяют КПУ с каналами сложной формы. Мощность КПУ обычно меньше или равна мощности НПУ.

По числу каналов ПУ разделяются на одно- и двухканальные. Наиболее распространены одноканальные ПУ, которые предназначаются для работы на оба борта и имеют симмет-

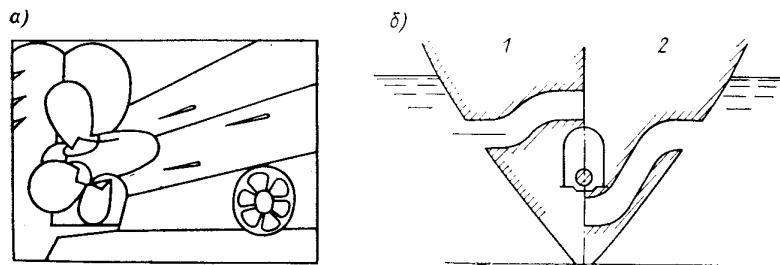


Рис.1.37. Установка кормового ПУ на судне: а)-общий вид установки на судне с ВРШ; б)-схема размещения каналов КПУ в обход валопровода. 1- выше туннеля валопровода; 2- ниже туннеля валопровода.

ричную, относительно ДП судна, конструкцию (рис. 1.38).

Двухканальные ПУ могут представлять собой комбинацию двух ПУ одностороннего действия (рис. 1.39). Подобная конструкция позволяет несколько повысить эффективность

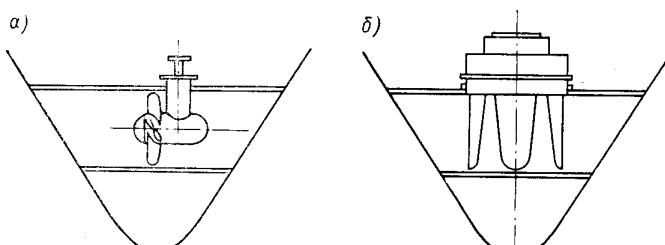


Рис.1.38. Одноканальные ПУ: а)- с гребным винтом; б)- с крыльчатым движителем

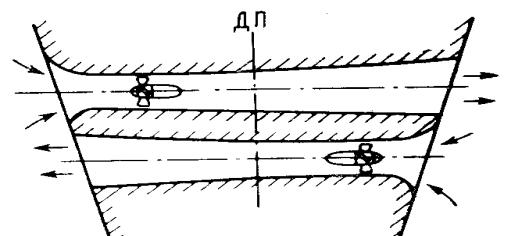


Рис.1.39. Двухканальное ПУ одностороннего действия

ПУ благодаря более рациональной, несимметричной относительно ДП, профилировке канала и использованию более экономичного импеллера одностороннего действия (например, ВФШ с авиационным профилем сечения лопастей). Однако реализовать эффект от расширения выходной части канала и соответствующего снижения скорости в струе ПУ, как правило, не удается. При обычной длине канала, не превышающей четырех его диаметров, эффективное расширение выходной части канала возможно только при большом угле раствора диффузора, приводящем к не компенсируемым вязкостным потерям. Кроме того, расширение канала приводит к росту разрежения на засасывающей стороне импеллера, увеличивая тем самым опасность кавитации. Стоимость таких ПУ выше стоимости эквивалентного по тяге одноканального ПУ, а их размещение на судне требует больше места.

Двухканальные симметричные ПУ устанавливают при необходимости разделения мощности ПУ, т. е. в тех случаях, когда осадка судна не допускает размещения одного ПУ достаточно большого диаметра.

Применяются также ПУ со сложной формой канала (Т-образной, Z-образной), с различного вида заслонками (рис. 1.40). Преимуществом такого ПУ является возможность использования достаточно простых импеллеров одностороннего действия (например, осевых насосов), а также возможность организации надводного выброса, что обеспечивает им спо-

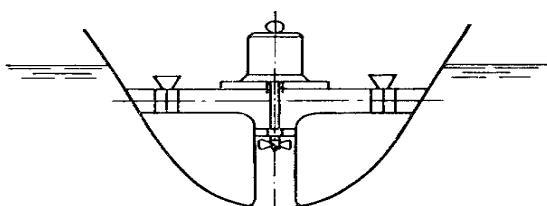


Рис.1.40. ПУ с каналом Т-образной формы и заслонками

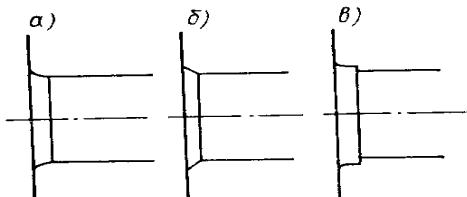


Рис.1.41. Формы входной(выходной) части канала: а)-скругленная; б)- коническая; в)- с уступом.

собность к действию на ходу судна. Эффективность ПУ со сложной формой каналов ниже обычной.

По типу используемого импеллера ПУ разделяются на ПУ с ВРШ, реверсивными ВФШ, двумя ВФШ противоположного вращения, крыльчатыми двигателями, а также ПУ с центробежными, осевыми и эжекционными насосами. ПУ с крыльчатым двигателем называются **роторными**, а с винтами или насосами – **водометными**. Применение импеллера того или иного типа определяется его эффективностью в конкретных условиях размещения, видом энергоснабжения, различными специальными требованиями к ПУ.

Канал ПУ. Наиболее распространенной формой канала одноканальных, симметричных ПУ является цилиндрическая, круглая в сечении у ПУ с гребными винтами или прямоугольная у ПУ с крыльчатыми двигателями.

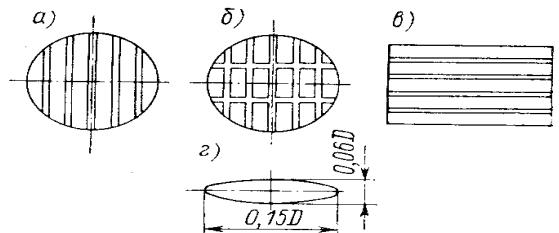
Особое значение для эффективности ПУ имеют входная и выходная части канала. Конфигурация входной части канала ПУ должна обеспечивать отсутствие отрыва потока, благоприятное распределение давления и минимум сопротивления входу жидкости.

Конфигурация выходной части канала должна обеспечивать устойчивый отрыв струи и минимум потерь на выходе, т. е. иметь острые кромки. Необходимость одновременного удовлетворения обоих требований приводит для симметричных ПУ к компромиссным решениям (рис. 1.41). Наибольшее распространение среди таких решений получило незначительное округление кромок отверстий канала. Иногда используются конические растробы, но эта форма является уступкой технологии, и ее применение нежелательно.

Большой интерес представляет ступенчатая форма, позволяющая совместить устойчивый отрыв выходящей струи с минимумом потерь на входе.

Зашитные решетки. Защитные решетки устанавливают во входных отверстиях каналов ПУ для предотвращения поломок и засорения ПУ посторонними предметами (рис. 1.42).

Рис.1.42. Защитные решетки ПУ:
а — вертикальная решетка;
б — смешанная решетка;
в — решетка канала ПУ с крыльчатым двигателем;
г — стандартный профиль элемента решетки.



Следует оговорить, что установка решеток не только защищает ПУ, но и в определенной мере способствует скоплению в его канале посторонних предметов. Поэтому в конструкции ПУ, оборудованного защитными решетками, должна предусматриваться возможность очистки канала от мусора.

Для ПУ с гребными винтами наиболее рациональны вертикальные решетки. При установке ПУ в зоне значительного наклона шпангоутов целесообразно использование горизонтальных решеток с профилировкой, обеспечивающей безотрывное течение в нижней части

канала. В некоторых конструкциях применяется смешанный тип решеток, состоящих из вертикальных и горизонтальных элементов. Для защиты каналов ПУ с крыльчатыми движителями обычно применяются горизонтальные решетки. Загромождение сечения канала защитной решеткой во всех случаях не должно превосходить 10%, хотя уже при этом снижение тяги ПУ достигает в зависимости от профилировки и качества исполнения решетки 6-10%. Дальнейшее увеличение загромождения приводит к резкому снижению тяги ПУ (при загромождении, равном 15%, снижение тяги достигает 20%).

Закрытия канала. У быстроходных судов и судов с полными носовыми обводами дополнительное сопротивление воды, которое связано с наличием входных отверстий и сквозного канала, соединяющего оба борта, может достигать значительной величины. Наилучшим способом практической ликвидации дополнительного сопротивления является полное закрытие входных отверстий канала ПУ. Наибольшее распространение получили два типа устройств, для закрытия отверстий каналов: заслонки и жалюзи (рис. 1.43). Заслонки не увели-

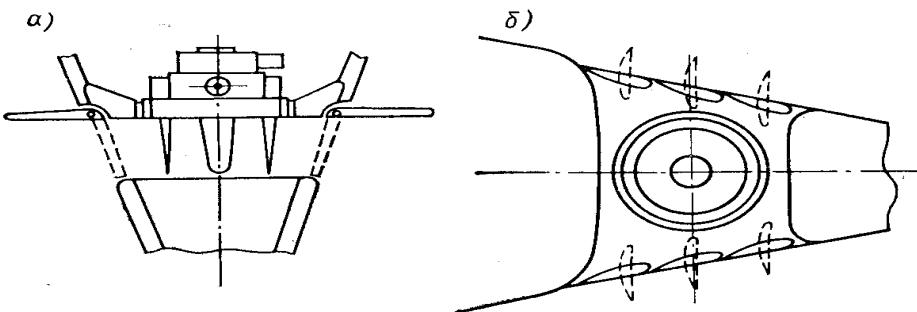


Рис.1.43. Устройство для закрытия каналов ПУ: а)- заслонка; б)- жалюзи

чивают сопротивления тракта и соответственно не снижают эффективности ПУ. Выход за габариты судна делает их легко уязвимыми при швартовых и других подобных операциях. Жалюзи, наоборот, менее подвержены повреждениям, но, как и другие виды защитных решеток, снижают эффективность ПУ.

Откидные винтовые колонки. Откидные винтовые колонки используются в основном как ПУ в средствах активного позиционирования на буровых установках и судах. Конструктивно они проще, чем винтовые поворотные колонки и создают упор только вдоль одного предусмотренного для них направления. Обычно на одном объекте устанавливается несколько откидных винтовых колонок, направленных в разные стороны. При перемещении объекта в новое положение откидные винтовые колонки убираются для уменьшения сопротивления.

Вспомогательные движительно-рулевые устройства (ВДРУ), в отличие от ПУ, могут создавать необходимую тягу, направление которой меняется в широких пределах.

Использование ВДРУ определяется необходимостью улучшения маневренных качеств судов отдельных типов или составов в тех случаях, когда главные устройства управления не удовлетворяют предъявляемым к этим качествам требованиям. В качестве ВДРУ могут использоваться активные рули, носовые рули, поворотные винтовые колонки, силовые приставки и вспомогательные суда-кантовщики.

Активные рули (AP) - это рули с установленными на них вспомогательными винтами, расположенными обычно за задней кромкой пера. Винт, как правило, имеет направляющую насадку, которая повышает его к. п. д. и защищает от повреждений.

Энергия к винту может быть подведена двумя путями:

от водопогружных электродвигателей, размещенных в бульбообразной наделке на пере руля (рис. 1.44);

посредством конической зубчатой передачи и вертикального вала, проходящего через расточку баллера руля. В последнем случае приводной двигатель располагается в румпельном отделении.

Винт активного руля устанавливают так, чтобы его ось находилась на одной линии с осью основного гребного винта.

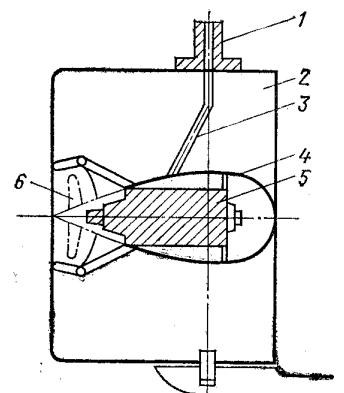


Рис.1.44. Активный руль с водопогружным двигателем.
1-баллер; 2-перо руля; 3-кабели;
4-бульбообразная наделка; 5-водо-
погружной электродвигатель;
6-гребной винт.

Активный руль перекладывается с борта на борт обычной рулевой машиной, но с целью увеличения эффективности действия угол перекладки должен быть не менее 70° . Когда судно следует под главным движителем (винт АР не работает) со скоростью более 5 уз, перекладка руля осуществляется в обычных пределах - 35° на оба борта. Для этой цели на рулевых машинах устанавливают ограничители, сблокированные с датчиком, помещенным на гребном валу, или управляемые с мостика.

Схема действия активного руля показана на рис. 1.45. При перекладке пера руля на нем возникает боковая сила P_y , к которой добавляется составляющая P_y' упора винта. В результате увеличивается боковая сила, действующая на корму судна, и при повороте руля на 90° относительно ДП судна эффект разворачивающего действия винта АР будет максимальным.

Из опыта эксплуатации активных рулей можно сделать некоторые выводы об их достоинствах. Так, активный руль:

позволяет осуществлять повороты не только на малом ходу, но и при полном отсутствии хода;

может служить запасным движителем, причем судно способно двигаться только с его помощью при полном сохранении управляемости;

при маневрах на стесненной акватории используется и как основной движитель.

Кроме того:

при совместной работе в результате противоположного вращения основного винта и винта АР снижаются потери на закручивание потока основного винта, что способствует увеличению пропульсивного к. п. д. комплекса;

применение АР в сочетании с носовыми подруливающими устройствами позволяет обеспечивать движение судна лагом;

маневренные качества судна еще более улучшаются, если в качестве движителя АР используется ВРШ.

Но при этом:

наличие АР усложняет и утяжеляет конструкцию пера руля;

в общем случае полное сопротивление судна за счет применения активного руля вместо обычного может увеличиваться на 6- 15%;

этот недостаток можно несколько компенсировать применением ВРШ;

упор винта АР, как и всякого винта фиксированного шага, на заднем ходу меньше упора переднего хода; этот недостаток в известной мере может быть устранен за счет применения ВРШ.

Активные рули, широко применяющиеся в зарубежном и отечественном судостроении в течение 50-70-х годов, в настоящее время устанавливаются на суда сравнительно редко.

Носовые рули. Для улучшения поворотливости и уменьшения ширины ходовой полосы, занимаемой толкаемым составом или крупнотоннажным грузовым теплоходом при прохождении крутых поворотов, на реках находят применение носовые опускающиеся рули. Эти рули размещаются в сквозных нишах корпуса в носовой части передней баржи толкаемого состава или судна с санными обводами и составляют с ДП судна угол $35 - 45^\circ$. Подъем и опускание носовых рулей производятся с помощью специального дистанционно управляемого привода. В обычных условиях эксплуатации рули подняты, за пределы корпуса судна не выступают и их не используют. При движении по лимитирующему перекату реки носовой руль того борта судна, в сторону которого осуществляется поворот, опускается и на нем возникает боковая сила, способствующая повороту судна или состава.

Поворотные винтовые колонки. Поворотные винтовые колонки (ПВК) уже описывались в разделе главных движительно-рулевых устройств. В качестве ВДРУ ПВК применяются на судах, к которым предъявляются высокие требования в отношении управляемости на предельно малых скоростях хода, а также на судах, которым по условиям эксплуатации необходимо длительное время без хода удерживать в определенном положении ДП или находиться в определенной точке открытого моря. К таким судам относятся рыбоперерабатывающие базы, океанографические и научно-исследовательские суда, кабелеукладчики, суда

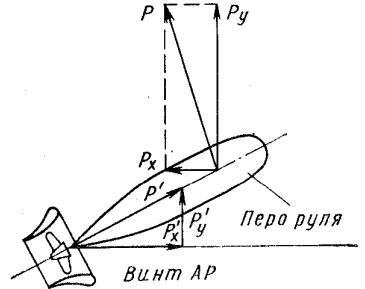


Рис.1.45. Схема действия активного руля

для обслуживания нефтяных промыслов, плавучие буровые установки и др. ПВК, используемые как ВДРУ, обычно менее мощные, чем ПВК ГДРУ, и выполняются, как правило, откидывающимися или выдвижными. Это позволяет убрать устройство внутрь корпуса, если надобность в нем отсутствует, что предотвращает увеличение сопротивления воды движению судна из-за лобового сопротивления ПВК, а также поломки последних.

Силовые приставки и вспомогательные суда- кантовщики. Силовые приставки (автономные плавучие движительно-рулевые агрегаты) и вспомогательные суда пришвартовываются к борту в носовой части судна или состава для улучшения их управляемости в сложных условиях эксплуатации. Они применяются в речном плавании при недостаточном обеспечении судна или состава главными и вспомогательными устройствами управления и поэтому могут быть отнесены к ВДРУ.

К ВДРУ относятся также вспомогательные буксиры-кантовщики использующиеся в морских портах для перемещения крупных морских судов, не обладающих автономностью в отношении управляемости.

Изгибающие устройства составных судов или толкаемых составов представляют собой специфические устройства, рабочим органом которых служит сам корпус судна либо корпуса барж толкаемого состава (рис. 1.46). Изгиб составных судов применяется для облегчения прохода крупнотоннажного речного состава по извилистым рекам с узким судовым ходом. Отдельные суда состава счаливаются в нитку и соединяются шарнирно, благодаря чему переднее судно имеет возможность поворачиваться на некоторый угол относительно заднего, что ведет к ломаному изгибу оси состава. Шарнир снабжен размещаемым на палубе

устройством принудительного поворота и удержания взаимного положения судов. Изгибающих устройств по длине состава может быть несколько.

Изгиб состава, меняя его форму, приводит к изменению усилий, действующих на движущийся корпус со стороны воды, и тем самым изменяет движение состава. Практическое распространение получили балочные и безбалочные гидравлические устройства, позволяющие осуществлять принудительный

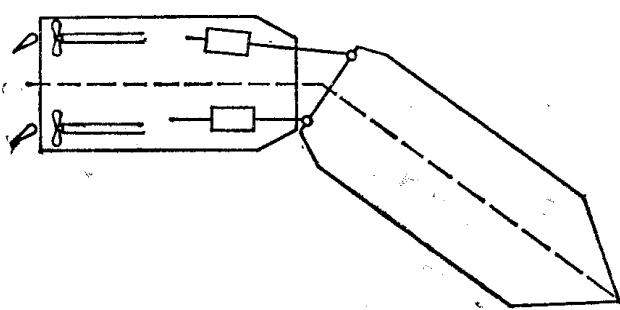


Рис.1.46. Схема изгибающего состава
поворот одного судна в составе относительно другого на угол, величина которого колеблется в пределах от 13 до 27°.

Одним из конструкторских бюро Санкт-Петербурга создано гидравлическое изгибающее устройство, позволяющее отклонять толкач от ДП состава и использовать его как большой руль. Это устройство также существенно улучшает управляемость толкаемых составов, особенно при воздействии на них ветра.

Буксирные устройства служат для передачи движущей силы с буксира на буксируемый объект (судно, плот, буровую установку и т. п.), могут рассматриваться как вспомогательное средство управления, поскольку эта сила дополняет те силы, которые создают основные СУ буксируемого объекта.

В морских условиях при отсутствии ветра и волнения буксировка больших трудностей не представляет и может быть выполнена любыми судами. В штормовых условиях на буксирном тросе возникают большие усилия, поэтому буксировка крупных объектов (плавдоков, кранов и т.п.) осуществляется специальными океанскими буксирами, которые оборудованы автоматическими буксирными лебедками, подтравливающими буксирный трос в момент рывка. В качестве буксирного троса используют буксирную линию с 2-кратным запасом на разрывное усилие и 6-кратным – на рабочее. Скорость буксировки рассчитывают по упору винта буксира на швартовном режиме и суммарному сопротивлению воды для буксируемого и буксирующего судна. Буксировка может выполняться в **кильватер** или **лагом**. Буксировка в кильватер – наиболее простой и удобный способ. Различают буксировку на коротком буксире и на длинном, когда натяжение буксирного троса обеспечивается без выхода его из воды. Ледоколы в Арктике применяют буксировку вплотную. Буксировка лагом (борт

о борт) применяют обычно на коротких переходах в тихую погоду с небольшими скоростями.

При буксировке по внутренним водным путям используют четыре способа: **в кильватер**, **лагом**, **бочонком** (в первом и третьем счале одно судно, а во втором - два) и **безменом** (в первом и втором счалах по одному судну, а в третьем - два).

Если в качестве буксирного судна используется не буксир, то такая буксировка называется **буксировкой со вспомогательным судном**.

Ограничивающие устройства управления служат для ограничения перемещений судна или его стабилизации в определенном положении. К ним относятся тормозные, якорно-швартовные устройства и системы позиционирования.

Тормозные устройства (ТУ) (рис.1.47), создают силу в направлении диаметральной плоскости, предназначены в отличие от главных движительных устройств не для произвольного управления скоростью, а лишь для уменьшения скорости переднего хода. Действие тормозных устройств проявляется только при наличии скорости судна, для набора которой используется главный двигатель. Если судно имеет скорость переднего хода, то ТУ может действовать и при неработающем главном двигателе, когда судно движется по инерции. Кроме того, ТУ используется и при работе винта на задний ход (режим реверса).

Принцип действия существующих ТУ заключается в увеличении сопротивления воды движению судна или путем протаскивания по дну лотов или волокуш. К тормозным устройствам относятся тормозные парашюты, тормозные щиты, раскрывающийся носовой бульб, опускающиеся носовые рули, лоты и волокушки. Тормозные устройства являются аварийным средством управления и используются, как правило, только в критических ситуациях.

Тормозные парашюты. Тормозные парашюты по принципу действия и назначению аналогичны авиационным. Система тормозных парашютов может рассматриваться как дополнительное средство торможения для больших судов. Парашюты сбрасывают с бортов, а не с кормы во избежание наматывания тросов на винт. Испытания тормозных парашютов в Японии на танкере дедвейтом 50 тыс. т при скорости 10,5 уз показали, что 2 парашюта диаметром 3 м с каждого борта позволяют вдвое сократить тормозной путь и на 20% время торможения.

Тормозные щиты. Идея применения бортовых тормозных щитов была высказана впервые за рубежом (в Нидерландах) и в Советском Союзе. Первоначально считалось, что тормозные щиты можно устанавливать в любом месте судна, но в дальнейшем было признано целесообразным иметь их в кормовой части. Это упростило систему гидравлического управления и улучшило управляемость судна при его движении задним ходом, т. е. при работе гребных винтов на задний ход. С помощью тормозных щитов путь свободного торможения может быть, например, сокращен в 2,6 раза, а время более чем в 3 раза.

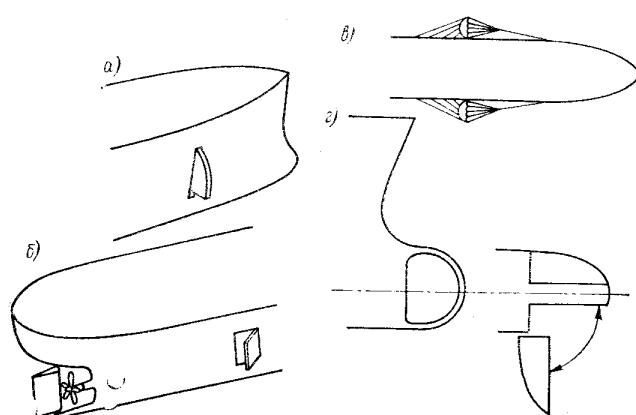


Рис.1.47. Схема тормозных устройств: а -выдвижные щиты; б -откидные щиты; в- парашюты; г -раскрывающийся носовой бульб.

вспомогательных устройств управления. Их одновременное опускание является довольно эффективным средством торможения толкаемых составов.

Лоты и волокушки. К тормозным устройствам плотов, а иногда и составов относятся лоты и цепи-волокушки, которые опускаются с кормовой части плота и волочатся по грунту. Создающаяся при этом сила трения тормозит движение плота и препятствует перемещению плота за пределы судового хода.

Раскрывающийся носовой бульб.

Для обеспечения аварийного торможения носовой бульб крупнотоннажного судна может быть выполнен в виде двух раскрывающихся чащ или в виде закрылок, напоминающих жабры, раскрытие которых навстречу движению. Эффективность раскрывающегося носового бульба соответствует эффективности тормозных щитов.

Опускающиеся носовые рули. Носовые рули уже были описаны в разделе

Якорно-швартовные устройства. Эти устройства широко используют в качестве дополнительного средства управления при маневрировании судов для ограничения перемещений и подтягивание их к береговым и плавучим сооружениям или постановке на якорь. Они способствуют также отвалу судна от причала при сильном ветре и течении навальных направлений.

Якорное устройство, помимо удержания судна в определенной позиции и обеспечения отвала судна от причала, может использоваться для экстренного торможения, для чего вытравливается якорь с небольшим количеством якорной цепи, обеспечивающей протаскивание якоря по дну.

Автошвартовые устройства отличаются от обычных **швартовных** наличием автоматического контроля за натяжением судовых концов. В портах с сильными приливными явлениями такие устройства облегчают работу команды и увеличивают безопасность судна у причала, предотвращая обрыв и провисание концов.

Системы позиционирования или стабилизирующие устройства имеют целью закрепить плавучее сооружение в определенном положении и в заданном ракурсе для осуществления им своих функций. Системы позиционирования в зависимости от типа и назначения плавучего сооружения и условий его эксплуатации в качестве рабочих органов имеют самые различные по своей конструкции системы.

Если на плавучем стабилизируемом объекте ПУ отсутствуют и ограничение его перемещений достигается только с помощью якорных связей, то такая система носит название **пассивной**. В том же случае, когда удержание установки или бурого судна производится с помощью главных движителей и ПУ, система позиционирования называется **активной**. В **комбинированной** системе позиционирования используются как якоря, так и движительно-рулевые и подруливающие устройства.

. На рис.1.48. показана **комбинированная система** позиционирования плавучей полупогруженной буровой установки, состоящая из якорных цепей и ПУ и обеспечивающая определенное положение этой установки над точкой бурения. Наибольшие отклонения установки от вертикали, проходящей через точку бурения, не должны превышать 4% глубины моря при самых неблагоприятных сочетаниях ветра, волнения и течений. Натяжение якорных цепей осуществляется с помощью специальных лебедок. В качестве ПУ используют поворотные или откидные винтовые колонки, которые при переходе буровой установки с одной точки бурения на другую могут использоваться как главные движители. Если на плавучем стабилизируемом объекте ПУ отсутствуют и ограничение его перемещений достигается только с помощью якорных связей, то такая система носит название **пассивной**. В том же случае, когда удержание установки или бурого судна производится с помощью главных движителей и ПУ, система позиционирования называется **активной**. Управление системами позиционирования производится или с помощью специальных механизмов, или автоматически.

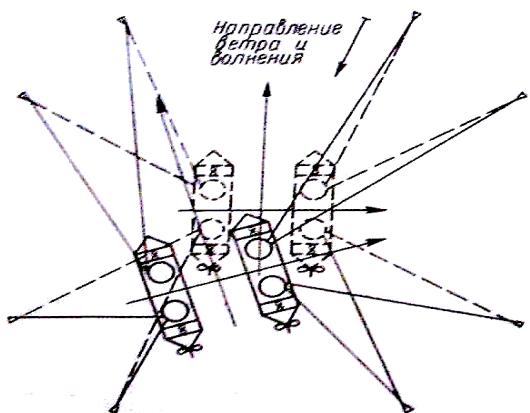


Рис.1.48.Комбинированная система позиционирования плавучей полупогруженной установки

Конструкции стабилизирующих устройств для других типов плавучих сооружений (плавучего причала, плавучего крана, земснаряда, дока) имеют свои специфические особенности.

Задача позиционирования судна, в конечном счете, сводится к контролю за его 3-мя из 6-ти степеней свободы: контролю за поступательным движением, движением лагом и вращением вокруг вертикальной оси. Для этого необходимо знать место судна (широту и долготу) и его курс. Измерение курса судна с достаточной точностью осуществляется с помощью гирокомпаса, а для определения его места применяются специальные высокоточные системы, такие как дифференциальная GPS, гидроакустические системы, система Artemis и Tautwire.

Дифференциальная GPS , в отличие от обычной, дает возможность определить место с точно-

стью до 1-3 м благодаря сети береговых станций, передающих поправку к месту, определенному обычной GPS. В настоящее время дифференциальная GPS является наиболее используемой в системах позиционирования.

Определение места с помощью гидроакустической системы осуществляется с помощью гидроакустических буев-ответчиков, расположенных на морском дне, и гидроакустической антенны-излучателя, расположенной на судне и способной с достаточной точностью определить расстояние и направления на буй-ответчик. Различают гидроакустические системы с длинной и ультракороткой базой (рис.1.49).

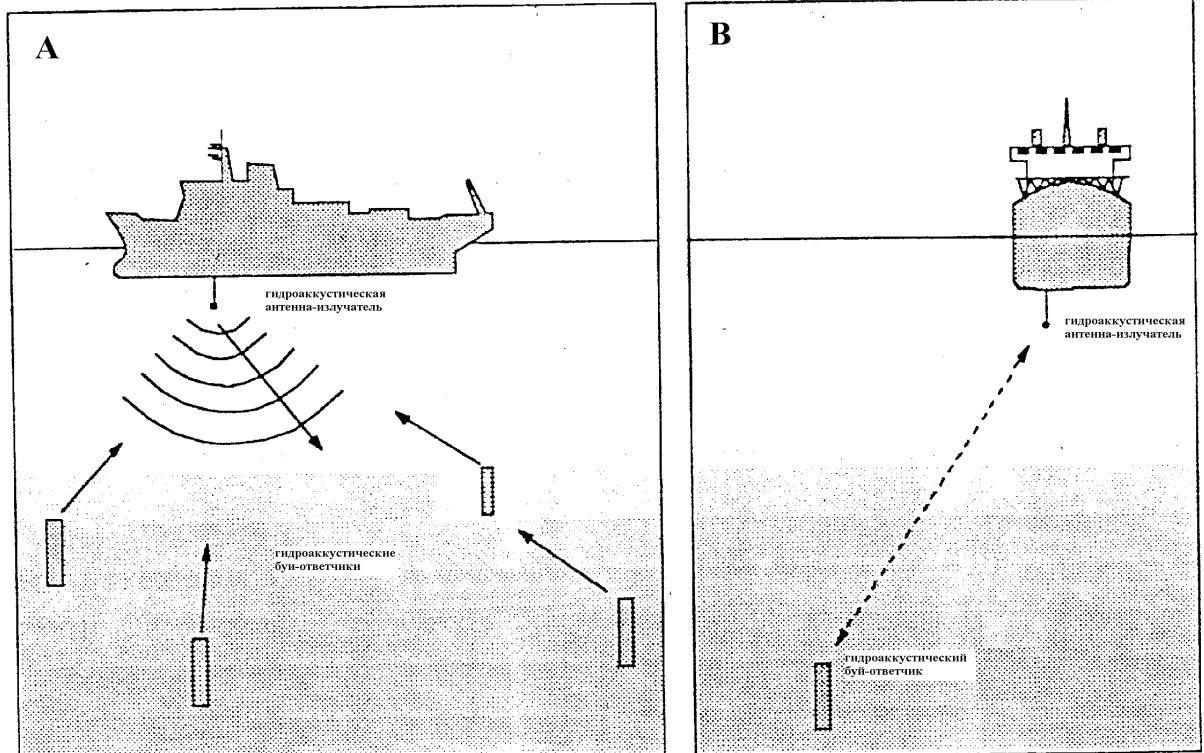


Рис.1.49. Гидроакустические системы определения места.

А-с длинной базой; В- с ультракороткой базой

Система определения места Artemis является микроволновой, и в ее состав входят две микроволновые антенны, расположенные на судне и ориентированы в сторону станции и на объекте с известным местоположением (рис.1.50). Антенны являются направленными и

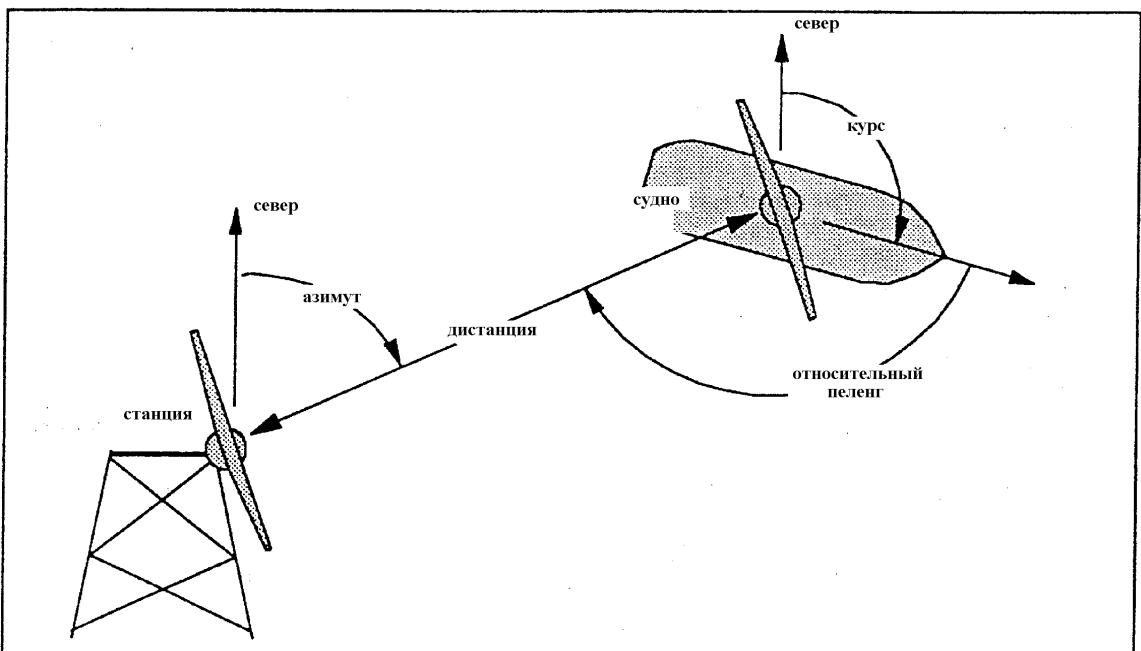


Рис.1.50. Принципиальная схема системы Artemis

на судне такая антенна устанавливается на гидростабилизируемой платформе. Радиус действия такой системы всего 5-10 км.

Принцип определения места с помощью системы Tautwire заключается в измерении угла отклонения от вертикали и вытравленной длины туга натянутого стального конца, прикрепленного к грузу, расположенному на дне (рис. 1.51.)

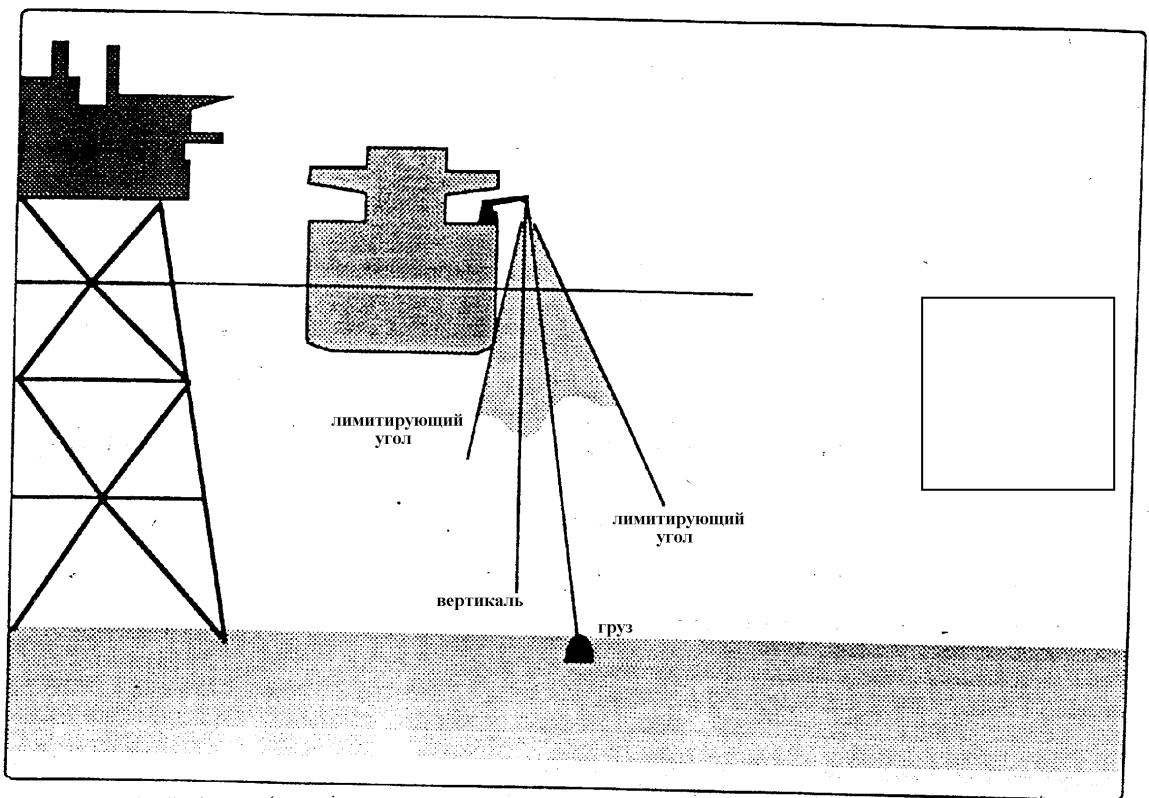


Рис. 3.3. Система определения

Рис.1.51 Система определения места Tautwire

Определение положения судна и его позиционирование осуществляется для точки, расположенной в пределах судна, называемой центром вращения (ЦВ). В одних системах за центр вращения принимают центр тяжести судна, в других за ЦВ может быть принят, к примеру, кабелеукладочный блок, поворотная платформа буровой передвижной вышки или любая другая точка, позиционирование судна относительно которой необходимо для выполнения его специфических функций. Некоторые системы позиционирования могут иметь несколько ЦВ, выбор которых осуществляется оператором системы.

Современные системы позиционирования являются довольно сложным комплексом, основным контролирующим элементом которого является один или несколько компьютеров. В основном суда с системами позиционирования являются электроходами, т.к. электродвигатели более приспособлены для работы с часто изменяемыми большими нагрузками. В связи с этим, системы позиционирования очень чувствительны к ситуациям полного или частичного обесточивания, поэтому их силовые установки довольно сложны и предусматривают дублирование элементов.

В настоящее время системы позиционирования в основном используют следующие типы судов: танкера-челноки; буровые суда; суда, обеспечивающие водолазные операции; суда, обслуживающие нефтяные подводные скважины; суда для укладки подводных труб; суда для прокладки подводного кабеля; суда для укладки камней на морское дно; плавучие краны; земснаряды; различные вспомогательные суда; различные пассажирские и специальные грузовые суда; военные суда.

На рис. 1.52. изображены типичные варианты расположения подруливающих устройств на различных специализированных судах, снабженных системами активного позиционирования.

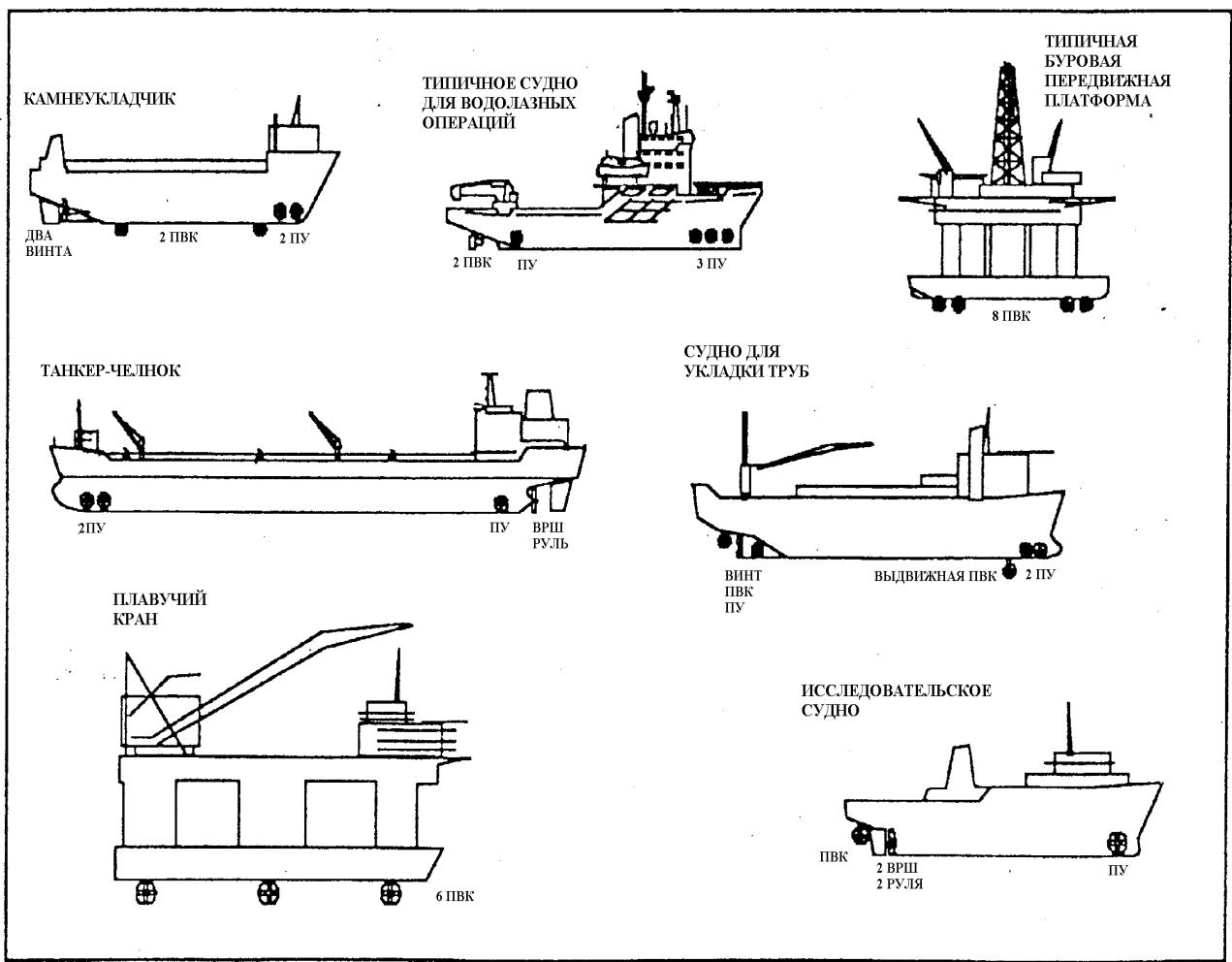


Рис.1.52. Типичное расположение СУ на судах с системой позиционирования

1.3. Маневренные характеристики судна

Для описания поведения судна, как объекта управления, используют совокупность параметров, которые позволяют судить о физических процессах, происходящих при изменении режима его движения, называют маневренными характеристиками. Их подразделяют на две основные группы: инерционно-тормозные и циркуляции (рис.1.53).

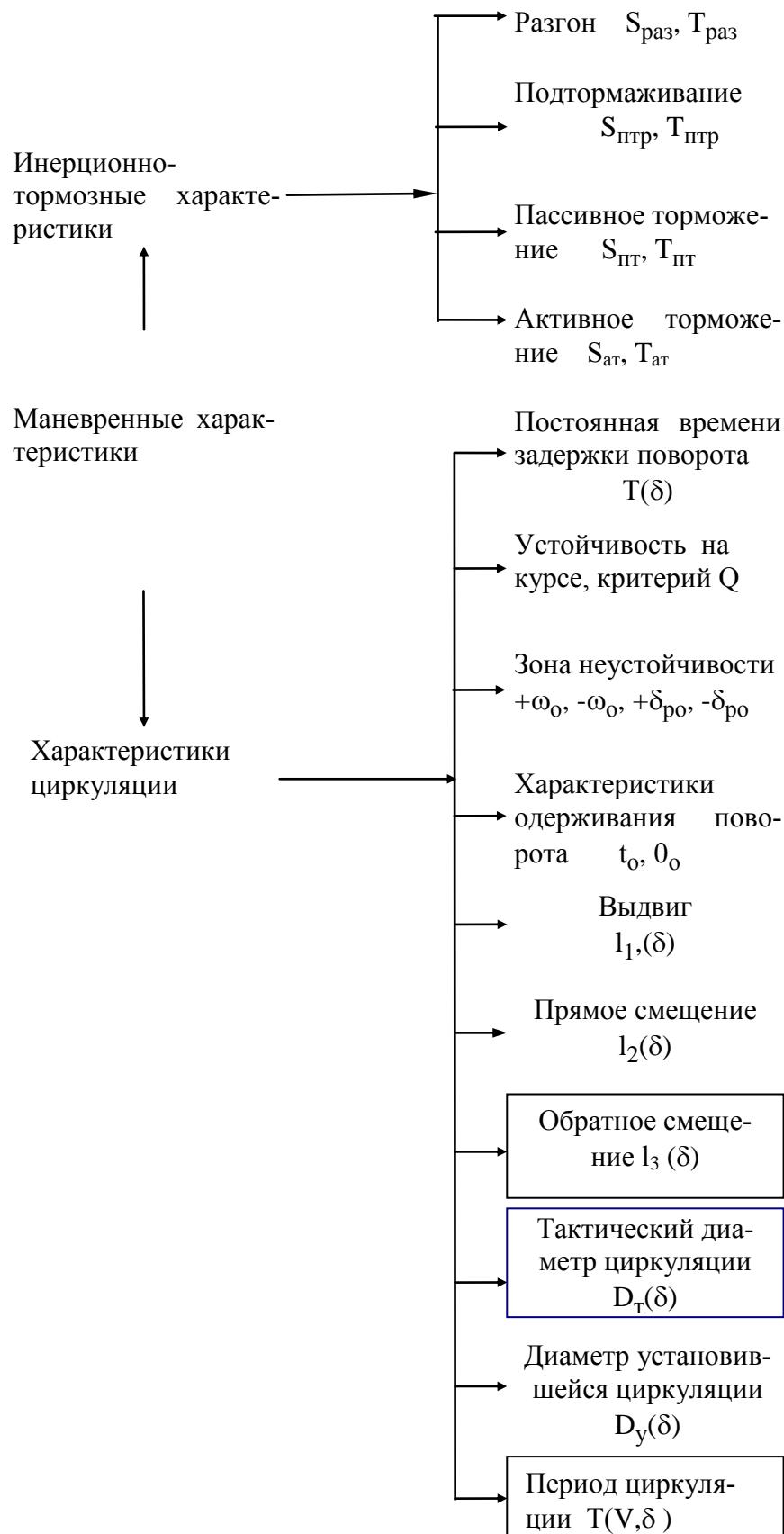


Рис.1.53. Классификация маневренных характеристик

К инерционно-тормозным характеристикам относятся: разгон, подтормаживание, пассивное и активное торможение.

Пассивное торможение представляет собой процесс уменьшения скорости движения судна при остановленном главном двигателе за счет сопротивления воды и воздуха.

Активное торможение представляет собой процесс уменьшения скорости движения за счет упора винта, работающего на задний ход.

Разгон представляет собой процесс увеличения скорости от меньшей ступени к большей.

Подтормаживание представляет собой процесс уменьшения скорости от большей ступени к меньшей.

Для характеристики режимов движения установлены градации числа оборотов и соответствующей им скорости переднего хода и числа оборотов заднего хода: передний полный ход (ПП); передний полный маневренный ход (ППм); передний средний ход (ПС); передний малый ход (ПМ); передний самый малый ход (ПСМ); задний полный ход (ЗП); задний средний ход (ЗС) ; задний малый ход (ЗМ) ; задний самый малый ход (ЗСМ).

Обычно промежуточные режимы задаются по отношению к числу оборотов и скорости полного переднего хода: $\text{ППм} \approx 0.9 \text{ ПП}$; $\text{ПС} \approx 0.7 \text{ ПП}$; $\text{ПМ} \approx 0.5 \text{ ПП}$; $\text{ПСМ} \approx 0.3 \text{ ПП}$. Аналогично для числа оборотов заднего хода: $\text{ЗС} \approx 0.7 \text{ ЗП}$; $\text{ЗМ} \approx 0.5 \text{ ЗП}$; $\text{ЗСМ} \approx 0.3 \text{ ЗП}$.

Необходимо отметить, что с возрастом на судах несколько уменьшают число оборотов полного хода, по сравнению с теми, которые приведены в судовых документах на момент постройки и считаются номинальными. У судов с ВРШ устанавливают условные деления на шкале ручки управления разворотом лопастей или телеграфа, которые обозначают установленные режимы движения судна. В связи с указанной особенностью при управлении режимом движения на таких судах команды подают не путем задания установленной градации скоростей, а назначают цифру, соответствующую указанному режиму. При этом рекомендуется сначала называть орган управления (руль, двигатель, подруливающее устройство), затем направление (вперед, назад, вправо или влево) и затем установленный режим. Например: "Руль вправо 10", "Машина вперед 5", "Подруливающее устройство вправо 3".

Независимо от вида тормозных характеристик (разгон, подтормаживание, пассивное или активное торможение) их значения могут быть представлены в виде графиков зависимости скорости $V(t)$ и пути $S(t)$ от времени, графиков зависимости значений времени $t(V)$ и пути $S(V)$ от скорости, линейных графиков в форме Международной морской организации (ИМО) или в виде таблиц конечных значений пути и времени для различных сочетаний режимов переднего и заднего ходов. В зависимости от способов определения, получения и представления маневренных характеристик различают (рис.1.54):

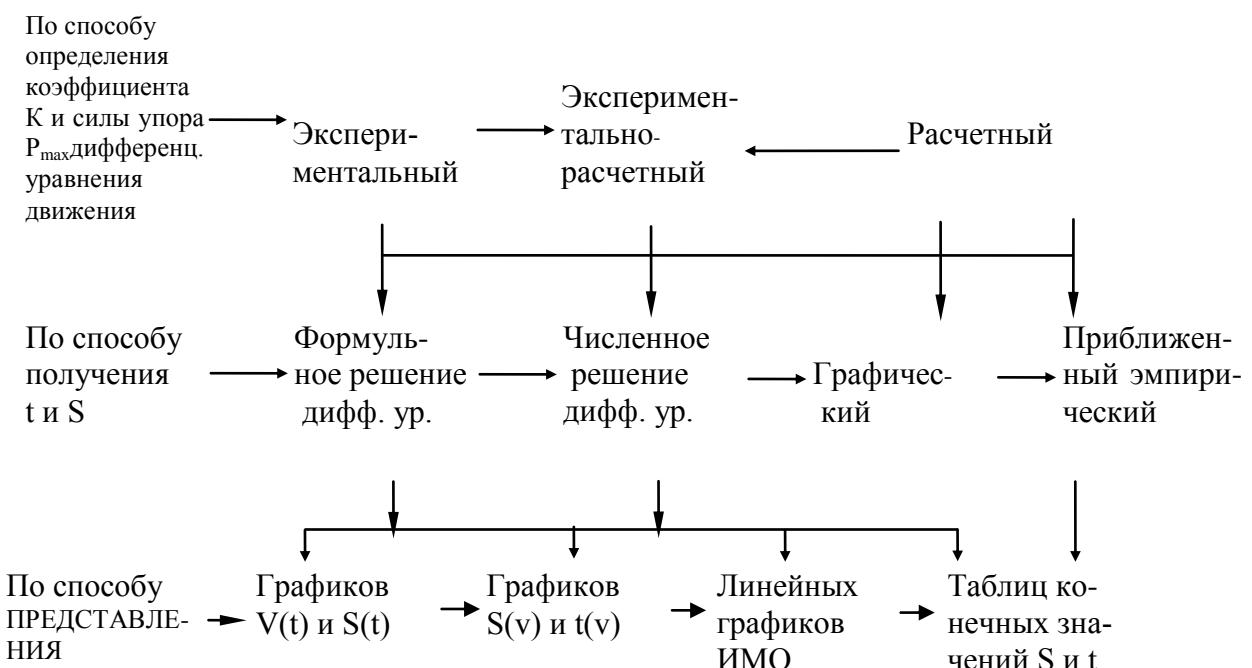


Рис.1.54. Классификация методов определения тормозных характеристик

В зависимости от способа определения значений коэффициента сопротивления K и максимальной силы упора винта P_{max} дифференциального уравнения движения судна различают: расчетный; экспериментальный; экспериментально-расчетный.

Необходимо особо отметить, что решение дифференциальных уравнений торможения будет одинаковым для всех способов определения, различие будет заключаться только в методе получения значений K и P_{max} , а также в принятом законе изменения их величин в процессе движения и торможения.

При расчетном методе значения K_{pac} и P_{max}^{pac} получают путем вычисления по эмпирическим формулам. Точность определения значений параметров по указанным зависимостям характеризуется стандартной относительной погрешностью достигающей 20%. Недостатком расчетного метода является низкая точность получаемых результатов расчетов значений пути и времени торможения.

Экспериментальный способ определения значений K_s и P_{max}^s заключается в получении их величин из специально организованных натурных наблюдений.

Значение K_s определяется из эксперимента “пассивное торможение”, который рекомендуется выполнять не менее трех раз. Пассивное торможение состоит из двух периодов: 1-й период - время прохождения команды, от момента ее подачи до прекращения подачи топлива (пара, электричества) на главный двигатель; 2-й период - от момента прекращения подачи топлива до момента, когда скорость упадет до значения 0.2 V_h или потери управляемости, что наступит раньше.

Порядок выполнения эксперимента следующий: дают команду “Стоп”, запускают секундомер, замечают начальную скорость по лагу V_0 , (если выполняются траекторные измерения то определяют место судна и отсчет лага) и ожидают прекращения подачи топлива (электричества, пара) на главный двигатель; после прохождения команды (оно обычно у ДВС занимает около 10 с., у ГЭУ около 5 с.) замечают скорость, которая обычно не успевает упасть и равна начальной V_0 , определяют место, записывают отсчет лага и ожидают падения скорости не менее чем наполовину до V_k , удерживая судно на первоначально выбранном курсе. В результате эксперимента получают значения времени t^l , t^{ll} и пути S^l и S^{ll} пассивного торможения по периодам и в целом:

$$t_{\text{пп}} = t^l + t^{ll}, S_{\text{пп}} = S^l + S^{ll}. \quad (1.3.)$$

Если траекторные измерения выполнены достаточно точно (со среднеквадратической погрешностью около 10 м), то определяют значения коэффициента K_s^l по времени пассивного торможения t^{ll} и по пройденному пути K_s^s , а результаты осредняют:

$$K_s = (K_s^l + K_s^s) / 2. \quad (1.4.)$$

Если эксперимент выполнялся несколько раз, то сначала осредняют значения K_s^l и K_s^s а затем получают значение K_s . Если же по результатам оценки точности траекторных измерений получено значение ошибки более 10 м, то значение K_s принимают равным K_s^l .

Значение K_s^l и K_s^s определяют по формулам, полученным из решения дифференциального уравнения пассивного торможения:

$$K_s^l = \frac{m}{V_0 t^{ll}} \left(\frac{V_0}{V_k} - 1 \right), \quad (1.5)$$

$$K_s^s = \frac{m}{S^{ll}} \ln \left(\frac{V_0}{V_k} \right), \quad (1.6.)$$

где m - масса судна с учетом присоединенной массы воды по оси X;

V_0 - начальная скорость, м/с;

V_k - конечная скорость, м/с.

Значение P_{max}^s определяют из эксперимента “активное торможение” задним полным ходом, который рекомендуется выполнять не менее трех раз. Порядок выполнения эксперимента следующий: дают команду ЗП и в момент прохождения стрелки тахометра через “нуль” пускают секундомер, замечают скорость V_h и отсчет лага и определяют место судна; в момент прекращения движения судна останавливают секундомер, определяют место судна и снимают отсчет лага и число оборотов винта. В результате эксперимента получают значение

ния числа оборотов при ЗП, время t^{\parallel} и путь S^{\parallel} активного торможения при начальной скорости V_n . Если позволяют условия проведения натурных наблюдений, то определение места судна рекомендуется производить через каждые 10-20 секунд. Используя метод последовательных приближений по полученным данным определяют значение P_{\max}^{ϑ} для режима ЗП, которое используется при решении дифференциального уравнения для определения пути и времени активного торможения при различных начальных скоростях.

Точность экспериментального способа определяется погрешностями траекторных измерений при натурных наблюдениях и обычно позволяет получить наиболее приемлемые для практики судовождения результаты. Его недостатком является невозможность получить данные, для всех возможных скоростей хода и водоизмещения из-за значительной трудоемкости выполняемых испытаний.

Суть экспериментально-расчетного способа определения тормозных характеристик заключается в том, что для значения водоизмещения при эксперименте определяют из натурных наблюдений и рассчитывают величины коэффициентов K_p и K_{pac} , а также силы упора P_{\max}^{ϑ} и P_{\max}^{pac} . По полученным значениям определяют переходные коэффициенты γ_k и γ_P :

$$\gamma_k = K_p / K_p; \text{ и } \gamma_P = P_{\max}^{\vartheta} / P_{\max}^{pac}. \quad (1.7.)$$

По значениям указанных коэффициентов для состояния при эксперименте уточняют расчетные значения K и P_{\max} для произвольного водоизмещения и режима работы главной силовой установки:

$$K_{sp} = K_{pac} \bullet \gamma_k; \quad P_{\max}^{\vartheta p} = P_{\max}^{pac} \bullet \gamma_P. \quad (1.8.)$$

Использование экспериментально-расчетного способа позволяет получать значение пути и времени торможения с погрешностью менее 10%.

Дифференциальное уравнение движения судна и его решение представляет собой математическую модель торможения. В зависимости от принятого характера изменения сопротивления движению и упора винта при его работе назад от скорости переднего хода различают три основные математические модели - линейная, ЦНИИМФа и ОВИМУ. Сравнительная характеристика указанных моделей приведена в табл.1.1. Из приведенных моделей наибольшей потенциальной точностью обладает модель ОВИМУ.

Таблица 1.1.

Сравнительная характеристика математических моделей

Математическая модель	Характер изменения параметров	
	Сопротивления	Упора
Линейная	$K \bullet V$	Постоянен
ЦНИИМФа	$K \bullet V^2$	Постоянен
ОВИМУ	$K \bullet V^2$	$P_e = P_{\max} \left(1 - \frac{V^2}{V_H^2} \right)$

К характеристикам поворотливости относятся (рис.6): постоянная времени задержки поворота $T(\delta)$; зона неустойчивости $\pm \omega_0$, $\pm \delta_{po}$; характеристики одерживания поворота $t_o(\delta)$, $\Theta_o(\delta)$; устойчивость на курсе, критерий Q ; выдвиг $l_1(\delta)$; прямое смещение $l_2(\delta)$; тактический диаметр циркуляции $D_t(\delta)$; диаметр установившейся циркуляции $D_y(\delta)$; период циркуляции $T_u(V, \delta)$.

В зависимости от способов определения, получения и представления характеристик поворотливости различают (рис.1.55): по способу определения -экспериментальный, расчетный, экспериментально-расчетный; по способу получения - аналитический и эмпирический; по способу представления данных- в виде графиков и таблиц отрезков, графиков и таблиц перпендикуляров, графиков кривых траекторий ЦГ при циркуляции, таблиц элементов циркуляции.

Экспериментальный способ определения характеристик поворотливости более трудоемок, по сравнению с определением характеристик торможения, поскольку требует более точных

способов траекторных измерений и значительной продолжительности по времени их выполнения.

Для получения данных о поворотливости судна предусматривают выполнение следующих маневров: циркуляция; спираль (прямая и обратная); симметричный зигзаг; несимметричный зигзаг.

Программа испытаний и ее объем зависят от того, какие данные о характеристиках поворотливости необходимо получить. Если необходимо получить полное представление о них, то значения скорости и углов перекладки руля определяется количеством характерных точек, которых достаточно для построения надежных зависимостей. Обычно подробный объем испытаний проводят для головных судов серии. Для последующих судов ограничиваются меньшим числом контрольных маневров, позволяющих судить о тождественности маневренных характеристик головного и типового судов.

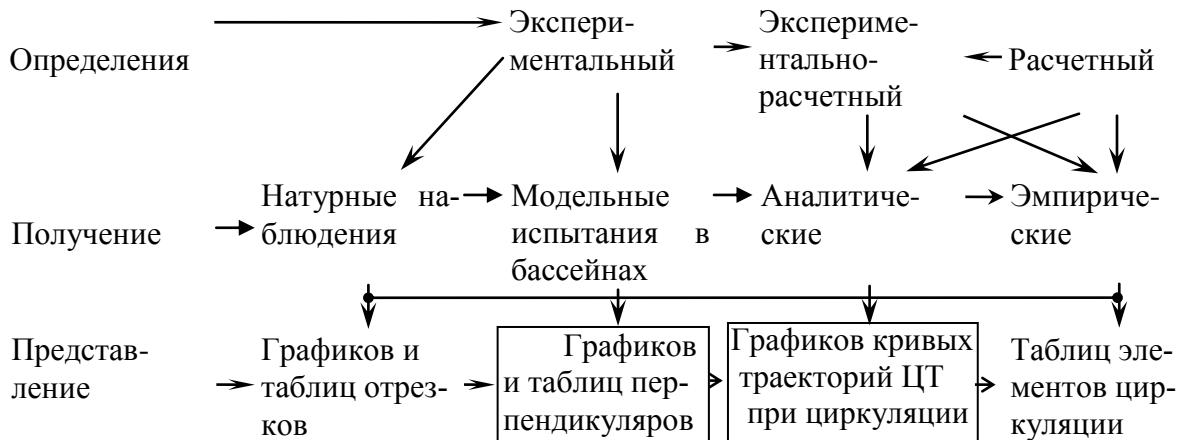


Рис.1.55. Классификация методов определения характеристик поворотливости

1.4. Силы и моменты, действующие на судно.

Морское судно представляет собой тело, перемещающееся на границе двух сред: воды и воздуха. Поэтому на судно действуют гидро и аэродинамические силы и моменты.

Если же рассматривать кильевую, бортовую и вертикальную качки судна, то его движение в горизонтальной плоскости описывается системой из трёх дифференциальных уравнений движения относительно трёх связанных с судном осей: по продольной оси X, по поперечной оси Y и вокруг вертикальной оси Z. Начало координат расположено в центре тяжести судна, принимаемом обычно на мидель-шпангоуте. Сказанное поясняется на рис.1.56.

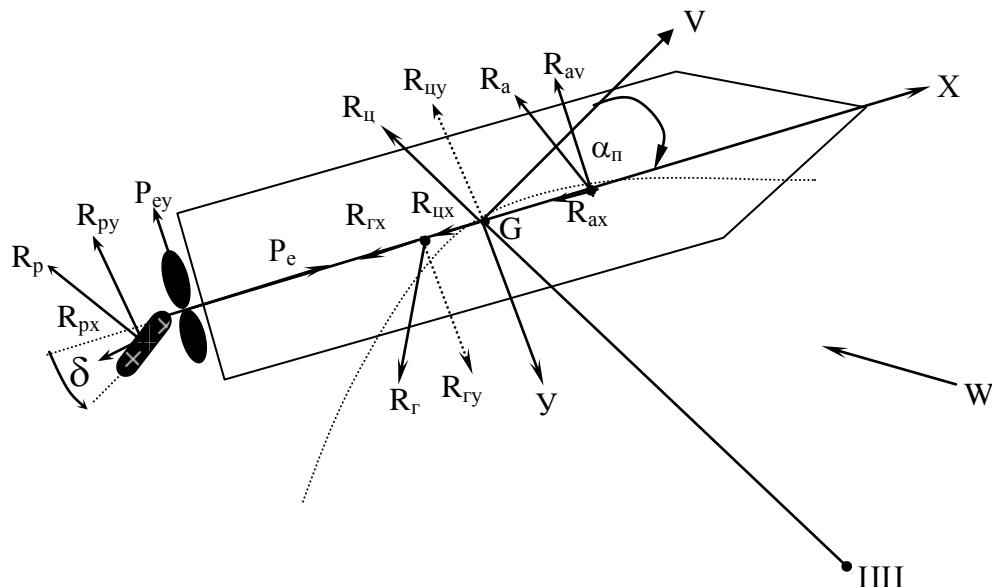


Рис.1.56.Силы действующие на судно при циркуляции

В связанной с судном системе координат дифференциальные уравнения, описывающие движение судна в горизонтальной плоскости при ветре имеют вид:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11}) \cdot \frac{dV_x}{dt} + (m + \lambda_{22}) \cdot V_y \cdot \omega \pm R_{ax} \pm R_{ex} \pm R_{px} \pm R_{uy} \pm P_e = 0 \\ (m + \lambda_{22}) \cdot \frac{dV_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot \omega \pm R_{ay} \pm R_{ey} \pm R_{py} \pm R_{uy} - P_{ey} = 0 \\ (I + \lambda_{66}) \cdot \frac{d\omega}{dt} - (\lambda_{11} - \lambda_{22}) \cdot V_x \cdot V_y \pm M_a \pm M_e \pm M_p - M_{bc} = 0 \end{aligned} \quad (1.9)$$

где P_e - сила упора винта;

P_{ey} - боковая сила винта и сила взаимодействия винта и корпуса судна,
 R_{rx} , R_{ax} , R_{uy} , R_{px} - продольные составляющие гидродинамической, аэродинамической, центробежной сил и силы на руле

R_{ry} , R_{ay} , R_{py} - поперечные составляющие тех же сил.

M_r , M_a , M_{bc} , M_p - моменты гидро и аэродинамической силы боковой силы винта и руля,
 $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{66}$ - присоединенная масса по оси X, Y и присоединенный момент инерции.

В первых двух уравнениях системы (1.9.) произведения масс на ускорения являются инерционными силами, приложенными к корпусу в центре тяжести и по этой причине они не создают момента относительно центра тяжести. Точно также в третьем уравнении произведение момента инерции на угловое ускорение является инерционным моментом относительно оси Z. При установившемся движении, когда линейные и угловые ускорения равны нулю, инерционные силы и моменты также равны нулю.

На приведённом рисунке(см.рис.1.56.) показан случай движения судна по криволинейной траектории с мгновенным значением радиуса циркуляции, равным R, с центром циркуляции в точке ЦЦ. Инерционные силы на рисунке не показаны.

Почти все силы и моменты, входящие в уравнения системы, выражаются сложными нелинейными зависимостями от поступательной и угловой скоростей и характеристик корпуса движителя и руля, поэтому данная система не может быть проинтегрирована в конечном виде при строгой постановке. Решение возможно только для частных случаев движения и при некоторых упрощающих допущениях. Тем не менее, эта система уравнений позволяет правильно понять и объяснить многие вопросы, связанные с маневрированием судов.

При расчете инерционно-тормозных характеристик используют первое уравнение системы (1.9), которое при прямолинейном движении в отсутствие ветра можно записать так:

$$m \frac{dV_x}{dt} \pm R_{ex} \pm R_{ax} \pm R_{px} \pm P_e = 0 \quad (1.10)$$

При решении уравнения (1.10) вводят ряд допущений, которые упрощают расчет пути и времени торможения с сохранением точности требуемой нормативными документами. Основные из допущений, которые будем использовать в дальнейшем следующие.

1. Присоединенная масса воды по оси X приближенно равна 10% от массы судна ($m_x = 1,1D$) и остается неизменной при маневрировании.
2. Зависимость сопротивления воды и воздуха от скорости носит квадратичный характер
3. Коэффициенты сопротивления воды К и воздуха K_v во время маневрирования постоянны.
4. Упор винта в процессе активного торможения изменяется по зависимости, полученной профессором Деминым С. И.

$$P_e = P_{max} \left(1 - \frac{V_x^2}{V_H^2} \right), \quad (1.11)$$

где P_{max} - значение силы упора винта в момент остановки; V_x - текущая скорость; V_H - скорость в момент начала вращения винта на задний ход.

5 При маневрировании новое назначенное число оборотов достигает своего значения в момент подачи команды(поскольку двигатель набирает обороты за 5-10 секунд).

Процесс пассивного торможения описывается дифференциальным уравнением:

$$m \cdot \frac{dV_x}{dt} + k \cdot V_x^2 = 0 \quad (1.12)$$

Он имеет два периода - прохождение команды t' от момента подачи команды "Стоп" до прекращения подачи топлива на главный двигатель (и обычно его принимают равным 10 с) и собственно пассивное торможение t'' - от начальной скорости V_0 до конечной скорости V_k , которую принимают равной 0.2 V_0 или скорости потери управляемости, что наступит раньше (см рис 1.57.) Решение уравнения (1.12) имеет вид:

$$\begin{aligned} t'' &= \frac{m_x}{kV_0} \left(\frac{V_0}{V_k} - 1 \right) \\ S'' &= \frac{m_x}{k} \ln \left(\frac{V_0}{V_k} \right) \end{aligned} \quad (1.13)$$

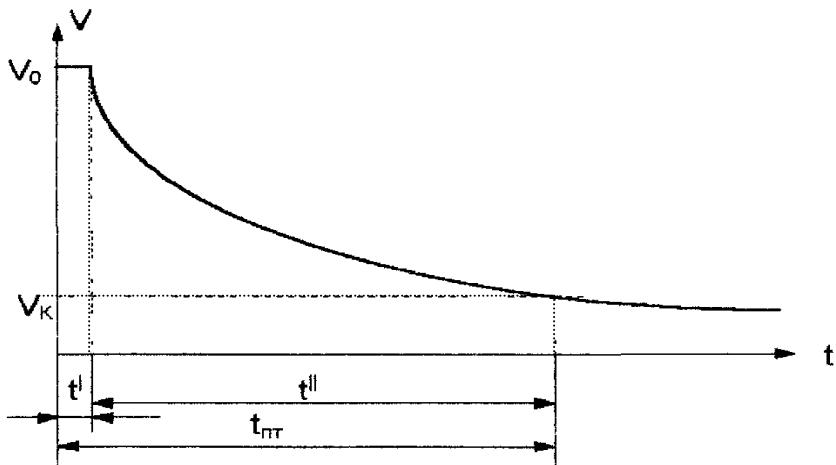


Рис.1.57. График изменения скорости при пассивном торможении
Время и путь пассивного торможения будут равны:

$$t_{PT} = t' + t'', S_{PT} = S' + S'' \quad (1.14)$$

Значение S' рассчитывается по формуле $S' = V_0 \cdot t'$. Информация о пассивном торможении используется при снижении скорости перед началом маневрирования, в случае отказа двигателя и как составная часть активного торможения.

Процесс **активного торможения** описывается дифференциальным уравнением:

$$m_x \cdot \frac{dV_x}{dt} + kV_x^2 + P_e = 0 \quad (1.15)$$

Обозначим коэффициент активности торможения $a = P_{max} / kV_h^2$, и с учетом характера изменения силы упора винта, в процессе активного торможения, описываемого формулой (1.11), уравнение (1.15) можно привести к виду, удобному для интегрирования:

$$\frac{m_x}{kV_h^2} \frac{dV_x}{dt} + \frac{1-a}{V_h^2} \cdot V_x^2 + a = 0 \quad (1.16)$$

Вид решения уравнения (1.16) зависит от значения коэффициента a .

Изменяющаяся по закону $P_e = P_{max} \left(1 - \frac{V_x^2}{V_h^2} \right)$ сила упора винта в сумме с силой сопротивления $R_x = kV_x^2$ может давать суммарную тормозящую силу как возрастающую при $a > 1$, так и снижающуюся при $a < 1$. При его значении равном нулю уравнение (1.16) приводится к уравнению (1.12) с соответствующим решением (1.13) и (1.14). При коэффициенте активности торможения $a = 1$ решение уравнения (1.16) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} t''' &= \frac{m_x}{kV_h^2} \left(1 - \frac{V_x}{V_h} \right) \\ S''' &= \frac{m_x}{2k} \left(1 - \frac{V_x^2}{V_h^2} \right) \end{aligned} \quad (1.17)$$

При коэффициенте $a < 1$ решения уравнения (1.16), с учетом обозначения $A_k = \sqrt{\frac{1}{a} - 1}$, будут иметь вид:

$$t''' = \frac{m_x}{k \cdot a \cdot V_h A_k} \left[\arctg(A_k) - \arctg\left(\frac{V_x A_k}{V_h}\right) \right] \quad (1.18)$$

$$S^{\parallel\parallel} = \frac{m_x}{2k(1-\alpha)} \ln \left[\frac{1}{(1-\alpha) \frac{V_x^2}{V_h^2} + \alpha} \right] \quad (1.19)$$

При коэффициенте $\alpha > 1$ решения уравнения (1.16), с учетом обозначения $B_k = \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha}}$ получим:

$$t^{\parallel\parallel} = \frac{m_x}{2 \cdot k \cdot \alpha \cdot V_h \cdot B_k} \ln \left[\frac{(1+B_k) \left(1 - \frac{V_x B_k}{V_h} \right)}{(1-B_k) \left(1 + \frac{V_x B_k}{V_h} \right)} \right] \quad (1.20)$$

$$S^{\parallel\parallel} = \frac{m_x}{2 \cdot k \cdot (1-\alpha)} \ln \left[\frac{1}{(1-\alpha) \frac{V_x^2}{V_h^2} + \alpha} \right]$$

В зависимости от соотношения скорости хода перед началом снижения V_o и скорости уверенного реверсирования V_p , (т.е. скорости при которой главный двигатель уверенно запускается на упор заднего хода), общее время и путь активного торможения будут рассчитываться различным образом (рис. 1.58).

. Время и путь активного торможения можно рассчитать по формулам:

$$t_{am} = t^{\parallel} + t^{\parallel\parallel} + t^{\parallel\parallel}, \quad S_{am} = S^{\parallel} + S^{\parallel\parallel} + S^{\parallel\parallel} \quad (1.21)$$

При $V_o > V_{рев}$ значение пути первого периода рассчитывают как обычно $S^{\parallel} = V_o \cdot t^{\parallel}$. Во время второго периода будет происходить пассивное торможение до тех пор, пока скорость не упадет до $V_{рев}$, а расчет пути можно произвести по формуле (1.12), подставляя $V_k = V_{рев}$.

При $V_o < V_{рев}$ расчет пути первого периода производится аналогично предыдущему случаю, а время второго периода определяется техническими характеристиками главного двигателя и равно времени запуска двигателя на задний ход. Для ДВС, согласно правил технической эксплуатации, оно равно $t^{\parallel\parallel} = 15$ секунд. С учетом этого путь второго периода рассчитывают по формуле $S^{\parallel\parallel} = V_o t^{\parallel\parallel}$.

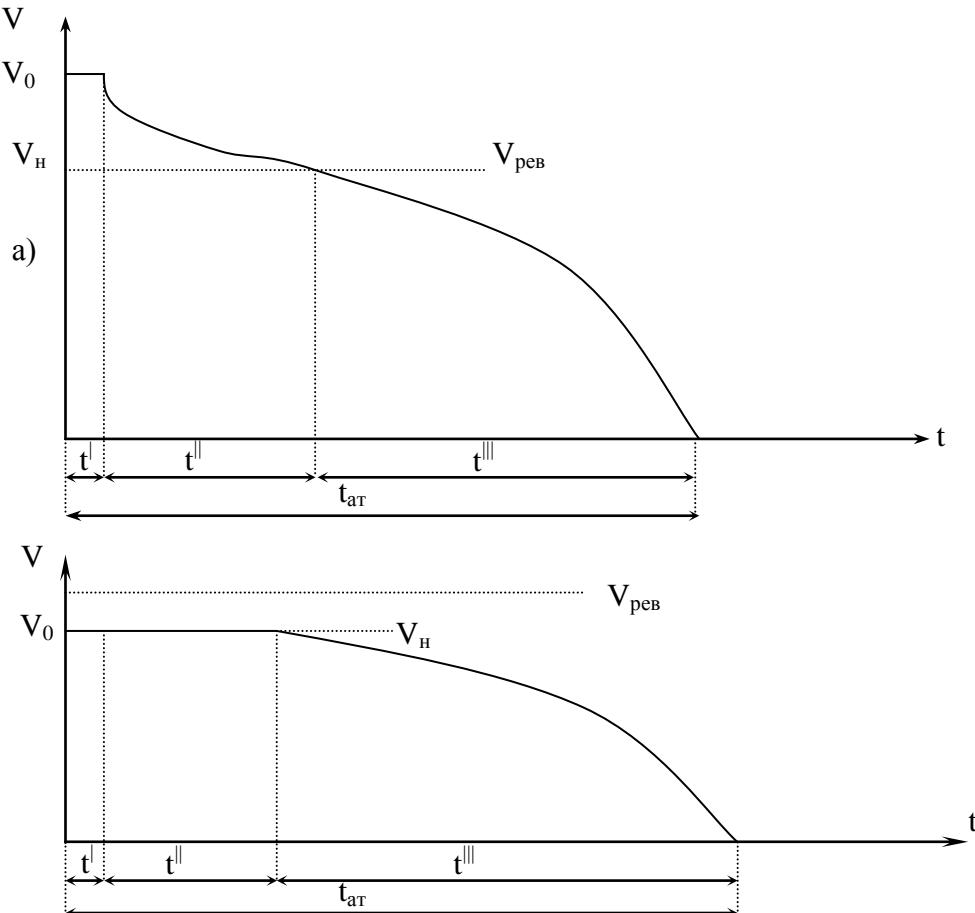


Рис. 1.58. Схема изменения скорости при активном торможении:

- а) при V_o большей, чем скорость уверенного реверсирования;
- в) при V_o меньше, чем скорость уверенного реверсирования.

Процесс разгона описывается дифференциальным уравнением:

$$m_x \frac{dV_x}{dt} + kV^2 - P_e = 0 \quad (1.22)$$

Для упрощения решения дифференциального уравнения (1.22) при переходных режимах необходимо ввести дополнительное допущение, что назначенная сила упора движителя устанавливается мгновенно, в момент подачи команды, и равна новому режиму движения. Такое допущение можно сделать потому, что переходные процессы в двигателях происходят значительно быстрее, чем изменение скорости

По окончании разгона, когда судно будет двигаться с установившейся скоростью $V_{уст}$ сила инерции равна нулю, и уравнение (1.22) принимает вид:

$$kV_{ycm}^2 = P_e. \quad (1.23)$$

Подставив (1.23) в (1.22) получим дифференциальное уравнение разгона:

$$m_x \frac{dV}{dt} + k(V_x^2 - V_{ycm}^2) = 0 \quad (1.24)$$

Вид решения уравнения (1.24) зависит от того, из какого начального состояния производится разгон - из неподвижного состояния или от меньшей скорости к большей. В первом случае после разделения переменных в уравнении (1.24) и интегрирования в пределах от 0 до V_x получим выражения для расчета пути и времени разгона:

$$\begin{aligned} t_{pзg} &= \frac{m_x}{2kV_{ycm}} \ln \frac{1+(V_x/V_{ycm})}{1-(V_x/V_{ycm})} \\ S_{pзg} &= \frac{m_x}{2k} \ln \frac{1}{1-(V_x/V_{ycm})} \end{aligned} \quad (1.25)$$

Полученные формулы (1.25) позволяют получить время и путь разгона судна из неподвижного состояния до заданной установившейся скорости. Однако процесс разгона длится достаточно долго (при $V_x \rightarrow V_{уст}$ $t_{pзg}$ и $S_{pзg}$ стремятся к бесконечности). Для того чтобы разрешить получающуюся неопределенность, будем считать процесс законченным, когда скорость движения V_x достигает 0.95 $V_{уст}$. Указанное допущение удовлетворяет практические потребности судовождения, поскольку точность определения места судна и показаний лага в совокупности лежат в указанных пределах. С учетом этого допущения формулы (1.25) для расчета конечных значений пути и времени разгона, упрощаются и принимают вид:

$$\begin{aligned} t_{pзg} &= 1.832 \cdot m_x / k / V_{ycm}, \\ S_{pзg} &= 1.164 \cdot m_x / k. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Процесс разгона от произвольной скорости V_1 до значения $V_{уст}$ описывается дифференциальным уравнением (1.22), с пределами интегрирования от V_1 до $V_{уст}$. Тогда формулы для расчета пути и времени разгона принимают вид:

$$\begin{aligned} t_{pзg} &= \frac{m_x}{2kV_{ycm}} \ln \frac{(V_{ycm}+V_x)(V_{ycm}-V_1)}{(V_{ycm}-V_x)(V_{ycm}-V_1)} \\ S_{pзg} &= \frac{m_x}{2k} \ln \frac{1-(V_1/V_{ycm})^2}{1-(V_x/V_{ycm})^2} \end{aligned} \quad (1.27)$$

С учетом того, что процесс разгона от скорости V_1 до $V_{уст}$ также длится продолжительное время, выражения для расчета конечного пути и времени разгона упрощаются и принимают вид:

$$\begin{aligned} t_{pзg} &= \frac{m_x}{2kV_{ycm}} \ln \frac{39(1-V_1/V_{ycm})}{1+V_1/V_{ycm}}, \\ S_{pзg} &= \frac{m_x}{2k} \ln \left\{ 10.26 \left[1 - (V_1/V_{ycm})^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.28)$$

Укажем еще на одну особенность процесса разгона. При нагрузке двигателя от ППм до ПП (или, как еще принято называть в практике судовождения морского хода, - Sea speed) процесс продолжается весьма долго и время его выполнения является технической характеристикой двигателя судна. В зависимости от типа двигателя он длится от 25 до 45 мин. Поэтому при подсчете пути разгона скорость можно считать линейно нарастающей от ППм до ПП, а путь рассчитать по средней ее величине.

Процесс изменения скорости за счет уменьшения числа оборотов главного двигателя

или силы упора движителя получил название **подтормаживание**. При этом процесс движения судна описывается дифференциальным уравнением (1.22), с интегрированием от текущей скорости V_1 до V_{yest} в результате получим формулы для расчета времени t_{nmp} и пути S_{nmp} подтормаживания:

$$t_{nmp} = \frac{m_x}{2kV_{ycm}} \ln \frac{(V_x + V_{ycm})(V_1 - V_{ycm})}{(V_x - V_{ycm})(V_1 + V_{ycm})},$$

$$S_{nmp} = \frac{m_x}{2k} \ln \frac{(V_1/V_{ycm})^2 - 1}{(V_x/V_{ycm})^2 - 1}. \quad (1.29)$$

Учитывая, что процесс подтормаживания длится продолжительное время, его можно считать законченным когда значение текущей скорости V_x равно 1.05 V_{yest} . Подставив его значение в формулы (1.29) получим формулы для расчета конечных значений пути и времени подтормаживания:

$$t_{nmp} = \frac{m_x}{2kV_{ycm}} \ln \frac{41[(V_1/V_{ycm}) - 1]}{(V_1/V_{ycm}) + 1}$$

$$S_{nmp} = \frac{m_x}{2k} \ln \{9.756[(V_1/V_{ycm})^2 - 1]\} \quad (1.30)$$

При расчете времени подтормаживания из ходового режима необходимо учитывать время перевода главной силовой установки в маневренный режим. По приведенным формулам можно рассчитать время и путь, проходимый судном за период подтормаживания от ППм до ПСМ.

1.5. Формы представления данных о тормозных характеристиках.

Наиболее полное представление об инерционно-тормозных качествах судна дают значения пути и времени торможения при состоянии в грузу и в балласте для всех возможных сочетаний режимов переднего и заднего ходов. Такими сочетаниями будут:

ПП - ЗП,	ППм - ЗП,	ПС - ЗП,	ПМ - ЗП,	ПСМ - ЗП.
ПП - ЗС,	ППм - ЗС,	ПС - ЗС,	ПМ - ЗС,	ПСМ - ЗС.
ПП - ЗМ,	ППм - ЗМ,	ПС - ЗМ,	ПМ - ЗМ,	ПСМ - ЗМ.
ПП - ЗСМ,	ППм - ЗСМ,	ПС - ЗСМ,	ПМ - ЗСМ,	ПСМ - ЗСМ.
ПП - ППм,	ПП - ПС,	ПП - ПМ,	ПП - ПСМ,	ППм - ПС.
ППм - ПМ,	ППм - ПСМ,	ПС - ПМ,	ПС - ПСМ,	ПМ - ПСМ.
Стоп - ПСМ,	Стоп - ПМ,	Стоп - ПС,	Стоп - ППм,	Стоп - ПП.
ПСМ - ПМ,	ПСМ - ПС,	ПСМ - ППм,	ПСМ - ПП,	ПМ - ПС.
ПМ - ППм,	ПМ - ПП,	ПС - ППм,	ПС - ПП,	ППм - ПП.

Таким образом, как видно из приведенного перечня, все возможные случаи использования сочетаний режимов переднего и заднего ходов будут описывать 50 значений пути и такое же количество времени, а с учетом двух состояний - в грузу и в балласте, всего 200.

Столь большое количество характеристик, которые необходимо не только знать, но и учитывать при маневрировании, представляет собой большие трудности для судоводителя. По этой причине представляется чрезвычайно важным определить, в каком виде должны быть приведены данные, чтобы судоводитель мог использовать при работе на мостике. Другим важным вопросом является методика их учета при маневрировании. Обоснованные ответы на поставленные вопросы можно получить только после рассмотрения всех возможных способов представления данных и анализа достоинств и недостатков каждого из них. На основании такого анализа можно определить, какой вид представления и для каких целей необходимо использовать.

По способу представления характеристик различают :- в виде графиков зависимости V и

S от времени; - в виде линейных графиков ИМО; - в виде графиков зависимости S и t от скорости переднего хода; - в виде таблиц конечных значений времени и пути.

Графики зависимости $V(t)$ и $S(t)$ (рис.1.59) достаточно подробно описывают процесс маневрирования, однако их требуется большое количество для полной характеристики динамики судна, как объекта управления (около 18 листов по 5 характеристик на каждом). Выборка данных о t и S торможения на мостике практически исключена, поскольку сам процесс их получения занимает достаточно много времени, которое соизмеримо со временем маневрирования и необходимые данные запаздывают к моменту принятия решения. Поэтому такой вид представления рекомендуется при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе в морских учебных заведениях.

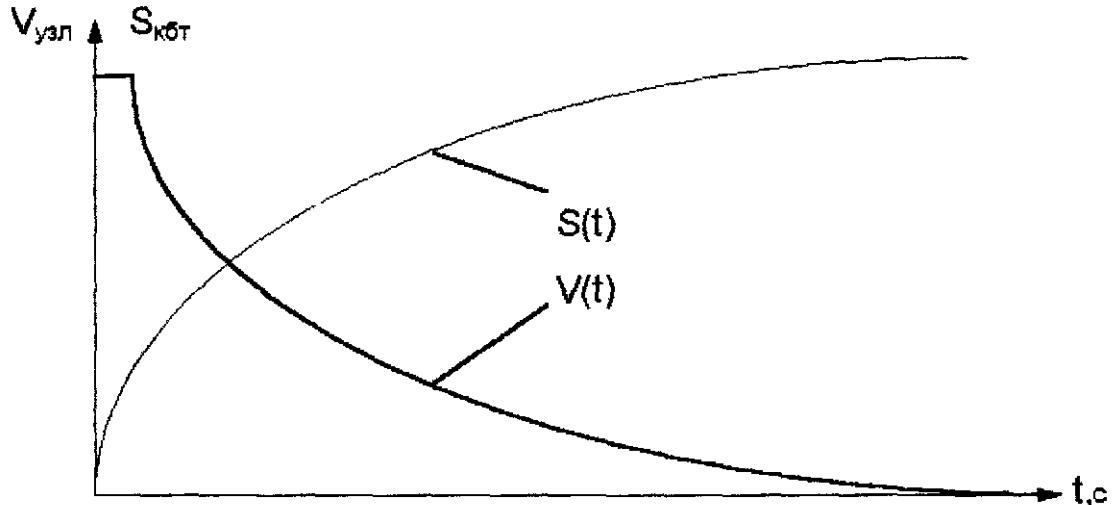


Рис. 1.59 График зависимости скорости и пути от времени для режима ППм - ЗС

Линейные графики ИМО (рис.1.60) обладают той же информативностью, что и $V(t)$ и $S(t)$. Однако они неудобны в работе из-за трудности интерполяции при выборке t и V на нелинейной шкале. Кроме того, они громоздки, требуется 5 листов по 20 характеристик на каждом. Несмотря на то, что они рекомендованы ИМО и требуется их наличие на судне, трудоемкость процесса выборки и большое их количество, отсутствие данных для используемых режимов, по-видимому, делают нецелесообразным, а иногда и невозможным, их использование на мостике.

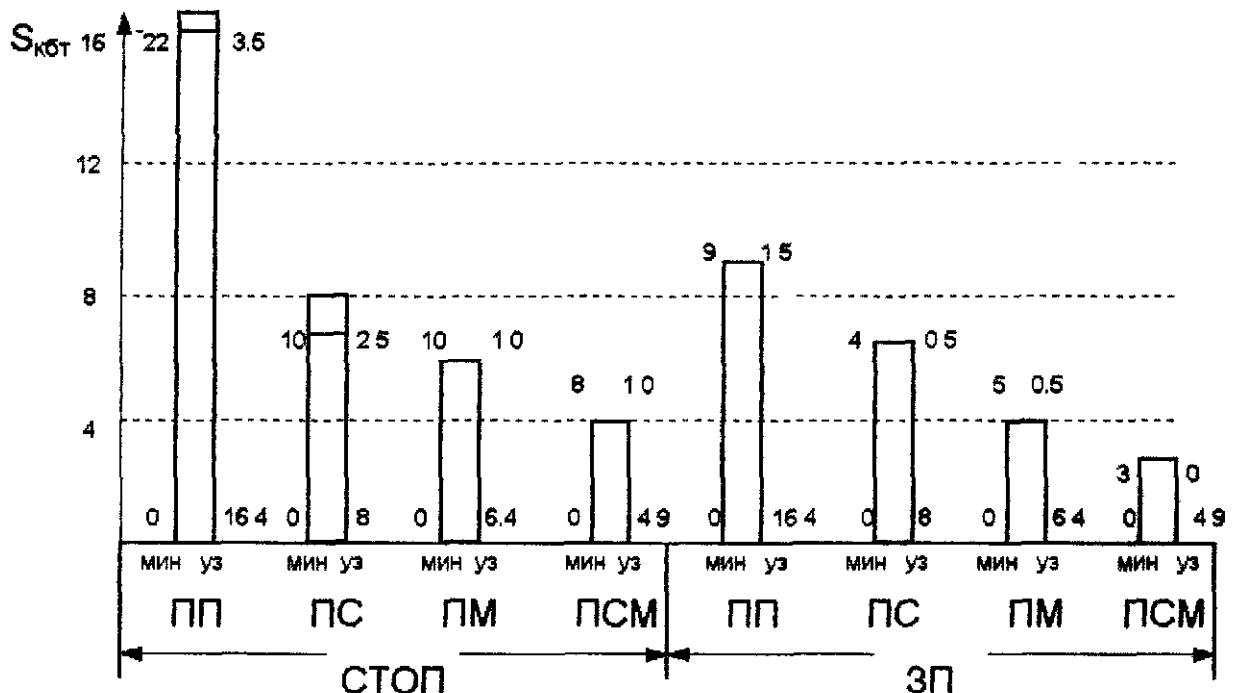


Рис. 1.60 Фрагмент линейных графиков в форме ИМО в грузу

Графиков зависимости времени и пути от начальной скорости при различных режимах работы машины на задний ход (рис. 1.61), требуется 6 листов по 8 характеристик на каждом. Они

удобны для выбора при назначении безопасной скорости, не требуется градация скоростей переднего хода. Достаточно подробны, однако выборка данных на мостике затруднена, из-за необходимости интерполяции. Рекомендуется для использования в ЭВМ при проведении научных исследований, при выполнении дипломных и курсовых работ в морском учебном заведении.

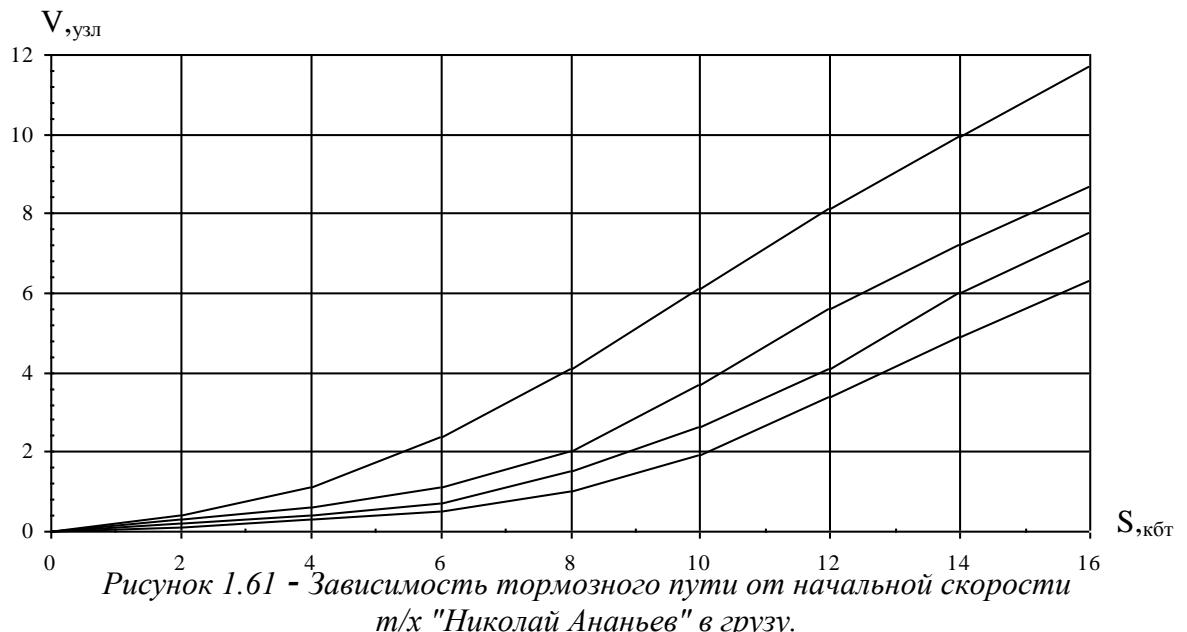


Рисунок 1.61 - Зависимость тормозного пути от начальной скорости т/х "Николай Ананьев" в грузу.

Таблицы характеристик торможения конечных значений времени и пути для состояний в грузу и в балласте для всех режимов помещаются на одной странице, а выборка данных занимает мало времени (см.табл.1.2.).

Таблица 1.2 - Инерционно-тормозные характеристики т/х "Харитон Греку"

Режим переднего хода в балласте $T_{\text{ср}}=8.05$ м, $D=41770$ т.										
ПСМ		ПМ		ПС		ППм		ПП		Режим 3Х
t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	
28.7	16.9	31.7	21.0	33.8	24.9	34.0	25.5	34.7	27.0	Стоп
5.6	4.1	6.3	5.7	7.4	8.2	7.6	8.7	8.2	10.3	ЗП
7.8	5.3	8.7	7.25	9.8	9.9	10.1	10.4	10.7	12.0	ЗС
12.1	7.3	13.3	9.7	14.5	12.55	14.7	13.1	15.4	14.6	ЗМ
19.0	9.95	20.5	12.85	21.8	15.9	22.1	16.4	22.7	17.95	ЗСМ

Режим переднего хода в грузу $T_{\text{ср}}=12.33$ м, $D=66000$ т.										
ПСМ		ПМ		ПС		ППм		ПП		Режим 3Х
t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	t,мин	S,кбт	
43.9	24.8	49.6	32.1	53.5	39.0	53.5	39.0	55.0	42.35	Стоп
6.7	4.65	7.8	7.0	9.5	10.85	9.5	10.85	10.9	14.2	ЗП
9.5	6.2	10.9	9.05	12.7	13.25	12.7	13.25	14.2	16.6	ЗС
15.1	8.8	16.9	12.5	18.9	17.15	18.9	17.2	20.4	20.5	ЗМ
24.00	12.5	26.4	17.0	28.7	22.15	28.7	22.15	30.2	25.5	ЗСМ

Рекомендуется для использования на мостике и в ЭВМ, при планировании маневров судна.

Из представленных в табл. 1.2. данных характеристик только 20 имеются в настоящее время на судне. Сложилась парадоксальная ситуация, когда на судне имеются характеристики, которые не должны использоваться в нормальных условиях, а тех, которые необходимы для планирования маневров, нет.

Для получения полных данных о динамике судна необходимо дополнить программу сдаточных испытаний, введением в перечень выполняемых маневров - разгон из неподвижного состояния, подтормаживание и торможение ЗС и ЗМ. Результаты определений и расчетов целесообразно свести в одну книгу "Информация о маневренных характеристиках

для капитана". Характеристики пассивного и активного торможения, разгона и подтормаживания можно представить в виде рекомендуемом ИМО и в виде таблиц, которые рекомендуется поместить в штурманской рубке, для оперативного получения сведений, при необходимости планирования маневров.

В соответствии с рекомендациями ИМО каждое судно должно быть обеспечено информацией о маневренных элементах. Наставлением по организации штурманской службы на судах Украины (РШСУ-98) предусмотрен минимум сведений, включаемых в информацию о маневренных элементах, а также указана форма их представления.

Поворотливость судна представляется в Информации в виде вычерченных в масштабе траекторий движения судна (циркуляций) при перекладке руля на борт и на 15^0 вправо и влево. На траекториях указываются точки, соответствующие определённым изменениям курса с начала циркуляции: в первой четверти циркуляции - через 10^0 , во второй – через 30^0 , и далее – через 90^0 .

По инерционно-тормозным характеристикам в Информацию включаются сведения о свободном торможении и торможении полным задним ходом соответственно с полного, полного маневренного, среднего, малого и самого малого передних ходов. Эти сведения для каждого манёвра даются в виде линейного вертикального графика, длина которого в принятом масштабе выражает тормозной путь. Кроме того, на графиках через каждую минуту времени от начала торможения делаются засечки, против которых указывается скорость судна в данной точке. В начале графика, внизу, указывается начальная скорость для данного манёвра.

Графики активного торможения строятся до полной остановки судна, а для пассивного - до скорости, составляющей 20% от скорости полного хода судна. Элементы поворотливости и торможения повторяются для двух состояний судна - в грузу и в балласте.

В Информацию включаются также элементы ходкости в виде таблиц и графиков зависимости скорости судна от оборотов винта в грузу и в балласте.

Маневренные элементы могут определяться любыми натуральными или натурально-расчётыми методами, обеспечивающими точность конечных результатов не хуже $\pm 10\%$ от измеряемой величины. Натуральные наблюдения допускается проводить при ветре до 4 баллов и волнении до 3 баллов.

Для приближенного определения характеристик активного торможения автором совместно с Интабли Мухаммедом было предложено рассчитывать их по значению коэффициента энерговооруженности:

$$K_{\text{ен}} = 0.8 \cdot N_e / D \quad (1.31)$$

где 0,8 - коэффициент, учитывающий использование главной машины в маневренном режиме при работе на задний ход; N_e - мощность главного двигателя; D - водоизмещение судна.

Как следует из самой сути введенного коэффициента между величиной тормозного пути S и $K_{\text{ен}}$ существует функциональная зависимость в виде гиперболы:

$$S = K_0 + K_s / K_{\text{ен}} \quad (1.32)$$

Выполнив исследования зависимости тормозного пути от $K_{\text{ен}}$ на ММ маневрирования Pilot, разработанной профессором Деминым С.И., для тринадцати типов судов - "Харитон Греку", "Капитан Темкин", "Профессор Аничков" и др. для состояния в грузу и в балласте, при различных значениях начальных скоростей и режимов работы назад автором и Интабли Мухаммедом были получены зависимости $S(K_{\text{ен}})$. После проведения регрессионного анализа были рассчитаны выражения для определения S (в длинах корпуса судна) по значению $K_{\text{ен}}$:

$$\text{При } V_h = 2 \text{ узла} \quad \bar{S} = 0.151 + 0.159 / K_{\text{ен}} \quad (1.33)$$

$$\text{При } V_h = 4 \text{ узла} \quad \bar{S} = 0.316 + 0.380 / K_{\text{ен}} \quad (1.34)$$

$$\text{При } V_h = 6 \text{ узлов} \quad \bar{S} = 0.276 + 0.649 / K_{\text{ен}} \quad (1.35)$$

Функциональная зависимость тормозного пути в длинах корпуса судна может быть представлена в виде, учитывающем и начальную скорость:

$$\bar{S} = 0.309 + 8.721 \frac{Fr}{K_{\text{ен}}}, \quad (1.36)$$

где Fr – число Фруда равное V/\sqrt{gL} .

Приведенная зависимость (1.36) может быть использована на любом морском судне для оценки величины тормозного пути при лоцманской проводке и плавании в стесненных условиях для глазомерной оценки обстановки.

1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАНЕВРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.

Организация натурных наблюдений. Натурные методы определения маневренных элементов, способные обеспечить достаточно высокую точность, основаны, как правило, на последовательных определениях места судна по каким-либо ориентирам в процессе выполнения заданных манёвров. Обсервации при этом выполняются через короткие промежутки времени. Моменты времени при каждой обсервации фиксируются попущеному в начале манёвра секундомеру. После окончания наблюдений обсервованные точки наносят на карту крупного масштаба или на планшет. Соединяя точки плавной кривой, получают траекторию движения судна в процессе манёвра. Такая траектория позволяет непосредственно измерить в принятом масштабе нужные элементы маневрирования, а замеченные по секундомеру моменты дают возможность получить соответствующие временные промежутки.

Достоинствами такого метода являются наглядность и возможность обнаружения промаха, если таковой допущен в отдельных обсервациях. Использование береговых ориентиров для обсервации визуальными способами связано с неудобствами из-за необходимости маневрирования вблизи берега, на котором расположены ориентиры, так как на больших расстояниях точность обсерваций визуальными способами снижается. Кроме того, глубины в районе маневрирования должны быть достаточно большими, чтобы исключить влияние мелководья, а сам район не должен находиться на путях движения других судов. Выполнение перечисленных условий затрудняет выбор подходящего полигона.

В последнее время у нас и за рубежом маневренные элементы иногда определяют с использованием фазовой РНС "Декка", способную обеспечить удовлетворительную точность обсерваций и в то же время позволяющую выполнять наблюдения в удалении от берегов и оживлённых судоходных путей. Общим недостатком использования неподвижных ориентиров, включая РНС "Декка", является тот факт, что если в районе наблюдений имеется неизвестное течение, то результаты измерений окажутся искажёнными под его влиянием.

С внедрением спутниковых систем в практику судовождения появилась возможность высокоточного определения траектории с использованием дифференциального режима. Точность такого способа достигает 3-5 метров. Однако, как и в случае с РНС, результаты измерений окажутся искажёнными под влиянием неизвестного судоводителю течения.

Лишёнными перечисленных недостатков являются способы определения маневренных элементов по свободно плавающему ориентиру, в качестве которого можно использовать изготовленную на судне вешку, плотик или другой предмет, сброшенный для этой цели с борта судна.

Такие определения можно выполнять в открытом море, вдали от навигационных опасностей, выбрав для этого благоприятную погоду. Кроме того, на результаты определений по свободно плавающему ориентиру течение не влияет, так как оно одинаково сносит как судно, так и ориентир, не изменяя их взаимного расположения.

Обсервации выполняются по пеленгу и дистанции, которые затем прокладываются на планшете в принятом масштабе относительно произвольно отмеченного положения ориентира.

Пеленга на ориентир можно взять достаточно точно с помощью оптического пеленгатора гирокомпаса, а дистанцию измерить с помощью судовой РЛС или по углу снижения, измеренному секстантом.

При наблюдениях с помощью РЛС в качестве плавающего ориентира нужен предмет, хорошо отражающий радиоволны. Этому требованию удовлетворяют буй или веха, снабжённые радиолокационным пассивным отражателем. Такую веху несложно изготовить на судне. Можно также использовать рабочий плотик. Вместо отражателя можно применить несколько жестяных банок из-под краски и т.п. На ориентире следует установить флаг, который был бы хорошо различим на фоне моря, например, оранжевого цвета.

На мостике кроме руководителя испытаний должны находиться три наблюдателя: у РЛС, у пеленгатора, у тахометра, а также регистратор с секундомером и заранее приготовленными бланками для записи наблюдений.

В процессе выполнения манёвров через короткие промежутки времени, например 20-30 с. берут пеленга плавающего ориентира и одновременно измеряют расстояние до него с помощью РЛС, а также замечают при этом обороты винта, и иногда, скорость по лагу.

Все измерения должны выполняться одновременно по команде руководителя, после чего в заранее установленной последовательности сообщать отсчёты регистратору который в момент команды замечает и записывает отсчёт по секундомеру, а затем вносит в бланк сообщаемые наблюдателями величины. Рулевой должен замечать и сообщать регистратору курс судна на момент команды. Секундомер пускается заранее или в момент начала манёвра.

Целесообразно первые измерения выполнять до начала данного манёвра с тем, чтобы наблюдатели успели освоиться.

В зависимости от того, какой манёвр выполняется, нужно фиксировать моменты отдельных событий, характеризующих данный манёвр. Так, например, при выполнении торможения с помощью реверса двигателя началом манёвра считается момент дачи команды по машинному телеграфу. Затем нужно зафиксировать момент начала снижения оборотов двигателя, момент начала вращения винта назад, а также момент полной остановки судна относительно воды, т.е. конец манёвра.

При выполнении манёвра на циркуляции судна началом считается момент подачи команды о перекладке руля. Затем нужно зафиксировать момент, когда перо руля будет переложено на заданный угол, а также моменты изменения курса на 90, 180, 270 и 360° (Если изменения выполняются довольно часто, то эти моменты можно определить опытным путём интерполяции при последующей обработке наблюдений). Во время наблюдений следует также отметить с какого крыла мостика-правого или левого берутся пеленги, чтобы затем при прокладке можно было приблизительно учесть поправку за полуширину судна. Измеряемые дистанции соответствуют расстояниям от ориентира до антенны РЛС.

По выполненным измерениям на листе миллиметровой бумаги в масштабе наносят положения судна относительно ориентира. Если мостик судна смешён относительно мидель-шпангоута, то это нужно учесть при прокладке, чтобы получить траекторию центра тяжести судна, принимаемой на мидель-шпангоуте. Ниже в таблице 1.3, в качестве примера, приводится форма бланка для записи измерений.

Таблица 1.3

Форма бланка для записи результатов наблюдений

Номера измерений	Момент по секундомеру, мин.сек.	ГКК град.	ГКП град.	D кбт.	n об/мин	V узл.	Примечание
------------------	---------------------------------	-----------	-----------	--------	----------	--------	------------

С полученной на планшете траектории снимают в принятом масштабе требуемые элементы маневрирования.

Точность определения места судна во время манёвра зависит от точности измерения двух навигационных параметров- пеленга и дистанции. При этом очень важно, чтобы плавающий ориентир хорошо отражал радиоволны и давал чёткую отметку на экране РЛС. Как показывают результаты натурных испытаний, при благоприятных условиях наблюдений и опытном операторе у РЛС может быть достигнута точность обсерваций порядка 8-15 м на расстояниях от ориентира до одной мили.

При этом следует учитывать, что на совсем малых расстояниях (менее 2-3 кбт) радиолокационные дистанции могут содержать систематическую ошибку, связанную с нелинейностью развёртки вблизи центра экрана РЛС. Это приводит к тому, что измеренные дистанции оказываются меньше действительных, причём с уменьшением дистанции ошибка возрастает.

При наблюдениях по углу снижения способ основан на определении дистанции до плавающего ориентира по измеренному секстантом вертикальному углу снижения. Этот угол х является разностью между углом наклонения зрительного луча Δ и углом наклонения горизонта d , что показано на рис.1.62.

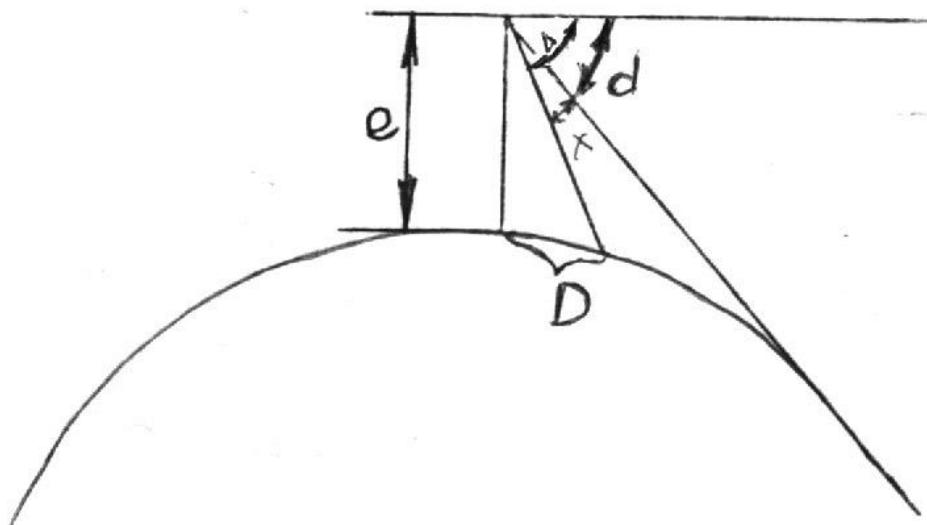


Рис.1.62. Определение расстояния по углу снижения плавающего ориентира
Из мореходной астрономии известна формула для угла наклонения зрительного луча:

$$\Delta = 0.042D + 18.56 \frac{e}{D} \quad (1.37.)$$

где D -дистанция, кбт;

e -высота глаза, м;

Δ -наклонение зрительного луча, дуговые минуты.

Разрешение этой формулы относительно D даёт:

$$D = \frac{\Delta - \sqrt{(\Delta)^2 - 3.118e}}{0.084}$$

или с учётом значения Δ из формулы(1.37):

$$D = \frac{x + d - \sqrt{(x + d)^2 - 3.118e}}{0.084} \quad (1.38.)$$

Расчёт расстояний непосредственно по формуле (1.38.) при использовании ЭКВМ особых затруднений не вызывает, но требует значительной затраты времени. С целью экономии времени построена специальная номограмма, приведённая на рис.1.63., с которой по высоте глаза и измеренному углу снижения снимается расстояние до ориентира в кабельтовых.

Измеренный секстантом угол нужно исправить поправкой индекса. Высоту глаза следует измерять рулеткой с точностью до 0.1м.

При построении номограммы принимались табличные значения наклонения горизонта. Как известно, фактическое значение наклонения иногда может отличаться от табличного. Поэтому, для повышения точности измерения дистанций рекомендуется тщательно измерить наклонение горизонта с помощью наклонометра, а затем из табл.11-а МТ-75 по измеренному наклонению горизонта(если оно отличается от табличного) обратным входом выбрать табличное значение высоты глаза. После этого в номограмму следует входить не с фактической высотой глаза, а с табличным значением высоты, полученным, как указано выше.

Порядок и организация проведения натурных наблюдений в принципе остаются такими же, как и при использовании РЛС. Разница состоит лишь в том, что вместо наблюдателя у РЛС участвует наблюдатель с секстантом, измеряющий углы снижения.

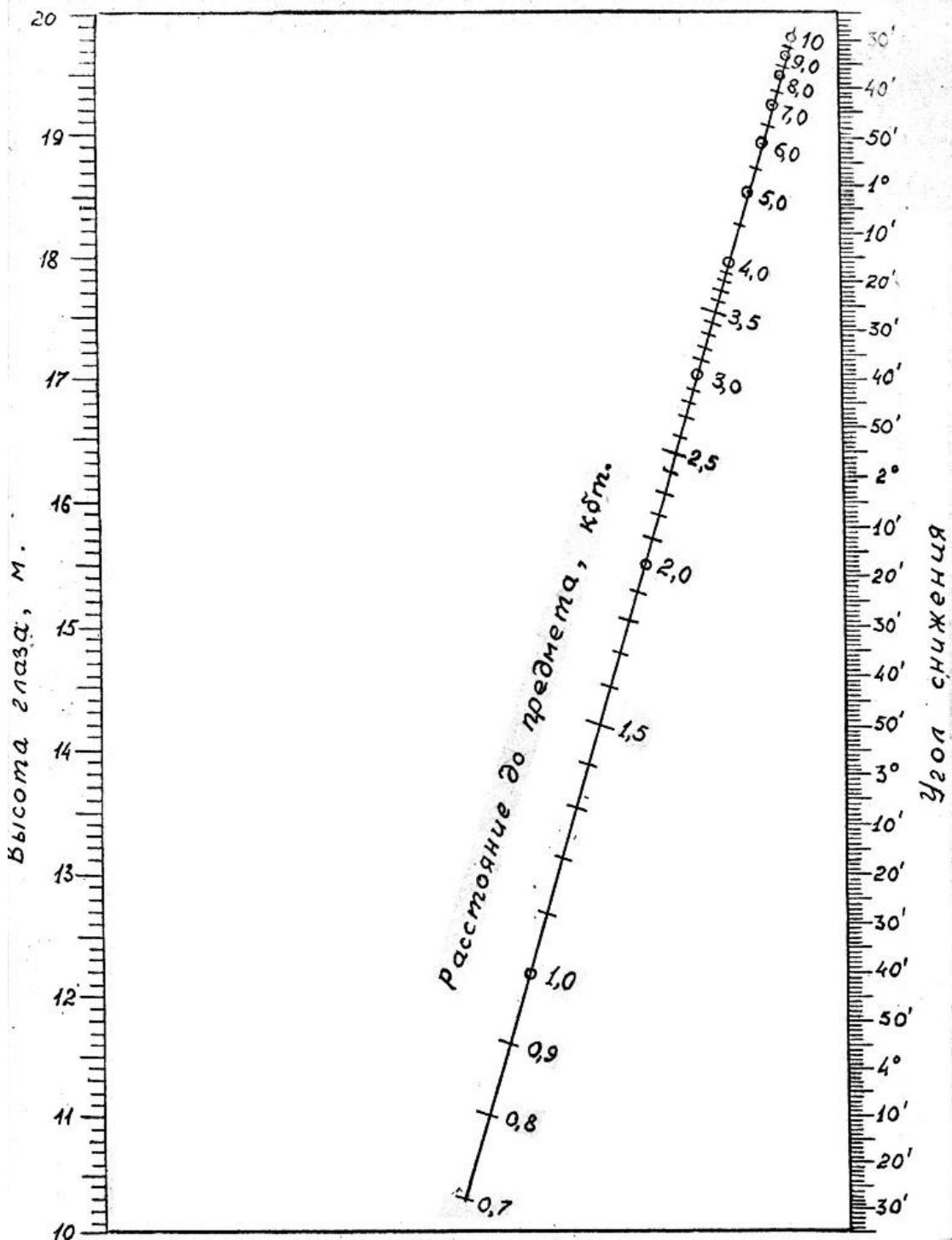


Рис. 1.63. Номограмма для расчета расстояния до ориентира по углу снижения

При выполнении наблюдений по углу снижения лучше, если команды о выполнении измерений будет подавать сам наблюдатель с секстантом. Если команды подаются другим лицом, то в момент подачи команды наблюдатель с секстантом может оказаться не вполне подготовленным, что снизит точность измерения углов снижения.

Формулу для оценки точности измерения дистанции в зависимости от точности измерения угла снижения получим, если продифференцируем выражение (1.38). Переходя к конечным превращениям и подставляя вместо них стандартные ошибки, найдём:

$$m_D = \frac{D}{0.042 \cdot D + 18.56 \frac{e}{D}} \epsilon_x \quad (1.39)$$

Как видно из полученной формулы стандартная ошибка дистанции m_D при данной ошибке измерения угла ϵ_x возрастает с увеличением расстояния до ориентира D и уменьшением высоты глаза e .

При благоприятных условиях наблюдений(чёткая линия горизонта) стандартная ошибка измерения угла снижения ε_x составляет для опытного наблюдателя, примерно, 0.5 дуговой минуты.

Как показывают результаты многочисленных натурных наблюдений при выполнении манёвров на расстояниях до 6-7 кбт. от ориентира стандартная ошибка обсерваций в зависимости от условий наблюдений колеблется от 3 до 8 м. Таким образом, способ обсерваций по гирокомпасным пеленгам и дистанциям по углу снижения обеспечивает высокую точность траекторных измерений и, следовательно, высокую точность определения маневренных элементов.

1.6. УПРАВЛЯЕМОСТЬ СУДНА.

Устойчивость на курсе и поворотливость. Управляемостью называется качество судна, позволяющее двигаться по заданной траектории или менять направление движения в соответствии с воздействием средства управления (руль, поворотная насадка). Управляемость зависит как от свойств самого судна, определяемых комплексом корпус- рулевое устройство- винт, так и от внешних условий: ветра, волнения, а также глубин и рельефа дна при плавании на мелководье, глубины и ширины канала при плавании в узостях.

Так, например, судно, обладающее удовлетворительной управляемостью при данных условиях, может оказаться неуправляемым после изменения осадки или дифферента. Судно может также потерять способность управляться под влиянием ветра и волнения в зависимости от их направления по отношению к диаметральной плоскости. Существенно изменяется управляемость судна на мелководье и в узостях.

Следует отметить также, что в условиях ветра управляемость судна существенно зависит от отношения его скорости к скорости ветра, так как боковая сила, созданная рулевым устройством(РУ), примерно пропорциональна квадрату скорости потока, в котором находится рабочий орган РУ, а поперечная аэродинамическая сила пропорциональна квадрату скорости ветра. Влияние скорости на управляемость проявляется только при наличии ветра.

Управляемость характеризуется двумя свойствами судна- устойчивостью на курсе и поворотливостью.

Устойчивостью на курсе называется способность судна сохранять заданное направление прямолинейного движения. Различают два вида устойчивости: теоретическую (автоматическую) и эксплуатационную.

Под теоретической устойчивостью подразумевается способность судна удерживаться на постоянном курсе без воздействия рулевого устройства. На практике такой устойчивости не встречается. Реальные суда бывают либо теоретически неустойчивыми (когда после прекращения действия возмущения судно входит в самопроизвольную циркуляцию), либо не асимптотически устойчивыми(когда после прекращения действия возмущения угловая скорость судна стремится к нулю).

Эксплуатационной устойчивостью называется способность судна сохранять заданное направление движения с помощью перекладок руля. Очевидно, что эксплуатационной устойчивостью должно обладать каждое судно.

Для оценки эксплуатационной устойчивости на курсе часто применяют критерий Q:

$$Q = \frac{\overline{\Delta\psi}}{\overline{\Delta\delta}} \cdot \frac{L}{V} \cdot \frac{n}{t_h} \quad (1.40.)$$

где $\overline{\Delta\psi}$ -средняя амплитуда рыскания судна;

$\overline{\Delta\delta}$ -средняя амплитуда перекладок руля;

V-скорость судна;

L-длина судна между перпендикулярами;

t_h -время, в течение которого выполнялись наблюдения;

n-число перекладок руля во время наблюдений.

Величина Q остаётся практически постоянной при данной загрузке судна и не зависит от индивидуальных качеств рулевого.

Существуют и другие виды критерия устойчивости на курсе.

Поворотливость. Поворотливостью называется способность судна изменять направление движения и двигаться по траектории заданной кривизны.

Поворотливость зависит от многих условий. Главными из них являются: характеристики средства управления; характеристики корпуса судна; внешние условия.

Главным средством управления на подавляющем большинстве морских судов является рулевое устройство, рабочим органом которого является руль(иногда поворотная насадка). К характеристикам руля относятся его размеры, форма и размещение.

Под размещением руля подразумевается его расположение относительно движителя (струи от движителя). Существуют два способа его размещения – в струе от винта, непосредственно за ним, или вне струи. При размещении в струе от винта его эффективность повышается в 2-2.5 раза, за счет того, что скорость потока воды, обтекающего руль, в 1.3 – 1.6 раза больше скорости судна относительно воды. Сила на руле пропорциональна квадрату скорости потока.

Влияет на поворотливость и способ соединения руля с корпусом: является ли руль подвесным или устанавливается за рудерпостом.

При отклонении руля от диаметральной плоскости на нём возникает боковая гидродинамическая сила.

Иногда на судах вместо руля устанавливается направляющая насадка на винт, скреплённая с вертикальным баллером, с помощью которого её можно поворачивать в горизонтальной плоскости до 30-35⁰ вправо и влево.

Боковая сила, возникающая на насадке, примерно на 40-50% выше, чем на руле, имеющем те же размеры (в проекции на ДП) и расположенным в винтовой струе. Это объясняется тем, что перекладка насадки обеспечивает более интенсивное отклонение потока от винта, чем перекладка руля.

Большое значение для поворотливости судна имеют параметры его корпуса, характеризуемые отношениями L/B и коэффициентами общей полноты δ, а также форма оконечностей судна (степень подреза оконечностей) и дифферент.

На одновинтовых судах циркуляции вправо и влево могут существенно отличаться из-за несимметричного влияния струи от винта.

Из рассмотренного выше очевидно, что устойчивость на курсе и поворотливость являются противоположными качествами- при улучшении устойчивости на курсе поворотливость ухудшается, и наоборот. В то же время оба этих качества являются полезными, поэтому при проектировании судов стремятся найти, в зависимости от типа и назначения судна, целесообразное сочетание этих качеств. На судах, которым по характеру их работы предстоит частое маневрирование в стеснённых условиях, для повышения поворотливости нередко устанавливают средства активного управления.

Движение судна под влиянием переложенного руля. При движении судна с переложенным рулём, центр тяжести описывает траекторию, называемую циркуляцией. При этом нос судна отклоняется внутрь циркуляции, т.е. между диаметральной плоскостью и касательной к траектории имеется угол подреза, называемый углом дрейфа на циркуляции.

Подводная часть судна ведёт себя как крыло,двигающееся в воде возникает подъёмная сила. Поперечная составляющая гидродинамической силы R_y и является подъёмной силой корпуса, рассматриваемого как крыло. Значение этой силы, распределённой по длине корпуса судна, пропорционально углу атаки, т.е. углу дрейфа. При движении с постоянным по длине корпуса углом дрейфа (это бывает при движении близком к прямолинейному) точка приложения равнодействующей подъёмной силы смешена к передней кромке крыла, т.е. к носовой части судна.

Циркуляция характеризуется линейной и угловой скоростями, радиусом кривизны и углом дрейфа. Эти характеристики не остаются постоянными, поэтому процесс циркуляции принято делить на три периода.

Первый период- маневренный -продолжается от момента подачи команды на перекладку руля до времени перекладки руля на заданный угол. Второй период- эволюционный- начинается с момента окончания перекладки руля и заканчивается, когда характеристики циркуляции примут установленные значения. Третий период- установленный- начинается с момента окончания второго периода и продолжается до тех пор, пока руль остаётся в пере-

ложеннем положении. За начало циркуляции принимается момент подачи команды на перекладку руля.

Переложенный на угол δ руль, как и всякое крыло, развивает подъёмную силу – боковую силу руля R_{py} , под влиянием которой корпус испытывает поперечную силу R_{ry} , приложенную в центре тяжести G и момент M_r относительно вертикальной оси Z . Это показано на рис.1.64.

В первый период после начала циркуляции под влиянием поперечной силы R_{py} возникает угол дрейфа и ц.т. судна приобретает движение во внешнюю сторону циркуляции, т.е. происходит обратное смещение, при этом на корпусе также появляется подъёмная сила – поперечная гидродинамическая сила R_{py} направленная внутрь циркуляции, точка приложения которой смещена в нос от ЦТ. Момент этой силы M_r в этом периоде имеет тот же знак, что и момент руля M_p поэтому угловая скорость начинает быстро возрастать.

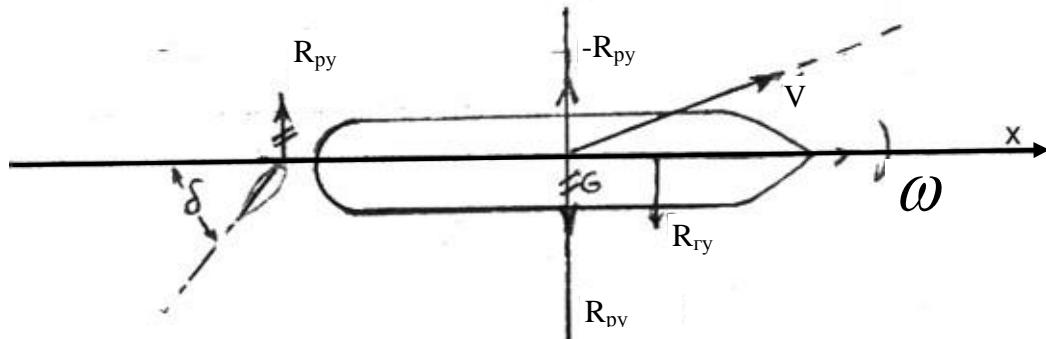


Рис.1.64. Движение судна с переложенным рулем

В дальнейшем под влиянием поперечной силы R_{ry} траектория ЦТ начинает постепенно искривляться в сторону перекладки руля, т.е. радиус начинает уменьшаться.

При движении ЦТ по криволинейной траектории с радиусом R каждая точка по длине судна описывает относительно общего центра циркуляции O свою траекторию. Радиус кривизны ее отличается от R . При этом каждая такая точка имеет свой угол дрейфа, значение которого возрастает по мере удаления в сторону кормы. В нос от ЦТ углы дрейфа соответственно уменьшаются, как показано на рис.1.65. Если же из центра циркуляции O опустить перпендикуляр на диаметральную плоскость (ДП), то в полученной точке ПП угол дрейфа равен нулю. Эта точка носит название центра вращения или полюса поворота.

Полюс поворота при циркуляции для большинства судов располагается вблизи носовой оконечности - на расстоянии примерно 0.4 длины судна от центра тяжести принимаемого на мидель-шпангоуте.

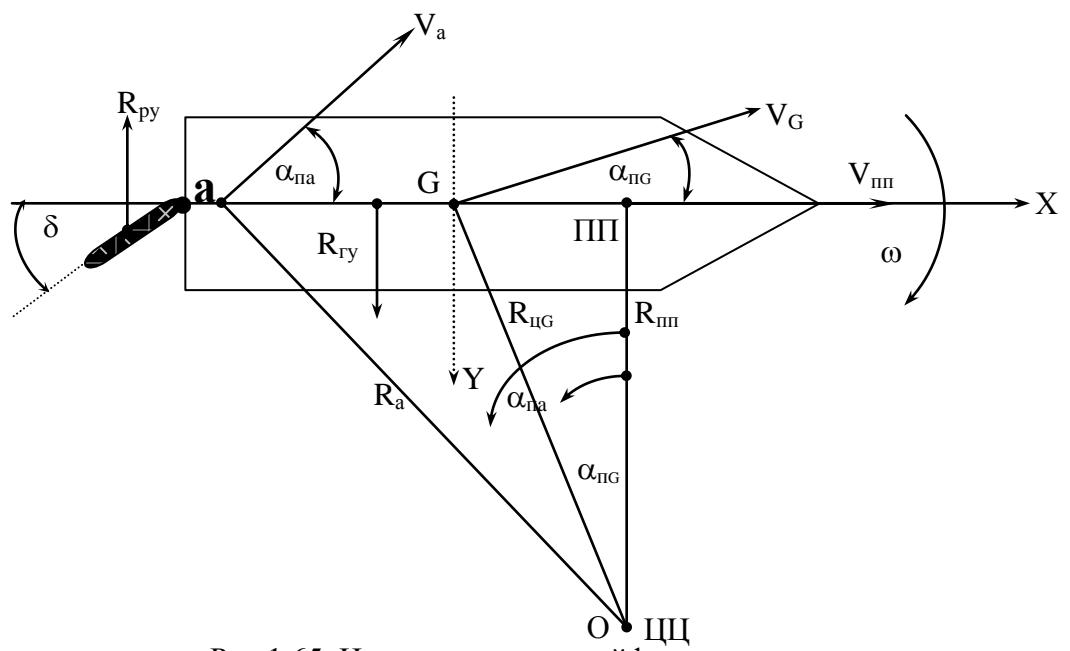


Рис.1.65. Изменение угла дрейфа по длине судна

Угол дрейфа ЦТ судна на циркуляции определяется по формуле:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{l_{n.n.}}{R_{n.n.}} \quad (1.41)$$

где $l_{n.n.}$ -расстояние полюса поворота от центра тяжести.

Для произвольной точки а угол дрейфа будет:

$$\alpha_a = \operatorname{arctg} \frac{l_{n.n.} - l_a}{R_{n.n.}} \quad (1.42)$$

где l_a - расстояние от точки а до центра тяжести(в корму знак «-»).

На судах, имеющих крутую циркуляцию, угол дрейфа может достигать 20^0 и более.

Как уже отмечалось, подъёмная сила пропорциональна углу атаки, а так как углы дрейфа возрастают по длине корпуса в сторону кормы, то точка приложения поперечной гидродинамической силы $R_{\text{тг}}$ по мере искривления траектории смещается в сторону кормы, а момент этой силы M_r постепенно уменьшаясь меняет знак и начинает действовать противоположно моменту руля M_p , т.е. становится демпфирующим. Рост угловой скорости при этом замедляется, а когда моменты M_p и M_r становятся равными по абсолютной величине, угловая скорость стремится к установленному значению $\omega_{\text{уст.}}$

Благодаря сопротивлению переложенного руля (сила R_{px}) и некоторому увеличению сопротивления корпуса при движении с углом дрейфа, а также проекции P_x центробежной силы, линейная скорость судна V постепенно уменьшается, стремясь к некоторому значению $V_{\text{уст.}}$.

Чем лучше поворотливость, т.е. чем большую кривизну имеет траектория, тем больше снижается скорость на циркуляции. В среднем, на крупнотоннажных морских судах при повороте на 90^0 скорость снижается, приблизительно на $1/3$, а при повороте на 180^0 – вдвое.

1.7. Основные сведения о судовых рулях и движителях

Угол поворота рулей относительно диаметральной плоскости называется углом перекладки руля. Под термином “перекладка руля” понимают процесс поворота пера руля из одного положения в другое. Максимальный угол перекладки руля на морских судах обычно ограничивают 35^0 , поскольку дальнейшая перекладка руля, не приводит к увеличению его поперечной силы. Дальнейшее увеличение угла перекладки кроме малой эффективности ведет к резкому увеличению нагрузки на оси баллера, что требует утяжеления привода рулей и повышения мощности рулевой машины.

Площадь пера руля, которая требуется для обеспечения необходимой управляемости, зависит от назначения и геометрических размеров судна, формы обводов кормы, скорости хода и расположения руля относительно винта. Для сравнения эффективности рулей различных судов принято рассматривать относительную площадь руля A_p и фактор руля и корпуса F . Значение A_p определяют по формуле:

$$A_p = L \cdot T_{cp} / S_p, \quad (1.43)$$

где L - длина судна между перпендикулярами;

T_{cp} - средняя осадка;

S_p - площадь пера руля (суммарная площадь рулей).

Значение коэффициента A_p лежит в пределах от 10 (речные колесные суда) до 85

(трансатлантические быстроходные пассажирские суда).

Форма кормовой оконечности характеризуется коэффициентом полноты площади погруженной части ДП - σ_k , который определяют по формуле:

$$\sigma_k = 1 - \frac{f_k}{L \cdot T_{cp}}, \quad (1.44)$$

где f_k - площадь подреза кормы, ограниченная кормовым перпендикуляром, базовой линией и контуром кормы. Кроме площади пера руля на управляемость существенно влияет и его форма, которая характеризуется его относительным удлинением λ_p , которое определяют по формуле:

$$\lambda_p = \frac{h_p^2}{S_p}, \quad (1.45)$$

где h_p - высота руля по баллеру.

Увеличение площади пера руля увеличивает его поперечную силу R_{py} , но вместе с тем увеличивается и демпфирующее действие руля. Поэтому увеличение его площади приводит к улучшению поворотливости только при больших углах перекладки руля.

У судов с большим значением коэффициента полноты σ_k поворотливость будет хуже, а устойчивость на курсе лучше, чем у судов с меньшим значением σ_k .

Увеличение относительного удлинения руля λ_p при неизменной площади S_p приводит к возрастанию поперечной силы руля R_{py} , что приводит к некоторому улучшению поворотливости.

Фактор руля и корпуса определяют по формуле:

$$\Phi = \frac{L \cdot \sigma_k^2}{B \cdot \sqrt{\bar{S}_p + \lambda_p}} , \quad (1.46)$$

где \bar{S}_p - относительная площадь пера руля в процентах, определяется

$\bar{S}_p = S_p / L / T_{cp}$. Полученное значение Φ используется для расчетного определения элементов циркуляции и потери скорости при повороте.

Силы, действующие на переложенный руль, с учетом взаимодействия между рулевым устройством и корпусом судна, в связанных с судном осях (X - положительное направление в нос, Y - положительное направление в правый борт) можно определить (рис. 5) :

$$R_{px} = C_{px} V_p^2 S_{pe} \rho / 2 \quad (1.47)$$

$$R_{py} = C_{py} V_p^2 S_{pe} \rho / 2 \quad (1.48)$$

где C_{px} - безразмерный коэффициент сопротивления руля ;

V_p - скорость потока воды набегающего на руль;

S_{pe} - эффективная площадь руля;

ρ - плотность воды;

S_{py} - безразмерный коэффициент боковой силы руля.

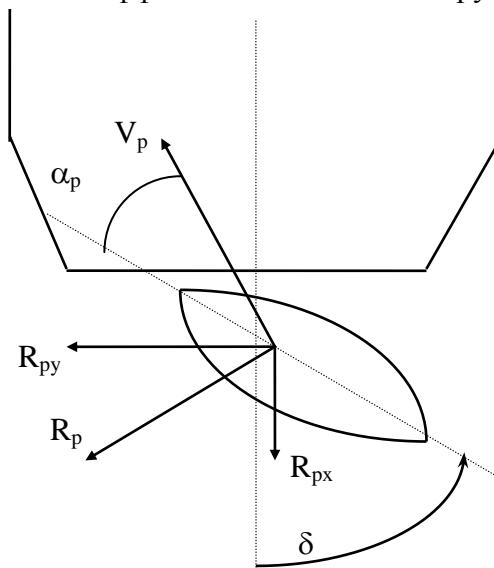


Рис.1.66 Схема сил, действующих на руль

Значение боковой силы руля, с учетом изменения направления потока, можно определить по формуле:

$$R_{py} = C_{py}^\alpha \cdot \alpha_p \cdot V_p^2 \cdot S_{pe} \cdot \rho / 2 , \quad (1.49)$$

где C_{py}^α - коэффициент производной боковой силы руля по углу атаки;

α_p - угол атаки руля.

Величину угла атаки можно определить из выражения:

$$\alpha_p = \delta_p - \chi_e (\beta + \frac{l_p \cdot L}{V_p} \omega) \quad (1.50)$$

где χ_e - эффективный коэффициент влияния корпуса и винта на руль;

$\bar{\ell}_p$ - относительное плечо силы на руле, равное $\bar{\ell}_p = l_p / L$;

β - угол дрейфа на циркуляции;

ω - угловая скорость вращения судна.

Значение C_{py}^{α} можно определить по формуле:

$$C_{py}^{\alpha} = k_{tp} \bullet C_{py}^{\alpha p}, \quad (1.51)$$

где k_{tp} - коэффициент типа руля, равный для обычных рулей - 1.0, для рулей за рудерпостом - 1.3, для поворотных насадок - 0.9.

Значение $C_{py}^{\alpha p}$ для обычных рулей можно определить по формуле:

$$C_{py}^{\alpha p} = \frac{2\pi C_p}{1 + 2 / \lambda_p} \quad (1.52)$$

где C_p - поправочный коэффициент, равный единице для прямоугольных и трапециевидных рулей; для полубалансирных рулей его значение можно определить из табл. 1.4, составленной по графику, приведенному в справочнике по теории корабля. Для промежуточных значений величину C_p можно получить путем линейной интерполяции.

Таблица 1.4

Значение поправочного коэффициента C_p

λ_p	0.5	1.0	1.5	2.0
C_p	1.0	0.86	0.73	0.6

Значение коэффициента χ_e определяют по формуле:

$$\chi_e = \chi \bullet \chi_d \quad (1.53)$$

где χ - коэффициент влияния корпуса; χ_d - коэффициент влияния винта.

Значения коэффициентов χ и χ_d можно найти по рекомендациям, помещенным в справочнике по теории корабля .

Сила упора винта на переднем установившемся ходу равна сопротивлению движению корпуса судна (строго говоря надводной и подводной частей, однако учитывая малую долю сопротивления воздуха при тихой погоде по сравнению с сопротивлением воды ею пренебрегают), которое можно рассчитать по формуле:

$$P_e = kV^2, \quad (1.54)$$

где k - коэффициент сопротивления корпуса, значение которого можно определить по формуле Демина С.И. :

$$k = 5880 + 0.654 \Omega \sqrt{B / T_{cp}}, \quad (1.55)$$

где Ω - площадь смоченной поверхности, которую с достаточной для практики точностью можно рассчитать:

$$\Omega = D^{2/3} (4.854 + 0.492 B / T_{cp}), \quad (1.56)$$

где D - водоизмещение судна в тоннах.

Сила упора винта P_{max} , которую он развивает к моменту остановки судна, является силой упора винта при нулевой поступи. Для изолированного винта (без учета влияния корпуса судна на его работу) сила упора " на швартовах" рассчитывается по формуле:

$$P_{shv} = k_p \rho n^2 D_b^4, \quad (1.57)$$

где k_p - коэффициент упора винта на заднем ходу в режиме "на швартовах";

ρ - массовая плотность воды;

n - число оборотов винта в секунду;

D_b - диаметр винта.

Значение коэффициента упора выбирают из специальных диаграмм для расчета винтов, помещенных в справочнике по теории корабля. С достаточной для практических потребностей судовождения точностью его можно рассчитать по известной эмпирической формуле:

$$k_p = \sqrt[3]{\Theta \bullet Z} (0.225 \sin^2 H_b + 0.098 \sin H_b), \quad (1.58)$$

где Θ - дисковое отношение винта;

Z - число лопастей винта;

H_B - шаговое отношение винта, равное отношению шага винта к его диаметру $H_B = H / D_B$.

Если гребной винт имеет направляющую насадку, то полученное значение κ_p следует умножить на коэффициент 0.85.

Влияние корпуса на работу винта учитывается коэффициентом усиления упора C_{yy} , величина которого зависит от соотношения площадей диска винта A_d и погруженной части мидель-шпангоута S_\otimes . Его значение может быть определено по эмпирической формуле С.И.Демина:

$$C_{yy} = 0.508 + 0.106 S_\otimes / A_d, \quad (1.59)$$

где значение $S_\otimes = B T_{cp} \beta_\otimes$; β_\otimes - коэффициент полноты мидель-шпангоута;

Значение A_d рассчитывается по формуле: $A_d = \pi \bullet D_B^2 / 4$.

С учетом изложенного максимальную силу упора винта рассчитывают по формуле:

$$P_{max} = P_{sh} \bullet C_{yy} \quad (1.60)$$

Точность определения значения P_{max} по приведенной методике характеризуется стандартной относительной погрешностью равной 12.3%.

1.7. Элементы циркуляции.

Типичная траектория судна на циркуляции показана на рис.1.67.

Циркуляция характеризуется следующими элементами:

а) тактический диаметр циркуляции D_T – расстояние между положениями диаметральной плоскости судна до начала поворота и в момент изменения курса на 180° ;

б) диаметр установившейся циркуляции D_y – расстояние между положениями диаметральной плоскости судна для двух последовательных курсов, отличающихся на 180° ; при установленном движении;

в) обратное смещение ℓ_3 -максимальное смещение центра тяжести судна от линии первоначального курса в сторону, обратную направлению поворота, происходящее в начале циркуляции под влиянием боковой силы руля.

Траектория принимает вид окружности.

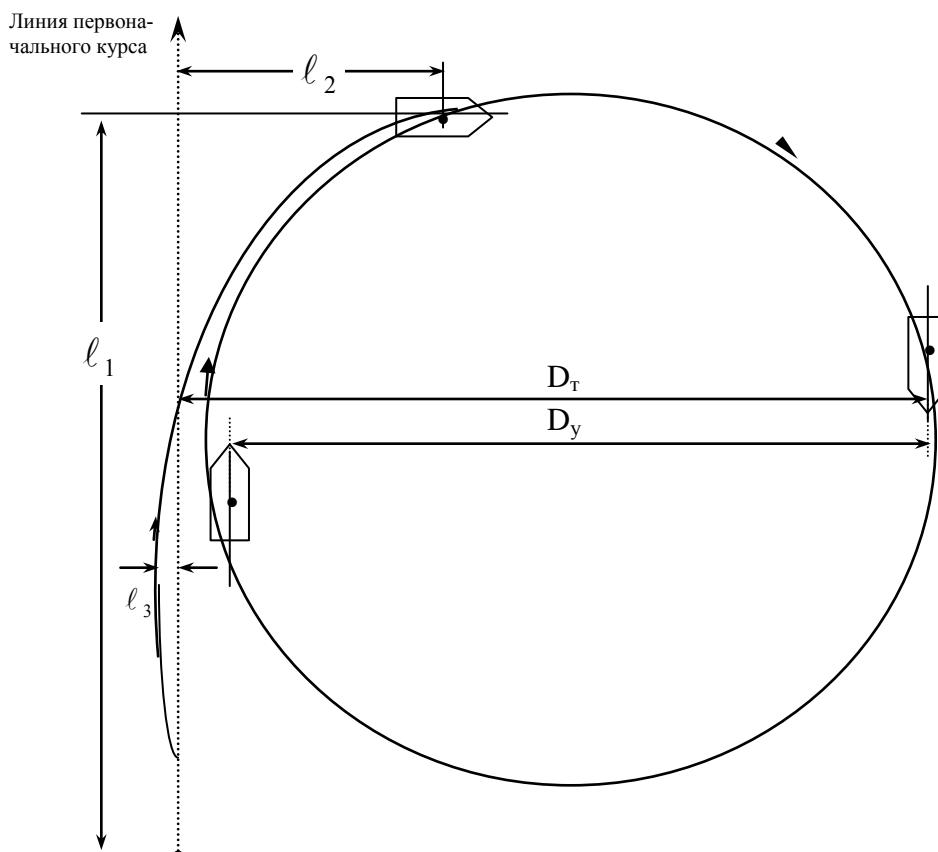


Рис.1.67. Траектория движения судна с переложенным рулем

г) выдвинул l_1 -расстояние, на которое смещается центр тяжести судна в направлении первоначального курса от начальной точки циркуляции до точки, соответствующей изменению курса на 90° ;

д) прямое смещение l_2 -расстояние от линии первоначального курса по нормали до центра тяжести судна в момент изменения курса на 90° ;

Чёткую границу между эволюционным периодом и установившейся циркуляцией обозначить трудно, так как изменение элементов движения затухает постепенно. Условно можно считать, что после поворота на 180° от начального курса движение приобретает установленный характер, а траектория принимает вид окружности.

Поскольку, при выполнении практических манёвров, обычно, не приходится менять курс более, чем на 180° , можно считать, что все манёвры выполняются при неустановившемся движении, т.е. в маневренном и эволюционном периодах.

1.8. Влияние параметров корпуса и руля на управляемость.

Как вытекает из теоретических представлений и подтверждается практическими наблюдениями на управляемость судна оказывают влияние следующие величины: отношение длины судна к его ширине L/B , отношение осадки к длине T/L , коэффициент общей полноты δ , форма оконечностей судна, дифферент, площадь, форма и размещение руля. Рассмотрим кратко влияние каждой из перечисленных величин.

Влияние отношения L/B . Увеличение L/B приводит к росту гидродинамической силы R_{ky} , что ведёт к уменьшению угла дрейфа на циркуляции и, следовательно, к сохранению высокой линейной скорости, так как сопротивление воды при малых углах дрейфа возрастает незначительно. Кроме того, при увеличении L точка приложения силы R_{ky} смещается в сторону кормы, при этом увеличивается демпфирующее действие момента M_k , входящего в третье уравнение системы (1.3.), что приводит к уменьшению угловой скорости w (скорость изменения курса). Таким образом, увеличение L/B значительно ухудшает поворотливость судна.

Влияние отношения T/L . Увеличение T/L тоже приводит к росту силы R_{ky} , но в то же время точка приложения её смещается в сторону носа, что уменьшает демпфирующее действие момента M_k . В результате при увеличении отношения T/L поворотливость изменяется незначительно.

Влияние коэффициента δ_{op} . На поворотливость судна значительно влияет коэффициент продольной полноты φ , который выражается отношением δ_{op} к коэффициенту полноты мидель-шпангоута β_∞ , т.е. $\varphi = \delta_{op} / \beta_\infty$. Увеличение φ приводит к уменьшению силы R_{ty} и уменьшению демпфирующего момента M_r . Поэтому увеличение δ_{op} значительно улучшает поворотливость.

Влияние формы носовой и кормовой оконечностей. Значительное влияние на поворотливость оказывает степень подреза штевней, критерием которой является коэффициент полноты диаметральной плоскости. Особенно сильно влияет степень подреза кормы. Чем больше кормовой подрез, тем больше смещается в нос точка приложения силы R_{gy} , что приводит к улучшению поворотливости. С другой стороны, даже небольшое увеличение площади дейдвуда резко ухудшает поворотливость.

Степень подреза кормы можно охарактеризовать коэффициентом полноты площади погруженной части диаметральной плоскости σ_k , рассчитываемом с учётом величины кормового подреза по формуле:

$$\sigma_k = 1 - \frac{f_k}{LT} \quad (1.61.)$$

где f_k -площадь кормового подреза- площадь фигуры, заключённой между кормовыми перпендикулярами (осью баллера руля) и контуром кормовой оконечности (снимается в масштабе с чертежа бокового вида), m^2 ;

L -длина между перпендикулярами, м;

T -средняя осадка, м.

Носовой подрез влияет на поворотливость значительно меньше. Если носовой подрез велик, как, например, у ледоколов, то поворотливость несколько ухудшается.

Влияние дифферента. Дифферент судна вызывает смещение точки приложения R_{py} . Дифферент на нос улучшает поворотливость, но ухудшает устойчивость на курсе, т.е. увеличивает рыскливость. Дифферент на корму ухудшает поворотливость, но увеличивает устойчивость на курсе.

Влияние площади, формы и размещение руля. Форма руля, как уже отмечалось, характеризуется обычно его относительным удлинением $\lambda_p = h_p^2 / S_p$. Увеличение λ_p при неизменной его площади S_p увеличивает подъёмную(боковую) силу руля R_{py} , что приводит к улучшению поворотливости.

Увеличение площади руля S_p также увеличивает подъёмную силу, но в то же время увеличивает и демпфирующее действие руля. Таким образом, увеличение площади руля приводит к улучшению поворотливости при больших углах перекладки, а при малых отклонениях руля поворотливость ухудшается.

Расположение руля относительно винта(винтов) значительно влияет на поворотливость. Если руль расположен в винтовой струе, то скорость натекания воды на руль увеличивается вследствие влияния винта, что вызывает значительное улучшение поворотливости. Эффект винтовой струи и проявляется тем сильнее, чем большая площадь руля попадает в поток от винта. Этот эффект проявляется особенно сильно в режиме разгона судна, а по мере приближения скорости к установившемуся для данного режима значения уменьшается.

Основные элементы циркуляции, выраженные в длинах корпуса- выдвиг \bar{l}_1 , прямое смещение \bar{l}_2 , тактический диаметр \bar{D}_T и диаметр установившейся циркуляции \bar{D}_{ust} –для одновинтовых судов можно приблизённо определить по эмпирическим формулам, полученным по результатам обработки натурных наблюдений. Формулы приведены с указанием относительных средних квадратических отклонений (в процентах):

$$\bar{l}_1 = 6.41 \frac{\Phi}{\sqrt{\delta^0}} + 0.70\psi^0 - 0.93, (\pm 9.0\%) \quad (1.62)$$

$$\bar{l}_2 = 5.84 \frac{\Phi}{\sqrt{\delta^0}} + 0.68\psi^0 - 2.15, (\pm 15.5\%) \quad (1.63.)$$

$$\bar{D}_T = 11.75 \frac{\Phi}{\sqrt{\delta^0}} + 1.35\psi^0 - 3.90, (\pm 13.0\%) \quad (1.64.)$$

$$\bar{D}_{ycm} = 11.61 \frac{\Phi}{\sqrt{\delta^0}} + 1.20\psi^0 - 4.31, (\pm 19.5\%) \quad (1.65.)$$

где δ^0 -угол перекладки руля, градусы;

ψ^0 -угол дифферента ($\psi^0 = \frac{T_K - T_H}{L} 57.3^0$), градусы;

Φ - фактор корпуса и руля, рассчитанный по формуле:

$$\Phi = \frac{(L/B) \cdot \sigma_k^2}{S\%} \quad (1.66.)$$

где $S\%$ -относительная площадь руля, выраженная в процентах ($S\% = \frac{S_p}{LT} 100$)

Пользуясь фактором корпуса и руля Φ , можно также определить приблизённо относительную скорость судна на установившейся циркуляции:

$$\overline{V_{ycm}} = 1 - 0.056 \frac{\delta^0}{\Phi} \quad (1.67.)$$

Приведенные формулы дают средние значения элементов циркуляции без учёта несимметричности траекторий при поворотах вправо и влево, иногда наблюдаемых на одновинтовых судах.

Несимметричность траекторий возникает также при крене. Даже небольшой угол крена способен резко ухудшить поворотливость в сторону накренённого борта. При этом поворотливость в сторону повышенного борта улучшается.

1.9. Учет характеристик поворотливости при маневрировании

Поворот судна в открытом океане, при плавании вдали от навигационных опасностей, не представляет затруднений, а при использовании карт 1: 50000 и мельче вообще не выражается в масштабе и принимается за точку При плавании в стесненных водах планирование поворота приобретает первостепенное значение Существует три способа планирования поворота ручной, автоматизированный и автоматический.

При ручном планировании поворота необходимые исходные данные судоводитель должен определять по характеристикам поворотливости до начала поворота. Они включают в себя координаты точек начала и конца поворота, пеленги и расстояния до приметных ориентиров в эти моменты. Рулем в процессе поворота управляет матрос. Контроль процесса поворота заключается в определении места судна в моменты его начала и окончания. Движение на криволинейной траектории часто не контролируется из-за того, что определение места занимает длительное время и такая информация запаздывает ко времени принятия решения по управлению Для того, чтобы контролировать снос при повороте, обычно применяют ускоренные способы определения места. В этом случае, при подготовке к плаванию, наносят сетки изолиний, которые существенно ускоряют процесс контроля и позволяют получить оперативную информацию о местоположении судна.

При автоматизированном выполнении поворота рутинную работу по расчету необходимых данных - момента начала поворота, выбора угла перекладки руля, определения координат текущего положения, наступление момента сдерживания судна производит ЭВМ Судоводитель отдает необходимые команды рулевому и контролирует по экрану ЭВМ положение фактических координат относительно плановых и корректирует движение судна При автоматическом выполнении поворота процесс движения планирует и осуществляет ЭВМ без участия судоводителя и рулевого Судоводитель осуществляет контроль за нормальной ее работой и, при возможности, визуально оценивает положение судна относительно знаков навигационной обстановки

В настоящее время существует два способа планирования точек при повороте и выполнения поворота, которые отличаются методом учета характеристик поворотливости. Первый [11,12] основан на выборе угла перекладки руля по величине изменения курса, расчете или переносе соответствующего участка кривой характеристик поворотливости на карту с последующим определением координат начала, окончания и промежуточных точек циркуляции

При этом за начало поворота принимают, как и при выполнении натурных испытаний по определению характеристик поворотливости, момент подачи команды на перекладку руля. Контроль процесса поворота осуществляют по гирокомпасу

Второй способ основан на выборе угла перекладки в соответствии с величиной установленного значения радиуса кривизны траектории. Он предполагает поддержание угловой скорости поворота постоянной в течение всего времени циркуляции, переменными кладками руля. Контроль поворота осуществляют по датчику угловой скорости и гирокомпасу. Недостатком этого способа является то, что он не позволяет установить соответствие фактического и запланированного пути. Управление производят по установленному значению угловой скорости (а значит и радиуса циркуляции), в то время, когда судно движется в маневренном режиме. Переменные углы перекладки руля, которые при этом используются, увеличивают ширину полосы маневренного смещения. Последнее в опасных районах стесненных вод имеет первостепенное значение.

Для учета характеристик поворотливости при планировании поворота можно предложить три способа- отрезков, перпендикуляров и эллипса [12].

Недостатком способа отрезков является ухудшение точности нанесения траектории при углах поворота более 150°. От способа отрезков легко перейти к перпендикулярам. Приближенные зависимости для расчета перпендикуляров имеют вид

$$\begin{aligned} HP &= l_1 - D_T / 2 + (D_T / 2) * \operatorname{tg}(\theta / 2) + l_2 * \operatorname{tg}(\theta / 2) * \cos\theta \\ KP &= l_2 * \operatorname{tg}(\theta / 2) * \sin\theta \end{aligned} \quad (1.68)$$

В формуле (1.68) принятые условные обозначения: Н- точка начала поворота; Р- точка пересечения перпендикуляра, опущенного из точки окончания поворота, на линию первоначального курса; К- точка окончания поворота; Θ - угол поворота.

Способ перпендикуляров дает возможность построения траектории для углов поворота без ограничений. Недостатком способа является невозможность определить координаты начала поворота относительно точки М пересечения путей до и после поворота. значения которых известны с карты. Поэтому приходится определять точку начала поворота методом отрезков, а затем наносить траекторию относительно точки начала поворота При использовании этого способа в ЭВМ для планирования поворота необходимо заранее рассчитать таблицу значений перпендикуляров для различных углов перекладки руля для состоянию в грузу и в балласте и помещать в память машины в виде массива. При аналитическом решении задачи учета характеристик поворота можно использовать аппроксимацию кривой циркуляции участками эллипса, с представлением результатов в виде перпендикуляров. Координаты точек поворота относительно точки начала циркуляции приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Координаты точек поворота относительно точки начала циркуляции, расчитанные методом эллипса для т/х “Акад.С.Королев” в балласте.

$T_{cr}=6.94\text{м}$ $\delta=15$ вправо $l_1=3.7\text{кбт}$ $l_2=2.6\text{кбт}$ $D_t=5.1\text{кбт}$ $D_y=3.9\text{кбт}$									
θ	10	20	30	40	50	60	70	80	90
HP	0/6	1.2	1.7	2.2	2.7	3.1	3.4	3.6	3.7
KP	0.0	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6
θ	100	110	120	139	140	150	160	170	180
HP	3.8	3.7	3.7	3.6	3.4	3.1	2.9	2.6	2.2
KP	3.0	3.3	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.0	5.1
θ	190	200	210	220	230	240	250	260	270
HP	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.3	0.1	-0.1	-0.2
KP	5.2	5.1	5.1	5.0	4.8	4.5	4.3	4.0	3.6
θ	280	290	300	310	320	330	340	350	360
HP	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0.4	0.6	0.9	1.3
KP	3.3	2.9	2.6	2.3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2

При планировании поворота и движении судна во время его выполнения будем рассматривать принципы управления с учетом внешних воздействий и выбора направления перемещения: курсовой; по отклонению; по возмущению; комбинированный [11]. Использовать курсовой принцип при повороте не представляется возможным. При управлении по отклонению первоначальную перекладку руля изменяют всякий раз, когда производят определение места. Этот способ можно использовать только при автоматизации поворота и движении по пологим криволинейным траекториям значительной продолжительности и ручном управлении. При управлении по возмущению траекторию планируют без учета внешних условий , по значению путевых углов, снятых с карты. Однако курс перед входом и после выхода из циркуляции назначают с учетом дрейфа и сноса течением. Комбинированный способ можно использовать только при автоматическом выполнении поворота.

При маневрировании судна будем различать два способа его управления по криволинейной траектории - рулем и курсом. При управлении рулем судоводитель, выполняющий. маневрирование, задает углы его перекладки, а рулевой только выполняет команды. Качество управления зависит от квалификации судоводителя. При управлении курсом рулевому задают направление движения, предоставляя ему выбор углов перекладки руля перед входом в поворот и при его одерживании. Качество управления при этом зависит от рулевого.

Рассмотренные методы учета характеристик поворотливости и способы управления судном, позволяют выполнить автоматизацию процесса расчета плановых координат траектории при циркуляции, с учетом конфигурации акватории и маневренных характеристик. Автоматизация любого технологического процесса, к которым можно отнести и управление судном, предполагает наличие заданного алгоритма функционирования системы управления

и информации о фактическом состоянии системы, по значениям которых, вырабатывается сигнал рассогласования. В соответствии с полученным сигналом система управления вырабатывает необходимое воздействие для приведения к заданному состоянию.

В качестве заданного алгоритма при повороте выступает точка начала перекладки руля, величина угла перекладки, координаты криволинейной траектории, момент сдерживания, угол сдерживания, точка окончания поворота. Задача не представляет особой сложности при движении судна по прямолинейным траекториям. Трудность обычно состоит в том, чтобы задать криволинейную траекторию точками, соответствующими характеристикам, и положению судна при заданном угле перекладки руля. Траекторию движения при повороте можно назначать выбором точки начала поворота и угла кладки руля (рис 1.68.1), либо выбором угла кладки руля при неизменной, определяемой навигационными условиями точке.

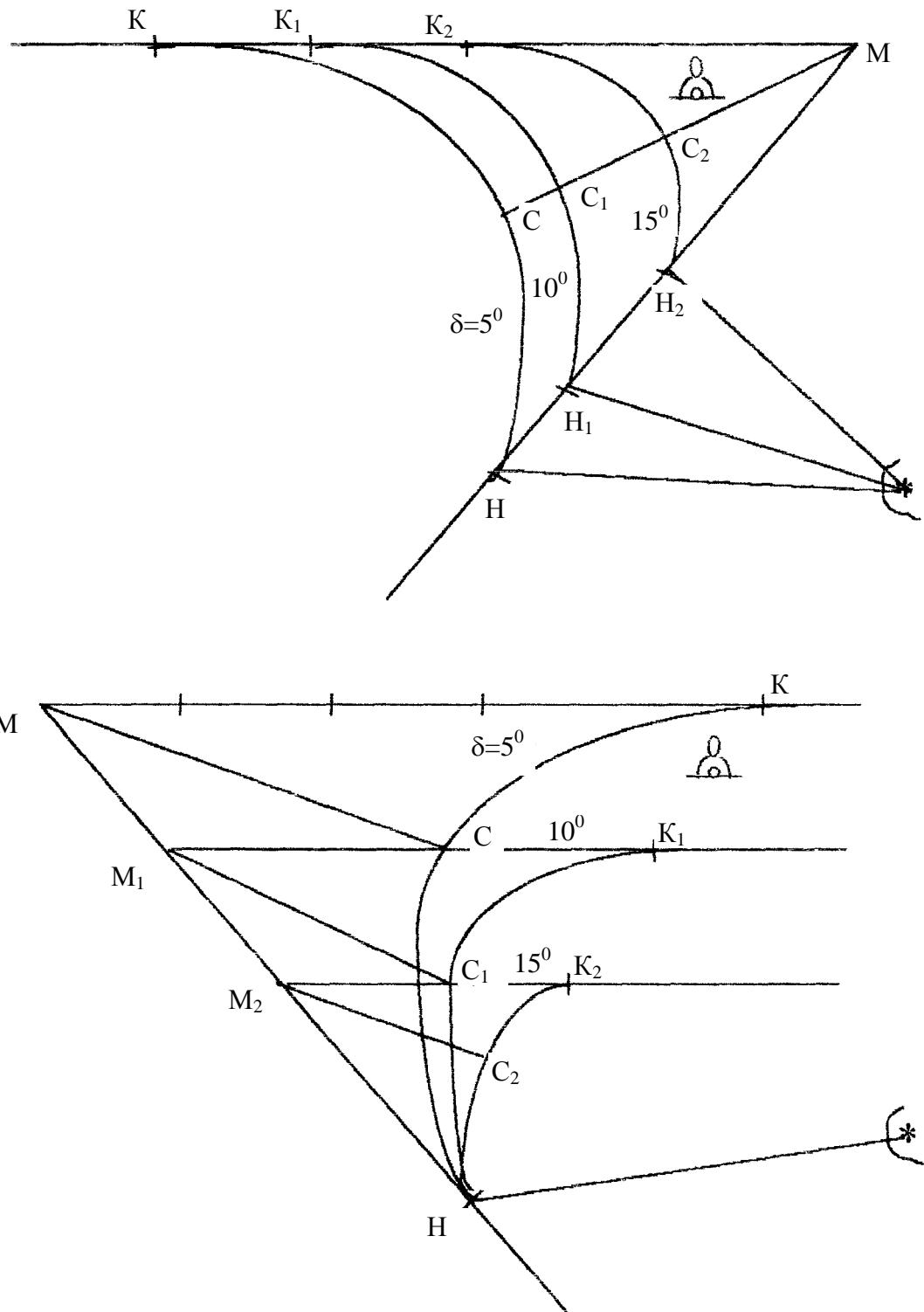


Рис 1.68. Прокладка поворота на карте 1) выбором точки начала поворота и угла кладки руля; 2) выбором угла кладки руля

начала поворота (рис 1.68.2). После того, как выбран угол перекладки руля, производят определение величины отрезков МН и МК и рассчитывают координаты точек начала, конца и промежуточных. Расчет производят по координатам (снятым с карты) точки пересечения линии курса до и после поворота.

1.10. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГРЕБНОГО ВИНТА И РУЛЯ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ.

Силы и моменты, возникающие при работе гребного винта. Вращающийся гребной винт на движущемся судне совершает поступательное движение со скоростью судна V_s и вращательное движение с угловой скоростью $\omega = 2\pi n$ (n -число оборотов винта в 1 с).

Рассмотрим движение элемента винта, показанного на рис.1.69. в виде сечения его лопасти на каком-то радиусе r .

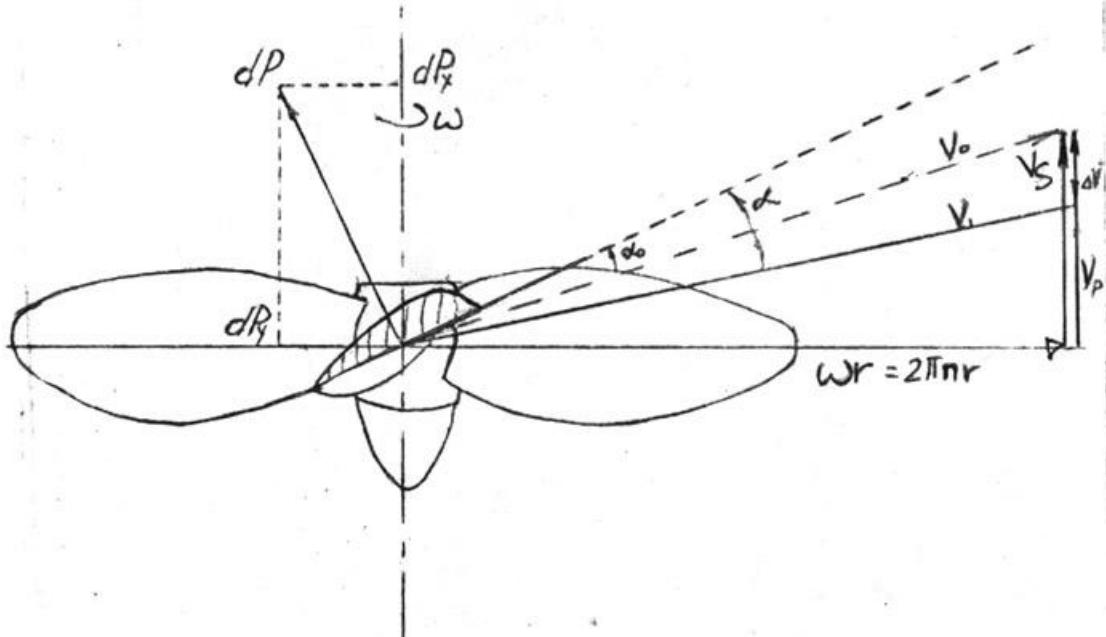


Рис.1.69. Силы, действующие при вращении винта

Скорость поступательного движения элемента -аксиальная скорость - равна скорости судна относительно невозмущённой воды V_s , а окружная скорость элемента равна $\omega r = 2\pi n r$. Абсолютная скорость элемента относительно невозмущённой воды V_0 равна геометрической сумме аксиальной и окружной скоростей.

Таким образом, элемент лопасти можно рассматривать как крыло, движущееся в воде с углом атаки α_0 . При этом на элементе возникает гидродинамическая сила dP , пропорциональная углу атаки. Аксиальная составляющая этой силы dP_x , является подъёмной силой элемента лопасти, а поперечная составляющая dP_y – лобовым сопротивлением этого элемента. Произведение лобового сопротивления на радиус даёт момент $dM = dP_y \cdot r$ относительно оси вращения винта, возникающий на данном элементе.

Если проинтегрировать dP_x и dM по длине лопасти и умножить на число лопастей, получится, соответственно, сила упора винта P , обеспечивающая поступательное движение судна, и момент M , преодолеваемый двигателем.

Как уже отмечалось, скорость V_s является аксиальной скоростью винта относительно невозмущённой воды. В реальных же условиях за корпусом судна, движущемся со скоростью V_s , возникает попутный поток, средняя скорость которого равна ΔV . Благодаря попутному потоку фактическая аксиальная скорость винта относительно воды оказывается меньше V_s на величину ΔV , т.е.

$$V_p = V_s - \Delta V \quad (1.69)$$

При этом очевидно (см. рис.1.70.), что действительный угол атаки $\alpha > \alpha_0$. Так как гидродинамическая сила dP , пропорциональная углу атаки, то при его возрастании от α_0 до α_s сила ΔP увеличивается, а также увеличивается сила лобового сопротивления ΔP_y . Отметим что попутный поток, увлекаемый корпусом судна, имеет неодинаковые скорости по высоте. В верхней части, благодаря более полным отводам кормы, скорость попутного потока больше средней скорости ΔV_{cp} , а в нижней- меньше, потому и углы атаки на лопастях в верхней части диска винта больше, чем в нижней, следовательно, и сила ΔP_y для лопасти в верхнем по-

ложении больше, чем для лопасти повёрнутой вниз. Поскольку силы ΔP_y для лопасти в верхнем и нижнем положениях направлены противоположно, то очевидно, что результирующая этих сил B для винта правого вращения (см. рис. 1.69.) стремится сместить корму влево.

Если же судно движется вперёд, а винт работает назад, то благодаря попутному потоку углы атаки на лопастях в верхнем и нижнем положении уменьшаются в большей степени, чем в нижнем, вследствие чего результирующая сила B сохраняет своё направление, по-прежнему стремясь сместить корму влево.

Отметим, что при движении судна назад или при отсутствии движения попутный поток у винта отсутствует, поэтому сила B не возникает.

Таким образом на судне с одним винтом правого вращения сила B , возникающая благодаря влиянию попутного потока действует только при движении судна вперёд и, независимо от направления вращения винта стремится сместить корму в сторону левого борта.

Кроме попутного потока на работу винта оказывает влияние и близость поверхности воды и подсос воздуха к лопастям в верхней половине диска винта, независимо от направления его вращения. При этом лопасти в верхнем положении встречают меньше лобовое сопротивление, чем в нижнем. Вследствие этого возникает результирующая поперечная сила реакции воды D , всегда направленная в сторону вращения винта, т.е. при вращении по часовой стрелке- вправо, против часовой стрелки- влево. На судне с винтом правого вращения сила реакции воды D при работе винта вперёд стремится сместить корму вправо, а при работе назад-влево, независимо от направления движения судна. С уменьшением осадки кормы и, особенно при частичном оголении винта сила реакции D возрастает.

Таким образом, при движении судна вперёд и вращении винта вперёд силы B и D направлены в противоположные стороны, а при движении судна вперёд и вращении винта назад силы B и D складываются и стремятся развернуть корму в сторону левого борта.

Заканчивая рассмотрение сил и моментов на вращающемся гребном винте, необходимо отметить также, что вращающийся в любую сторону винт при его перемещении в поперечном направлении, т.е. по оси Y , испытывает значительно большее сопротивление со стороны воды, чем остановленный.

Поперечная составляющая скорости у винта появляется при движении судна с углом дрейфа на циркуляции или при плавании постоянным курсом с углом ветрового дрейфа и, в частности, при свободном дрейфе с остановленными машинами.

Последний случай имеет практическое значение при управлении судном. При наличии ветра судно с остановленными машинами дрейфует, обычно, приблизительно лагом к ветру. В этих условиях сила давления ветра уравновешивается гидродинамической силой на корпусе R_{ky} , т.е. силой сопротивления воды. Если же дать ход машине вперёд или назад, то вращающийся винт по сравнению с неподвижным будет испытывать повышенное боковое сопротивление воды. Это приведёт к смещению точки приложения силы R_{ky} в корму, а момент этой силы вызовет разворот носа судна в подветренную сторону.

Силы взаимодействия винтовой струи с рулём и корпусом судна. Гребной винт при вращении вперёд или назад не только отбрасывает поток воды в соответствующую сторону, но также и закручивает его, т.е. придаёт потоку воды не только аксиальную, но и тангенциальную скорость. При этом, независимо от направления работы винта, в верхней части диска тангенциальные скорости потока меньше, чем в нижней.

При работе винта правого вращения на передний ход закручивание потока приводит к косому натеканию воды на руль. Скос потока в верхней половине струи направлен вправо, а в нижней –влево. При этом скос потока в нижней части диска, благодаря повышенной тангенциальной скорости, бывает больше, чем в верхней. Если площадь пера руля, попадающая в струю от винта, распределяется одинаково между верхней и нижней половинами струи, то на не переложенный руль будет действовать результирующая сила набрасывания воды на руль C , стремящаяся переместить корму влево.

Часто на современных судах рули имеют клиновидную форму и располагаются за винтами таким образом, что в верхнюю половину струи попадает большая часть площади руля. Благодаря этому обстоятельству, сила C , стремящаяся при не переложенном руле переместить корму влево, частично или полностью компенсируются. Как показывают натурные на-

блудения, многие современные суда при циркуляции влево обладают несколько лучшей поворотливостью, чем при циркуляции вправо.

При вращении винта назад закрученный поток от винта набрасывается на кормовую часть судна. При этом, благодаря направлению закручивания потока против часовой стрелки, с правого борта под кормовым подзором создаётся повышенное давление воды, а с левого борта - пониженное. В связи с перепадом давления результирующая сила-сила набрасывания струи на корпус C_1 - всегда направлена влево, т.е. стремится развернуть корму в сторону левого борта.

Маневрирование одновинтового судна с учётом совместного влияния винта и руля.

Поведение одновинтового судна при выполнении различных манёвров определяется совместным влиянием момента руля и моментов сил B , C и D . Отметим некоторые особенности поведения такого судна с винтом правого вращения.

При движении вперёд после дачи заднего хода судно, обычно, начинает разворачиваться вправо, постепенно ускоряя разворот. Это происходит под действием сил B , C_1 и D , приложенных к кормовой части и направленных в сторону левого борта. При этом, даже при сохранении значительной скорости переднего хода, судно практически не слушает руля.

Если дать задний ход на остановленном судне, то корма, обычно, уклоняется влево под влиянием сил C_1 и D , а нос - вправо. Если при этом переложить руль вправо, то разворот судна, обычно, замедляется, а иногда не возникает совсем. После того, как судно приобретает некоторую скорость заднего хода, эффективность действия руля, обычно, несколько увеличивается. Если же при наличии скорости заднего хода застопорить винт, то многие суда при этом начинают удовлетворительно управляться рулём, что можно объяснить прекращением действия силы C_1 .

Если на остановленном судне дать передний ход двигателю, то судно, обычно, хорошо разворачивается в любую сторону после соответствующей перекладки руля.

Отмеченные особенности поведения одновинтовых судов следует рассматривать как наиболее типичные. В то же время встречаются суда, поведение которых существенно отличается от рассмотренных закономерностей. Кроме того, следует учитывать, что поведение судна, особенно, с большой парусностью, может резко измениться под влиянием ветра.

Управляемость одновинтового судна на заднем ходу значительно хуже, чем на переднем. Даже те суда, которые являются управляемыми на заднем ходу при тихой погоде, при слабом ветре становятся неуправляемыми. Основной причиной этого являются особенности в работе руля на заднем ходу, резко отличающиеся от его работы на переднем ходу.

Рассмотрим эти особенности. При движении судна назад с переложенным рулём набегающий поток воды создаёт поперечную силу на руле R_{py} , направленную в сторону того же борта, на какой переложен руль. На рис.1.71 показано направление этой силы при руле, переложенном влево.

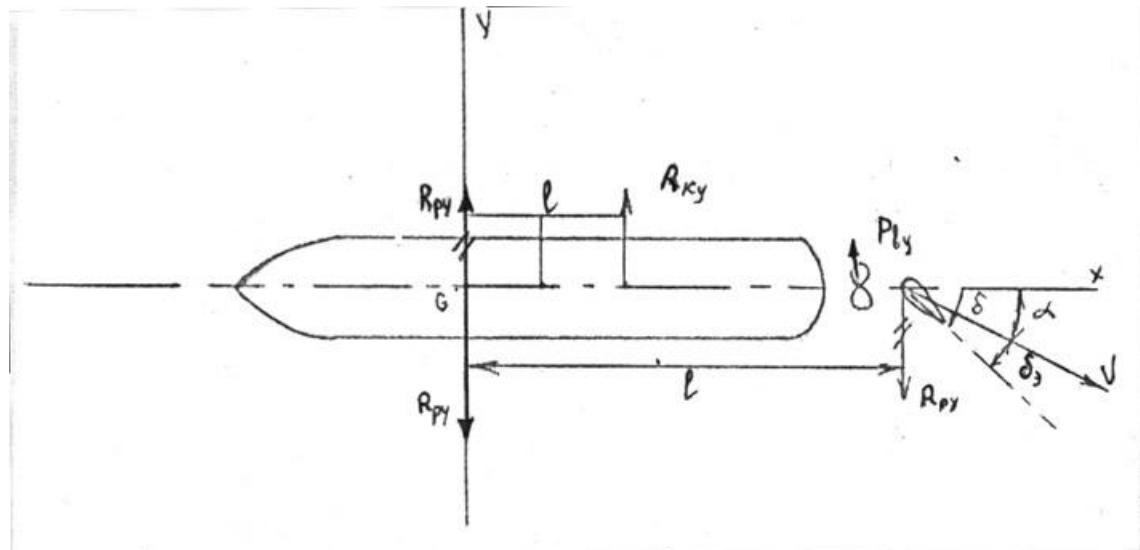


Рис.1.70. Управляемость на заднем ходу

Для объяснения возникающих при этом процессов приложим в центре тяжести G две силы, равные по величине силе R_{py} , и направленные в противоположные стороны. Такие две силы ничего не изменяют, так как взаимно компенсируют друг друга. Одна из этих сил вместе с силой руля R_{ry} образует пару сил с моментом $R_{py} * l_p$, стремящимся повернуть судно вокруг вертикальной оси, а другая сила вызывает поперечное смещение. При таком смещении возникает угол дрейфа α , благодаря которому на корпусе возникает поперечная гидродинамическая сила R_{py} , точка приложения которой смешена в сторону кормы, так как углы дрейфа в кормовой части больше по величине. Момент этой силы $R_{py} * l$ препятствует повороту в сторону перекладки руля. Если же на переднем ходу момент поперечной гидродинамической силы R_{py} в начале поворота имеет одинаковый знак с моментом руля и, следовательно, способствует повороту, то на заднем ходу момент препятствует повороту.

Кроме указанных причин, отрицательное влияние на поворотливость оказывает косое натекание воды на руль, за счёт чего эффективный угол перекладки руля δ , оказывается уменьшенным на угол дрейфа. На переднем ходу этот эффект оказывается гораздо меньше за счёт спроямляющего влияния на поток со стороны корпуса. Из-за того, что на заднем ходу руль находится впереди корпуса по направлению движения корпуса, поэтому он не оказывает влияния на поток, в месте расположения руля.

Косое натекание потока вызывает также появление поперечной гидродинамической силы на винте, так как вращающийся винт, как уже отмечалось, испытывает повышенное сопротивление со стороны воды при боковом перемещении. Момент этой силы также препятствует повороту. Перечисленными причинами объясняется плохая управляемость судов на заднем ходу.

Управление многовинтовыми судами.

Одновинтовые суда, по сравнению с многовинтовыми, в общем случае имеют более высокий пропульсивный КПД. Однако, управление такими судами в стеснённых условиях (например, в узостях, при выполнении швартовых операций, во льдах и т.п.) намного сложнее. Живучесть одновинтового судна ниже, чем многовинтового. Кроме того, на крупнотоннажных судах с повышенными скоростями технически затруднительно сосредоточить большую мощность на одном валу.

С учётом указанных и некоторых других обстоятельств на крупных пассажирских судах, обычно, применяются двух вальные установки. Трёх и четырех вальные установки находят применение на быстроходных судах большого водоизмещения и на ледоколах.

Для обеспечения симметричной управляемости винты двухвинтовых, а также бортовые винты у трех винтовых судов имеют противоположное направление вращения.

Винты двухвинтовых судов чаще имеют наружное на переднем ходу направление вращения, что уменьшает вероятность повреждения винтов плавающими предметами. Однако, с точки зрения повышения эффективности руля, расположенного в диаметральной плоскости, целесообразнее винты внутреннего вращения. На некоторых двухвинтовых судах для повышения поворотливости устанавливают два пера руля за винтами.

Двухвинтовое судно при выходе из строя одной машины или повреждении одного винта может двигаться и управляться с помощью руля и второго винта, а при выходе из строя рулевого устройства - сохраняет управляемость с помощью двух винтов. Кроме того, двухвинтовое судно может разворачиваться, практически, на месте за счёт работы винтов "враздрай". Разворачивающий момент при этом получается за счёт смещения винтов в разные стороны от ДП, т.е. наличия "плеча". Боковое перемещение кормы при этом увеличивается за счёт разности давлений воды у бортов кормового подзора, создаваемой противоположно направленными струями от винтов.

К недостаткам двухвинтовых судов следует отнести пониженную эффективность расположенного в ДП руля, особенно, в случае винтов наружного вращения, а также повышения опасности повреждения винтов о причал во время швартовых операций. Трех винтовые суда, как бы объединяют в себе маневренные свойства одно и двухвинтовых судов. Управляемость четырех винтовых судов соответствует управляемости двухвинтовых.

1.11. ВЛИЯНИЕ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ НА УПРАВЛЯЕМОСТЬ

Аэродинамические силы, действующие на судно. Сила ветра оценивается в баллах двенадцати бальной шкалы, помещенной в МТ-75 (табл. 49). Для каждого значения силы ветра, выраженной в баллах, в таблице приведены средние значения, а также нижние и верхние пределы скорости ветра, выраженные в м/с, км/час и в узлах. В таблице приведены также средние значения давления ветра на нормальную к ветру поверхность, выраженные в кгс/м².

Скорость ветра в судовых условиях измеряется над верхним мостиком с помощью анемометра. При этом измеряется непосредственно, так называемая, кажущаяся скорость ветра \bar{W} , вектор, который представляет из себя разность двух векторов – вектора истинного ветра \bar{W}_i и вектора скорости судна \bar{V} , т.е

$$\bar{W} = \bar{W}_i + \bar{V} \quad (1.69)$$

На неподвижном судне $\bar{W} = \bar{W}_i$

Вектор кажущегося ветра, помимо скорости, характеризуется курсовым углом q_w , т.е. углом между носовой частью диаметральной плоскости и кажущимся направлением ветра (за направление ветра принимается то, откуда дует ветер).

Курсовые углы измеряются от 0° до 180° вправо и влево от ДП. Равнодействующая сил давления ветра на надводную часть – аэродинамическая сила A , благодаря вытянутой форме надводной части судна (форма крыла), не совпадает в общем случае с направлением кажущегося ветра, а отклоняется в сторону траверзного направления.

При рассмотрении вопросов движения судна надводная и подводная части корпуса судна рассматриваются как крыло, обладающее двумя свойствами: точка приложения равнодействующей смещается к передней кромке по направлению движения; равнодействующая стремится по направлению к нормали к поверхности.

Под аэродинамическими силами и моментами понимают усилия, обусловленные перемещением судна относительно воздуха и приложенными к надводной части корпуса судна. Эти силы достигают значительных величин при наличии ветра. Они зависят от скорости ветра, скорости судна, площади и конфигурации надстроек, расположения и габаритов палубного груза, а также от угла между ветровым потоком и диаметральной плоскостью судна.

При решении большинства задач для математического описания сил от ветра мгновенное положение и скорость судна связывают с полем постоянного ветра, для чего используют понятия истинного и кажущегося ветра. Под истинным ветром понимают ветер в координатах связанных с Землей. Кажущийся ветер – это ветер в координатах, связанных с судном.

Только он определяет силы, действующие на судно. Его характеризуют величиной скорости W и курсового угла q_w (см. рис. 1.71.). При этом на надводной части корпуса возникает аэродинамическая сила R_a , продольная составляющая которой R_{ax} представляет собой силу лобового сопротивления, а поперечная сила R_{ay} вызывает боковое смещение и дрейф судна от ветра. Относительное смещение аэродинамической силы от мидельшпангоута (плечо аэродинамической силы в длинах корпуса) можно определить по формуле Федяевского:

$$\bar{\ell}_a = 0.25 + \frac{\ell_{un}}{L} - \frac{q_w^0}{360^\circ} \quad (1.70)$$

где L – длина судна между перпендикулярами, м;
 ℓ_{un} – отстояние центра парусности (ЦП) от мидельшпангоута, м;

q_w^0 – курсовой угол кажущегося ветра, градусов.

В формуле (1.70) плечо аэродинамической силы имеет знак "+", если ЦП смещен в нос от миделя и знак "-" при его смещении в сторону кормы. Следует заметить, что расположение ЦП по длине судна зависит от размеров и расположения надстроек, дифферента судна и его

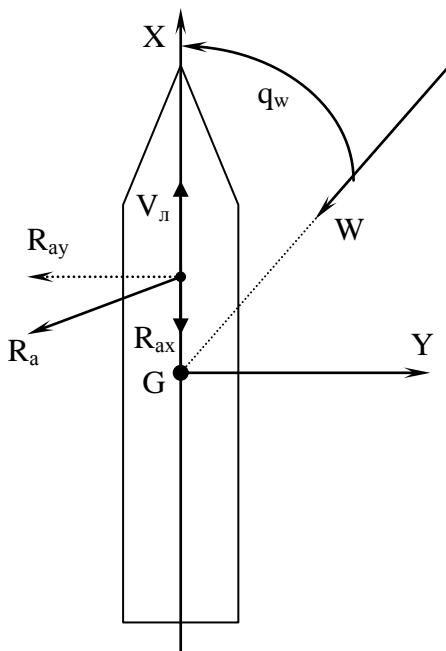


Рис. 1.70. Действие кажущегося ветра на судно

осадки. Эти данные обычно рассчитывают при постройке судна, и обычно имеется в судовых документах или может быть получен по запросу на заводе, который построил данное судно.

Таким образом на судно действует аэродинамическая сила, момент которой $M_a = R_{ay} \cdot \ell_a$, который стремится развернуть судно относительно вертикальной оси лагом к ветру. Поперечная составляющая R_{ay} вызывает боковое смещение со скоростью V_α . Из-за этого возникает ветровой дрейф судна величиной α (см.рис.1.71.), а перемещение судна относительно воды происходит по направлению равнодействующей скорости V .

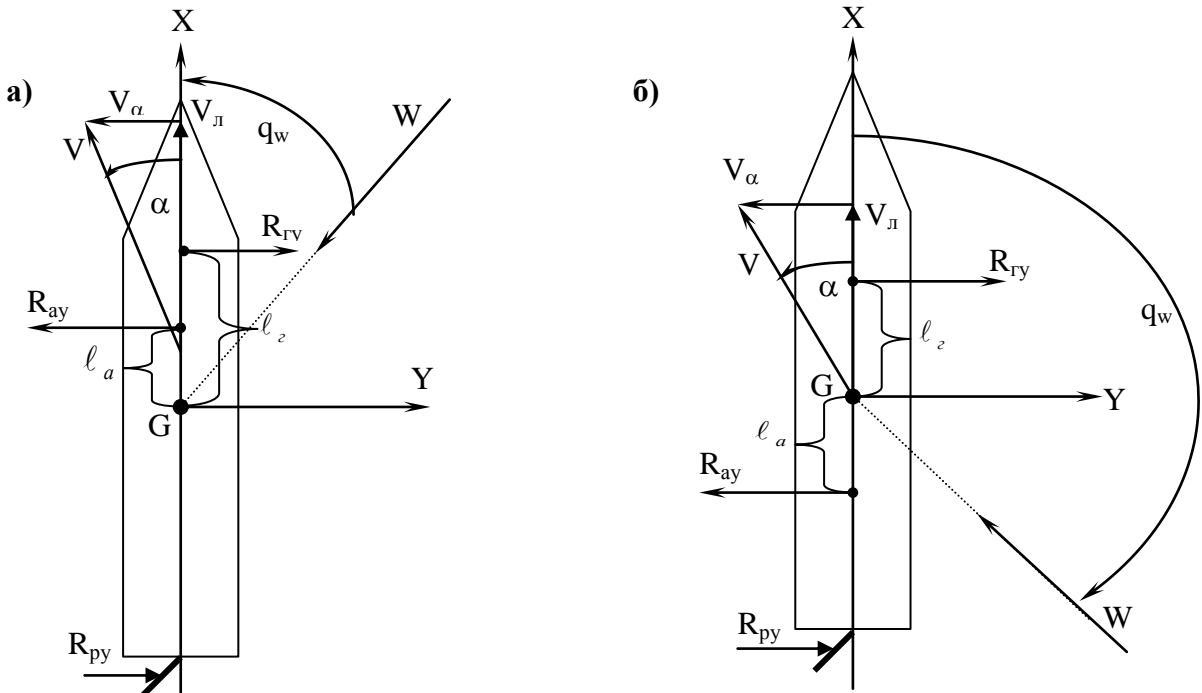


Рис.1.71. Действие кажущегося ветра на судно при различных курсовых углах ветра
а) при носовых курсовых углах; б) при кормовых курсовых углах

С появлением угла дрейфа на корпусе судна возникает гидродинамическая сила R_r , поперечная составляющая которой R_{ry} создает момент M_r . Указанный момент направлен в сторону, противоположную моменту аэродинамической силы. По этой причине для удержания судна на курсе необходимо переложить руль, для того, чтобы момент на нем компенсировал разность моментов аэро- и гидродинамических сил т.е. $M_p \geq M_a + M_r$. Когда это условие не выполняется, то наступает потеря управляемости. Плечо гидродинамической силы в безразмерном виде (в длинах корпуса судна) можно рассчитать по формуле:

$$\ell_e = 0.5 + \frac{\ell_{bc}}{L} - \frac{\alpha^0}{180^\circ} \quad (1.71)$$

где ℓ_{bc} - отстояние центра бокового сопротивления от мидель-шпангоута.

Угол ветрового дрейфа который возникает при этом, можно рассчитать по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = -0.11 + \sqrt{0.11^2 + (0.83 \cdot k_\alpha \frac{W}{V_\alpha})^2} \cdot \sin q_w \quad (1.72)$$

где V_α - скорость судна по лагу, узлы.

Значение коэффициента дрейфа k_α можно рассчитать по формуле:

$$k_\alpha = \sqrt{\frac{S_h}{S_P} (0.16 \cdot \delta_{op} - 0.5 \cdot T / L)} \quad (1.73)$$

где S_h - площадь проекции надводной части корпуса на ДП;

S_P - площадь проекции подводной части корпуса на ДП;

δ_{op} - коэффициент общей полноты;

T - средняя осадка, м;

L - длина судна между перпендикулярами, м.

Здесь площадь парусности выражается в м^2 , скорость кажущегося ветра в $\text{м}/\text{с}$, а сила R_{ay} в kN .

Чтобы не выполнять каждый раз громоздкие расчеты по формуле (1.72) для конкретных судов строятся специальные таблицы и номограммы, аргументами для входа в которые слу-

жат величины W , q_w , T_{cp} и V_l . Такие таблицы и номограммы позволяют определить угол дрейфа с точностью порядка $1^\circ - 1,5^\circ$.

В формуле 1.70 величина $\ell_{ц.п.}$ принимается положительной, если центр парусностимещен в нос от миделя и отрицательный при его смещении в корму. Знак величины ℓ_a аналогично указывает направление смещения точки приложения аэродинамической силы от миделя. Из приведенной формулы видно, что при курсовых углах приближающихся к 0° или 180° , точка приложения аэродинамической силы смещается в четверть длины судна соответственно в нос или в корму от центра парусности, т.е. навстречу направлению ветра.

Расположение центра парусности по длине судна $\ell_{ц.п.}$ зависит от размеров и расположения надстроек и других надводных частей, а также от дифферента судна и его осадки. Площадь парусности и положение центра парусности можно рассчитать по чертежу бокового вида судна с учетом масштаба. Таким образом, при наличии ветра на судно действует аэrodинамический момент M_a , стремящийся развернуть судно относительно вертикальной оси и поставить его лагом к ветру.

Условие сохранения управляемости при ветре и волнении. Как уже отмечалось, при сильном ветре и, соответственно, большом угле ветрового дрейфа, для удержания судна на курсе приходится перекладывать руль на значительный угол, чтобы скомпенсировать алгебраическую сумму моментов поперечных аэро- и гидродинамических сил. Наибольшей величины суммарный момент этих сил достигает при кормовых курсовых углах ветра, когда моменты M_r и M_a имеют одинаковые знаки. Условие сохранения управляемости для этого случая имеет вид:

$$M_a + M_r < M_p \quad (1.74)$$

Аэродинамический момент M_a , как уже отмечалось, пропорционален квадрату скорости ветра и зависит от курсового угла ветра; гидродинамический момент M_r пропорционален квадрату скорости судна, а момент руля M_p пропорционален квадрату скорости судна и углу перекладки руля δ . Поэтому решение уравнения (1.74) позволяет определить угол перекладки руля, необходимый для удержания судна на курсе при заданной величине отношения скоростей ветра и судна $\frac{W}{V}$ и данном курсовом угле ветра q_w .

В теории корабля существуют способы аналитического расчета величин, необходимых для определения моментов M_r и M_p , входящих в уравнение (1.74) и получения искомого угла перекладки руля. Однако следует отметить, что результаты получаются недостаточно надежными, т.к. зависимости этих величин от параметров корпуса и руля довольно сложны и еще не вполне изучены. Для судоводителя нужно знать, при каких условиях судно теряет способность удерживаться на заданном курсе.

Потеря управляемости характеризуется условием:

$$\delta_k + \delta_{уд} \geq \delta_{max} \quad (1.75)$$

где δ_k - требуемый угол перекладки руля для компенсации постоянного сноса;

$\delta_{уд}$ - необходимый угол перекладки, для удержания судна на курсе.

δ_{max} - максимальный угол перекладки для данного судна.

При этом значение $\delta_{уд}$ будет равным $\delta_{т.в}$ или δ_b в зависимости от погодных условий: $\delta_{т.в}$ – угол перекладки, необходимый для выравнивания рыскания судна на тихой воде; δ_b – угол перекладки, необходимый для выравнивания рыскания судна на волнении.

Угол $\delta_{т.в}$ для судов, обычно, невелик и колеблется в пределах $2-5^\circ$. Этот угол легко определить простым наблюдением. Угол δ_b рекомендуется принимать равным $10-15^\circ$.

На тихой воде, для удержания судна на курсе, манипулирование рулем будет происходить на угол $\delta_{т.в}$ вокруг нулевого положения руля и формула (1.75) примет вид $\delta_{уд} \geq \delta_{max}$.

При плавании в условиях ветра руль перекладывают на постоянный угол δ_k и манипулируют им вокруг этого положения на угол δ_b .

Значение W/V и q_w , при которых судно теряет управляемость при данных осадке и дифференте, можно определить экспериментальным путем. Для этого нужно выполнить ряд галсов, отличающихся по курсу на $20-30^\circ$ в условиях свежего и умеренного ветра. На каждом

из галсов нужно, постепенно снижая обороты и производя измерения скорости W и курсового угла q_w кажущегося ветра, зафиксировать по лагу скорость V , при которой судно перестает управляемость. Величины W/V и q_w , полученные из такого эксперимента, определяют условие потери управляемости при данных осадке и дифференте.

Таким образом, нет необходимости выполнять наблюдения в условиях штормового ветра. Это обосновывается тем, что потеря управляемости определяется не абсолютным значением скорости ветра, а отношением скорости ветра к скорости судна. При этом нужно только учитывать, что если наблюдения производятся при отсутствии значительного волнения, то считать, что судно потеряло управляемость нужно тогда, когда перекладка руля на угол δ_k не обеспечивает удержание судна на курсе, несмотря на то, что при большей перекладке руля судно еще продолжает управляемость. Если же руководствоваться перекладкой руля на максимальный угол δ_{max} , то это приведет к тому, что полученные результаты не будут оправдываться при плавании в условиях значительного волнения.

При этом ошибки кажутся, направленными в опасную сторону – судно будет терять управляемость при значениях W/V гораздо меньших, чем полученные из эксперимента.

Эксперименты следует выполнять для двух типичных состояний судна – в грузу и в балласте, а полученные результаты свести в таблицу, из которой можно было бы по заданному курсовому углу находить отношение W/V , при котором судно теряет управляемость.

1.12. Условие выполнения реверса на судах с различными пропульсивными комплексами.

Тормозные характеристики судов существенно зависят от типа силовой установки и движителя, что связано в различиями в возможности выполнения реверса, а также в мощности, развиваемой данным пропульсивным комплексом на заднем ходу. Чем быстрее выполняется реверс и чем больше мощность, подводимая к винту на заднем ходу, тем меньше время торможения и короче тормозной путь.

Для пропульсивных комплексов современных судов наиболее характерны следующие комбинации: двигатель внутреннего сгорания с винтом фиксированного шага (ДВС-ВФШ), паровая (газовая) турбина с винтом фиксированного шага (ТЗА-ВФШ), электродвигатель - ВФШ, а также различные силовые установки с винтом регулируемого шага (ВРШ).

Для большинства теплоходов (ДВС-ВФШ) характерен замедленный реверс при торможении с полного переднего хода. Это объясняется тем, что направление контр воздуха, подаваемого при реверсе в цилиндры, оказывается недостаточным для преодоления сопротивления, которое испытывает винт со стороны набегающего потока воды. Для большинства ДВС уверенный реверс возможен лишь тогда, когда обороты переднего хода, врачающегося в турбинном режиме винта (после прекращения подачи топлива), снижаются до 25-35% от оборотов полного переднего хода, что соответствует снижению скорости, примерно, до 60-70% от скорости полного переднего хода. При этом судно длительное время движется по инерции в режиме пассивного торможения и успевает пройти значительный путь, нередко превышающий путь активного торможения, поэтому полный тормозной путь оказывается довольно большим. Если же торможение выполняется при сниженной начальной скорости, например со среднего переднего хода (ПС), то реверс выполняется быстро – за 10-15 секунд, и путь торможения резко сокращается.

ДВС на заднем ходу развивают практически такую же мощность, как и на переднем.

На рисунке 1.72. показаны графики торможения $V(t)$, $S(t)$ и $n(t)$, построенные по результатам натурных испытаний т/х «Серов» (тип «Славянск»), $D=19500$ т, полученных при торможении с полного переднего хода ($V_0=16,4$ узл) полным задним ходом (ПП-ЗП).

На турбоходах при торможении используется турбина заднего хода, мощность которой составляет лишь около 50-60% от мощности турбины переднего хода, поэтому упор винта на заднем ходу сравнительно невелик.

Но реверс на полном ходу на полном ходу выполняется значительно быстрее, чем на теплоходах. Так, например, на турбоходах типа «Ленинский Комсомол», реверс с полного переднего хода около одной минуты. Благодаря указанным свойствам, тормозные пути турбоходов при торможении с полного переднего хода, обычно, бывают того же порядка, что и на теплоходах при прочих равных условиях. Однако, при малых начальных скоростях тормоз-

ные характеристики турбоходов из-за малой мощности турбины заднего хода значительно хуже, чем у теплоходов.

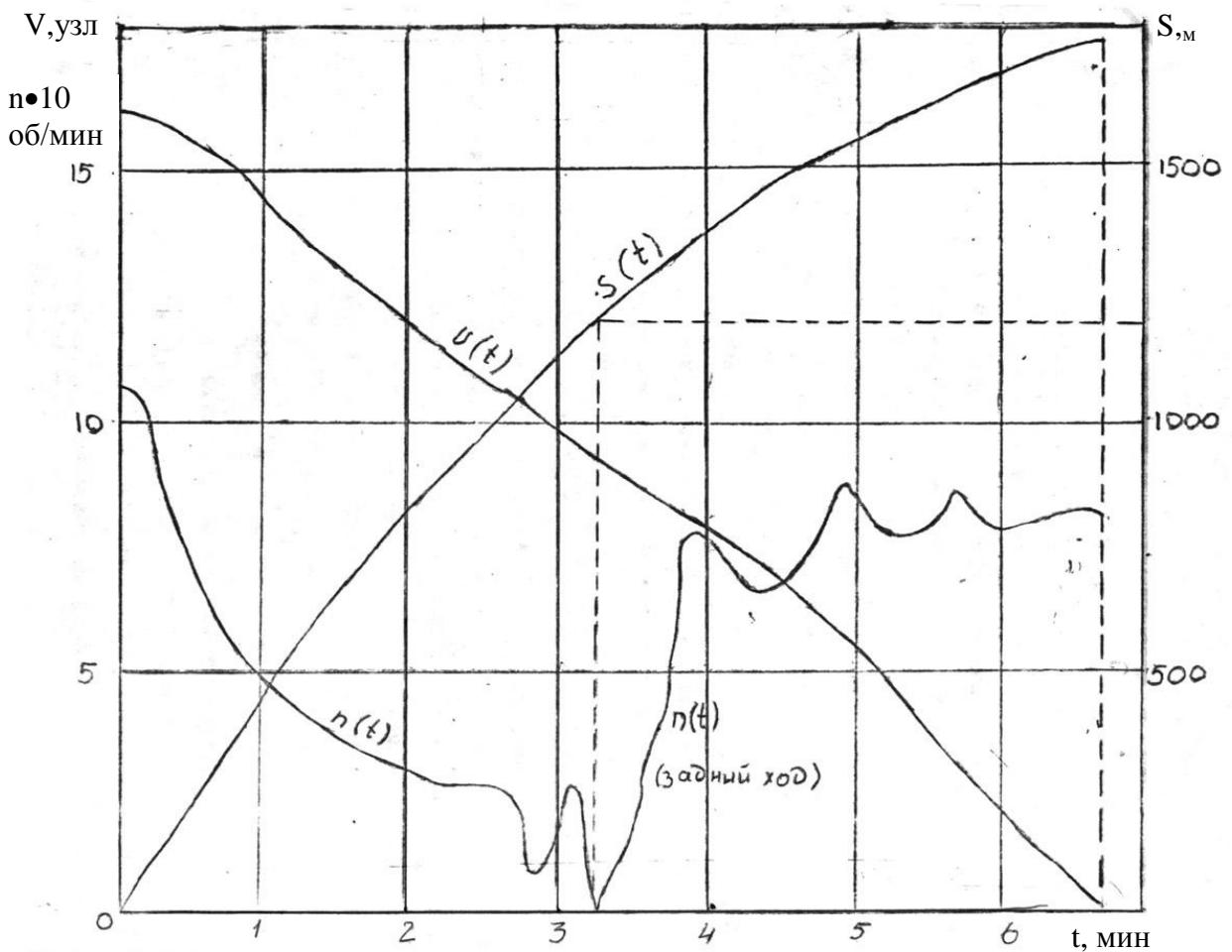


Рис. 1.72. Графики торможения $V(t)$, $S(t)$ и $n(t)$

Реверсивные характеристики электроходов, практически, мало отличаются от характеристик теплоходов.

Наилучшими реверсивными характеристиками обладают суда с винтами регулируемого шага (ВРШ). Торможение таких судов происходит в результате поворота лопастей винта без изменения направления вращения двигателя, а перемена направления упора происходит без уменьшения оборотов. В настоящее время имеются ВРШ с механизмами поворота лопастей, позволяющими изменить шаг винта с полного переднего хода на полный задний ход за 5-10 секунд, что обеспечивает резкое уменьшение тормозного пути.

Следует особо отметить тормозные характеристики судов, винты которых снабжены направляющими насадками. Такая насадка значительно повышает КПД тяжело нагруженных винтов на переднем ходу. Винт в насадке, по сравнению с аналогичным винтом без насадки, при одинаковой частоте вращения создает упор при торможении, приблизительно на 15% меньше, что заметно увеличивает путь активного торможения.

1.13. Расчетное определение коэффициента сопротивления и силы упора винта.

Формула (1.16), полученная в результате решения дифференциального уравнения движения для их практического применения требует знание коэффициента сопротивления k и силы упора винта P_{max} (последняя величина нужна для получения коэффициента активного торможения a).

На основе анализа результатов натурных наблюдений на судах, выполненных сотрудниками ОГМА в последние годы, получено выражение для определения коэффициента k :

$$k = 5889 + 0,654Q\sqrt{\frac{B}{T}} \quad (1.76)$$

позволяющее рассчитывать коэффициент сопротивления со стандартной относительной ошибкой около $\pm 3,4\%$.

Площадь смоченной поверхности с достаточной для практических целей точностью рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\Omega = D^{\frac{2}{3}} \left(4,854 + 0,492 \frac{B}{T} \right) \quad (1.77)$$

Сила упора винта P_{max} , которую развивает винт к моменту остановки судна относительно воды, т.е. когда скорость судна равна 0, является силой упора при нулевой поступи. Для изолированного, т.е., не связанного с корпусом винта, эта сила рассчитывается с учетом (19.6) по формуле:

$$P_{mb} = k_p \rho n^2 D_b^2 \quad (1.78)$$

где k_p – коэффициент упора винта на заднем ходу при нулевой поступи ($V=0$)

Коэффициент упора k_p выбирается из специальных диаграмм для расчета реверсирования винтов, либо рассчитывается по формуле:

$$k_p = \sqrt{\theta Z} \left(0,225 \sin^2 \frac{H}{D_b} + 0,098 \sin \frac{H}{D_b} \right) \quad (1.79)$$

Если гребной винт имеет направляющую насадку, то полученный по формуле (1.79) коэффициент k_p нужно уменьшить на 15%, т.е. умножить на 0,85.

В реальных условиях на величину силы упора при торможении оказывает влияние взаимодействие винта с корпусом судна. Как показал анализ натурных экспериментов, чем больше площадь погруженной части мидель-шпангоута по отношению к площадью диска винта, тем большую силу упора развивает винт при торможении. Влияние корпуса учитывается коэффициентом усиления упора $C_{y.y.}$, который рассчитывается по формуле:

$$C_{y.y.} = 0,508 + 0,106 \frac{S_\otimes}{Ad} (\sigma_{y.y.} \pm 12,3\%) \quad (1.80)$$

где S_\otimes - площадь погруженной части мидель-шпангоута (рассчитывается по формуле

$$S_\otimes = B \cdot T_{cp}).$$

Ad – площадь диска винта (рассчитывается по формуле $A_d = \pi D_b^2 / 4$).

Сила упора винта с учетом взаимодействия с корпусом рассчитывается по формуле:

$$P_{max} = P_{mb} C_{y.y.} \quad (1.81)$$

Полученная таким путем сила упора позволяет определить коэффициент активности торможения a , необходимый при решении дифференциальных уравнений, по которым рассчитывается время и путь второго и третьего периодов торможения.

В первом периоде торможения (период прохождения команды) скорость судна остается равной походной скорости V_0 , поэтому для расчета первого периода достаточно задаться временем прохождения команды t^I . Величину t^I рекомендуется принимать равной 5 секундам. Полное время и полный путь торможения определяют как сумму соответствующих значений по двум или трем периодам, в зависимости от используемого вида маневра.

Как показывает анализ точности расчетного метода тормозной путь второго периода (пассивное торможение) определяется со стандартной ошибкой $m_{oth}^{II} \approx 9,4\%$, а третьего периода $m_{oth}^{III} \approx 8,0\%$.

Точность расчета полного тормозного пути S зависит от соотношения между вторым и третьим участками тормозного пути. Стандартная ошибка расчетного значения полного тормозного пути определяется по формуле:

$$M_{oth} = \sqrt{\left(\frac{S^{II}}{S} m_{oth}^{II} \right)^2 + \left(\frac{S^{III}}{S} m_{oth}^{III} \right)^2} \quad (1.82)$$

Для реальных судов соотношение между участками пассивного и активного торможения в зависимости от типа двигателя и начальных условий колеблется в пределах от $\frac{S^{II}}{S} \approx 0,15$, $\left(\frac{S^{III}}{S} \approx 0,85 \right)$ до $\frac{S^{II}}{S} \approx 0,6$, $\left(\frac{S^{III}}{S} \approx 0,4 \right)$. Для этих условий стандартная относительная ошибка расчетного значения полного тормозного пути лежит в пределах $M_{oth} \approx 6,9-6,5\%$.

1.14. Универсальная диаграмма торможения и ее использование.

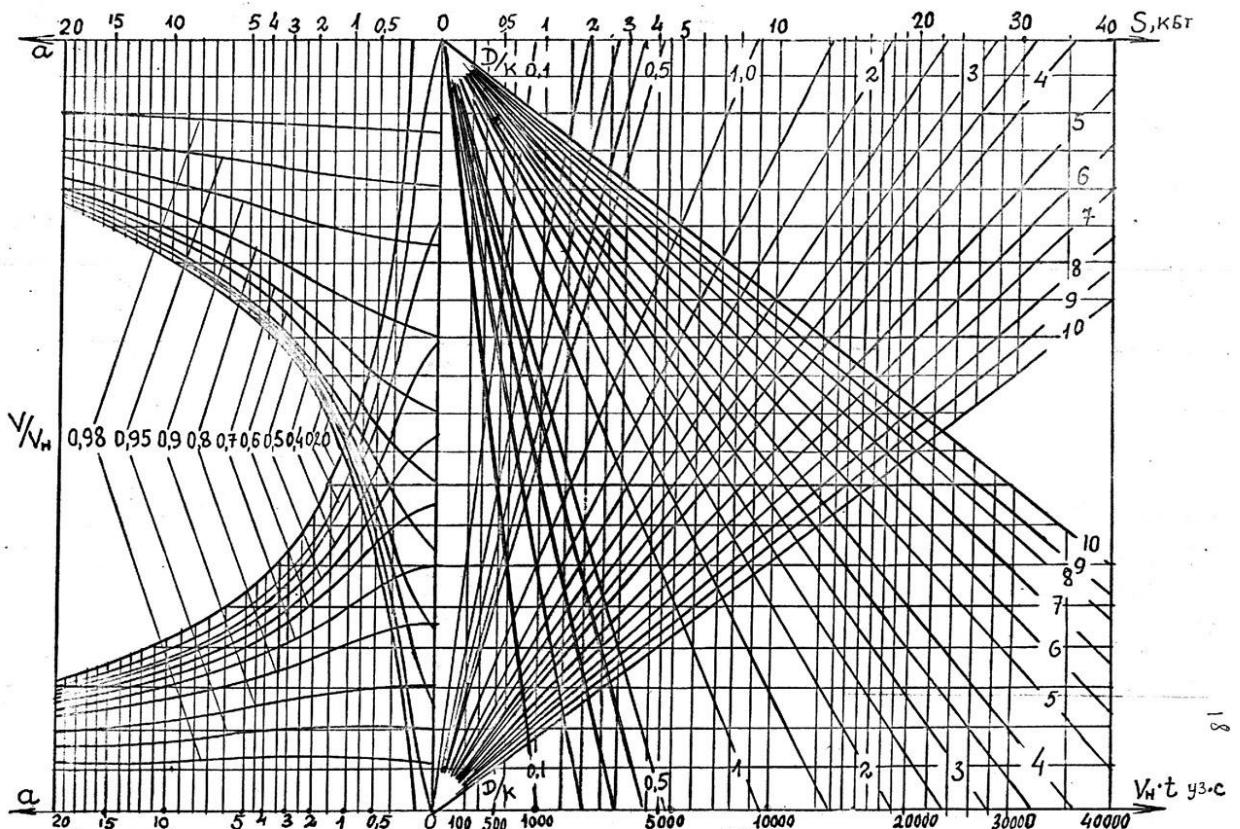


Рис.1.73. Универсальная диаграмма торможения

С целью избежания трудоемких вычислений по формулам профессором Деминым С.И. была построена универсальная диаграмма УД, приведенная на рисунке 1.73, позволяющая определять время и путь как пассивного, так и активного торможения.

Диаграмма состоит из двух частей – верхней и нижней. Нижняя часть служит для определения времени торможения t или, вернее, вспомогательного произведения $V_n t$, из которого затем определяют время торможения t путем деления произведения $V_n t$ на известную начальную скорость V_n (V_n выражена в узлах, а t – в секундах). В диаграмму входят с коэффициентом активного торможения a , после чего по относительной скорости и параметру D/k (D – водоизмещение в тоннах, k – коэффициент сопротивления). Таким образом, нижняя часть диаграммы связывает между собой четыре величины: $a - V/V_n - D/k - V_n t$ и, вообще говоря, позволяет определить каждую из этих величин, если известны три остальные. Отметим, что при расчете торможения до полной остановки, относительная скорость равна нулю, т.е. $V/V_n = 0$.

Верхняя часть диаграммы связывает между собой величины $a - V/V_n - D/k - S$ и предназначена для определения тормозного пути S , выраженного в кбт., а также позволяет определить каждую из этих четырех величин, если известны три остальные. При использовании УД нужно помнить, что при пассивном торможении коэффициент a всегда равен 0.

Под скоростью V_n подразумевается начальная скорость пассивного или активного торможения – в зависимости от периода, для которого определяются элементы торможения.

Для использования УД нужно сначала рассчитать коэффициент сопротивления k , параметр D/k и силу упора, а затем рассчитать коэффициент активного торможения a .

1.15. Экспериментально-расчетный метод определения коэффициента сопротивления и силы упора винта.

Точность определения элементов торможения существенно повышается, если воспользоваться экспериментально-расчетным методом для определения коэффициента сопротивления k и силы упора винта. Этот метод требует выполнения двух натурных экспериментов – пассивного и активного торможения, - по результатам которых определяется, соответственно значения k и P_{max} . Эксперименты производятся при произвольной осадке судна.

Эксперимент пассивного торможения выполняется с полного или полного маневренного переднего хода. По машинному телеграфу подается команда «стоп машина». После выполнения команды замечают по лагу начальную скорость судна V_h и V одновременно пускают секундомер. Судно удерживается на постоянном курсе с помощью руля.

После снижения скорости до какого-то, произвольно выбранного значения (снижение должно быть значительным, например, вдвое) снова замечают скорость и останавливают секундомер.

Таким образом, из эксперимента находят значение времени t , в течение которого скорость судна в режиме пассивного торможения снижается от начального значения V_h до V .

Полученные значения позволяют на основании формул для расчета пути и времени активного торможения:

$$t = \frac{m/k}{V_h} \left(\frac{V_h}{V} - 1 \right) \quad (1.83)$$

$$S = \frac{m}{k} \ell n \frac{V_h}{V} \quad (1.84)$$

рассчитать коэффициент k :

$$k = \frac{m}{t V_h} \left(\frac{V}{V_h} - 1 \right) \quad (1.85)$$

Проще всего эта задача решается по УД. Для этого сначала рассчитывается вспомогательное произведение $V_h t$ и относительную скорость V/V_h и по ним, с учетом, что при пассивном торможении $a=0$, с нижней части диаграммы снимаем экспериментальное значение параметра $(D/k)_s$, после чего получают коэффициент k , по формуле:

$$k_s = \frac{D}{(D/k)_s} \quad (1.86)$$

Отметим, что значения $(D/k)_s$ и k , соответствуют осадке, при которой выполнялся эксперимент.

Эксперимент активного торможения выполняется с полного маневренного или среднего переднего хода. По машинному телеграфу подается команда «полный назад». В момент реверсирования двигателя (стрелка тахометра проходит 0) замечают начальную скорость активного торможения V_h и пускают секундомер. Руль ставят в положение «прямо». Замечают и записывают число оборотов винта, развиваемое двигателем на заднем ходу $n_{z.x}$. В момент остановки судна относительно воды останавливают секундомер.

На эксперименте активного торможения получают значение времени t , в течение которого в режиме активного торможения при данной частоте вращения винта $n_{z.x.}$, тормозиться от начальной скорости V_h до полной остановки. Затем по вспомогательному произведению $V_h t$ и параметру $(D/k)_s$, полученному из первого эксперимента, а также с учетом относительной скорости $V/V_h=0$ получают с нижней части Уд экспериментальное значение коэффициента активного торможения a_s , после чего рассчитывают экспериментальное значение силы упора по формуле:

$$P_{max}^s = a_s k \left(0,514 V_h \right)^2, \quad (1.87)$$

где V_h – начальная скорость активного периода, узлы.

Полученное значение P_{max}^s соответствует той осадке и тем оборотам винта, при которых выполнялся эксперимент.

Пересчет коэффициента k_s и сила упора P_{max} для любых заданных условий выполняется по переходным коэффициентам, которые рассчитываются следующим образом.

По расчетным формулам находят значение коэффициента сопротивления для той осадки, при которой выполнялся эксперимент, а затем определяют коэффициент перехода γ_k по формуле:

$$\gamma_k = \frac{k_3}{k_{\text{расч}}} \quad (1.88)$$

Теперь можно получать экспериментально-расчетные значения коэффициента сопротивления для любой заданной осадки по формуле:

$$k_{\text{зп}} = \gamma_k \left(5880 + 0,654 \Omega \sqrt{\frac{B}{T}} \right) \quad (1.89)$$

Для пересчета силы упора P_{max}^3 сначала определяют расчетную силу упора винта $P_{\text{max}}^{\text{расч}}$ так, как это было изложено ранее. Сила $P_{\text{max}}^{\text{расч}}$ определяется для того же числа оборотов $n_{\text{з.х.}}$, какое было при эксперименте. А затем определяют коэффициент перехода γ_p по формуле:

$$\gamma_p = \frac{P_{\text{max}}^3}{P_{\text{max}}^{\text{расч}}} \quad (1.90)$$

После этого можно получить экспериментально-расчетное значение силы упора $P_{\text{max}}^{\text{зп}}$ для любого числа оборотов и любой осадки судна по формуле:

$$P_{\text{max}}^{\text{зп}} = \gamma_p P C_{y,y} = \gamma_p P_{\text{max}}^{\text{расч}} \quad (19.14)$$

По полученным значениям $k_{\text{зп}}$ и $P_{\text{max}}^{\text{расч}}$ рассчитывают для заданных условий параметр D/k и коэффициент активного торможения a , позволяющие определить по УД элементы торможения для любых начальных условий.

Как показывает анализ точности экспериментально-расчетного метода, тормозной путь второго периода определяется со стандартной ошибкой $m_{\text{отн}}^{\text{II}} \approx 7,4\%$, а в третьем периоде $m_{\text{отн}}^{\text{III}} \approx 5,4\%$. Стандартная ошибка экспериментально-расчетного значения полного тормозного пути полученная по формуле (19.7) находится в пределах $M_{\text{отн}} \approx 4,7-4,9\%$.

Список литературы.

1. Управление судном: Учебник для Вузов/Под редакцией В.И. Снопкова.-М.: Транспорт, 1991.-359 с.
2. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания./Под ред. Я.И. Войтунского.-Л.: Судостроение, 1985.-544 с.
3. Васильев А.В. Управляемость судов.-Л.: Судостроение, 1989.-328 с.
4. Практическое кораблестроение. Книга 2./Под ред. А.П. Михайловского.-Л.: ГУНиО МО СССР, 1988. 271 с.
5. Управление судном и его техническая эксплуатация. / Е.И. Жуков, М.Н. Либензон, М.Н. Письменный и др. -М.: Транспорт, 1983.-655 с.
6. Graham Danton. The theory and practice of seamanship. London, 1996. - 522 p.
7. Nathaniel Bowditch. The American practical navigator.(An epitome of navigation). 1995.-481 p.
8. Овчинников П.Ф. Математическое моделирование систем механики, электромеханики и автоматики. -К.: ИСИС, 1994.-236 с.
9. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна. Одесса. :ОГМА, 1998 .-68 с.
10. Воеводин В.В. Линейная алгебра. -М. :Наука, 1980. - 400 с.
11. Растрогин Л.А. Система экстремального управления. -М.: Наука, 1974. - 632 с.
12. Мальцев А.С. Управление движением судна.-Одесса.: Весть, 1995.-235 с.
13. Кондрашихин В.Т. и др. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания.-Одесса.: Маяк, 1991.-210 с.