

ГРЕБНЫЕ ВИНТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА

Устройство и эксплуатация



Одесса 2002

ГРЕБНЫЕ ВИНТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА

Устройство и эксплуатация

Гребные винты регулируемого шага. Устройство и эксплуатация. Учебное пособие / Н. Г. Ермошкин, В. Н. Калугин, В. В. Пономаренко, Ю. В. Пащенко, В. К. Рябченко; под общей ред. А. Н. Пипченко. Одесса. - 143 стр.

В учебном пособии освещены вопросы устройства и эксплуатации наиболее распространенных по конструктивному исполнению ВРШ и систем управления.

Рассмотрены особенности работы ВРШ в составе судового пропульсивного комплекса. Дан анализ характерных неисправностей, способов их диагностирования и устранения.

Рекомендовано Ученым советом Одесской государственной морской академии в качестве учебного пособия для курсантов судомеханической и судоводительской специальностей, а также судовых механиков, судоводителей и других специалистов, связанных с эксплуатацией судов с ВРШ, протокол № 10 от 29.07.2000 г.

Одобрено Государственной квалификационной комиссией судовых механиков (электромехаников) как учебное пособие для курсов переподготовки, повышения квалификации и проверки компетентности судовых специалистов, протокол № 7/2002.

Рецензент: к.т.н., доцент М. А. Колегаев

Технический редактор: К. К. Горская

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 5 |
| 1 ВВЕДЕНИЕ | 7 |
| 1.1 История объекта..... | 7 |
| 1.2 Область использования ВРШ..... | 9 |
| 1.3 Экономические факторы..... | 11 |
| 2 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВРШ | 13 |
| 2.1 Работа на швартовах | 13 |
| 2.2 Маневрирование..... | 17 |
| 2.3 Авторотация (режим гидротурбины) | 17 |
| 2.4 Особенности применения | 21 |
| 2.5 Работа на задний ход | 21 |
| 2.6 Работа при нулевом упоре | 22 |
| 2.7 Работа на полную мощность | 22 |
| 2.8 Экстренная остановка с полного хода | 23 |
| 3 ЛОПАСТИ ВРШ И ГЕОМЕТРИЯ ИХ ПРОФИЛЕЙ | 27 |
| 3.1 Определения | 27 |
| 3.2 Профили сечения лопасти | 28 |
| 3.3 Конструктивный шаг | 29 |
| 3.4 Изменение шага винта поворотом лопастей | 32 |
| 3.5 Скос | 38 |
| 3.6 Откидка лопасти | 39 |
| 3.7 Контуры и площади поверхности лопасти | 40 |
| 4 СИЛЫ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЛОПАСТИ | 42 |
| 4.1 Упор и крутящий момент | 42 |
| 4.2 Центробежные усилия | 43 |
| 4.3 Крутящий момент на цапфе лопасти | 44 |
| 4.4 Лопасты со скосом | 48 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5 ТИПИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВРШ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ДЕЙСТВИЯ | 50 |
| 5.1 Малоразмерные ВРШ с управлением из корпуса судна | 50 |
| 5.2 Большие ВРШ с размещением сервомотора в ступице | 54 |
| 5.3 Ступицы с сервомоторами двойного действия | 64 |
| 5.4 Флюгерно-реверсивные гребные винты | 67 |
| 5.5 Гребные винты переменного шага с изменяющимся углом установки лопастей | 68 |
| 5.6 Материалы | 71 |
| 6 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ..... | 75 |
| 6.1 Системы гидравлики | 75 |
| 6.2 Автоматизация управления | 82 |
| 7 УСТАНОВКА И НАСТРОЙКА ВРШ НА СУДНЕ..... | 93 |
| 7.1 Особенности выбора ВРШ | 93 |
| 7.2 Наладка ВРШ при заводских испытаниях | 95 |
| 8 ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВРШ | 100 |
| 8.1 Основные правила использования | 100 |
| 8.2 Локализация и устранение неисправностей | 107 |
| 8.3 Техническое обслуживание | 111 |
| 8.4 Проблемы кавитации, вибрации и шума..... | 119 |
| 9 ТЕНДЕНЦИИ БУДУЩЕГО | 140 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 142 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Винт наряду с главным двигателем и корпусом судна является основной составляющей пропульсивного комплекса и во многом определяет не только надежность и безопасность мореплавания, но и экономичность работы судна в целом. Пополнение Мирового флота специализированными судами с высоким уровнем энергоемкости и автоматизации обостряет проблему экономических потерь, связанных с неправильной эксплуатацией и вынужденными незапланированными простоями.

В то же время принятие мер по предотвращению, восстановлению или поддержанию работоспособности движителей при нахождении судна в море без систематизированных разработок, освещающих эти вопросы в технической литературе, практически невозможно.

В связи с изложенной проблемой настоящая книга является важной и своевременной.

Коллективу авторов во главе с кандидатом технических наук доцентом Калугиным Владимиром Николаевичем пришлось изрядно потрудиться над ее содержанием, в основу которого они положили книгу Кита Браунли «Гребные винты регулируемого шага», изданную Международным институтом морских инженеров, а также сведения из многочисленных публикаций журнала «Marine Engineers Review» по данному вопросу.

Можно с уверенностью сказать, что качество изложения этой книги не было бы достигнуто, если бы авторы не воспользовались помощью специалиста в области эксплуатации судовых пропульсивных комплексов кандидата технических наук, доцента Брыля Артура Ивановича и кандидата филологических наук Богомолова Олега Семеновича, общепризнанного знатока и талантливого переводчика английских технических текстов.

Кропотливая работа кандидата технических наук, доцента Виктора Константиновича Рябченко и всесторонняя поддержка кандидатов технических наук Николая Георгиевича Ермошкина, Виталия Владимировича Пономаренко и Юрия Викторовича Пашенко обеспечили выход в свет этой книги.

Её отличительной особенностью является эксплуатационная направленность. В книге обобщен опыт эксплуатации ВРШ и систем

управления, показаны особенности действия ВРШ в составе пропульсивного комплекса и его влияние на маневренные характеристики судов различного назначения. Приведен анализ причин характерных неисправностей и повреждений ВРШ и систем управления, а также способы их диагностирования и устранения. Кроме того, рассмотрены условия возникновения различных видов кавитации; причины повышенного шума и вибрации гребных винтов; приведены рекомендации по локализации и устранению этих негативных факторов при проектировании, доводке и в процессе эксплуатации ВРШ.

Простота изложения сложных проблем не требует углубленной предварительной подготовки и книга может служить источником полезной информации для широкого круга специалистов в вопросах проектирования и технической эксплуатации ВРШ.

Я выражаю признательность авторам за то, что они дали мне эту книгу для общей редакции, и уверен, что она найдет достойное место в библиотеке судовых специалистов.

MIMAREST, CHIEF EL.ENG.
Профессор

А. Н. Пипченко

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 История объекта

В винтах регулируемого шага (ВРШ) лопасти синхронно разворачиваются вокруг собственных осей, перпендикулярных гребному валу. При этом изменяется и шаг винта. Диапазон углов разворота лопастей позволяет изменять направление упора винта с переднего на задний ход судна, не меняя направление его вращения.

ВРШ были впервые применены на парусных судах, оборудованных вспомогательной паросиловой установкой. Самые первые такие суда зачастую оборудовались гребными винтами, которые поднимались из воды, когда судно шло под парусами, для того, чтобы уменьшить сопротивление движению (именно тогда и появилась команда «Дымовую трубу – вверх, гребной винт – вниз»). Требовалось проявление большой изобретательности при установке или демонтаже этих гребных винтов всякий раз, когда вспомогательные двигатели должны были запускаться в действие или прекращать свою работу. Выполнение таких операций в море представляло собой задачу огромной трудности, и во избежание этого были разработаны такие конструкции гребных винтов, в которых лопасти могли устанавливаться во «флюгерный» режим работы, то есть могли быть повернуты в такое положение, в котором их сопротивление было минимальным. Механизмы имели простое устройство, забортные части, погруженные в воду, не предусматривали их смазку. Такие гребные винты позволяли изменять свой шаг только тогда, когда винт не вращался, а гидродинамическая нагрузка была минимальной. Они имели низкую надежность, поэтому в настоящее время такие гребные винты используются лишь на некоторых яхтах малого водоизмещения.

Прошло много лет прежде чем появились ВРШ, способные изменять шаг и во время своего вращения. В начале 20 века в качестве судовой энергетической установки стали использоваться дизельные двигатели и возникла потребность в ВРШ как средстве реверсирования и улучшения маневренных качеств. В 1903 году фирма «Вичманн», в настоящее время входящая в состав компании «Вяртсила НДС», ввела в эксплуатацию на малых судах дизельный пропульсивный комплекс, который включал в свой состав ВРШ. В 1908 году ВРШ фирмы «Эшер-Висс» был установлен на голландской дизельной шхуне «Сан Антония». Эти ВРШ первых конструк-

ций имели простые механические устройства изменения шага лопастей с ручным управлением и использовались преимущественно на траулерах и других малых судах.

В 20-е годы в Швеции и Швейцарии были разработаны большие гидротурбины типа «Каплан» для гидроэлектростанций. Турбины «Каплан» преимущественно использовались при высоких расходах и низких напорах воды. Рабочее колесо переменного шага «Каплан» непосредственно приводило в действие малооборотный генератор и имело гидравлический сервомотор для управления положением лопастей, что очень близко по своим требованиям к конструкции ВРШ. В 1928 году фирма «Вичманн» ввела в эксплуатацию первый ВРШ с гидроприводом на небольшом пассажирском теплоходе «Этцель». В 1937 году вводится в эксплуатацию гребной винт фирмы «Ка Ме Ва», основанный на конструкции турбин «КМВ Каплан». Этот гребной винт был установлен на судне «Суэция», принадлежавшем компании «Джонсон Лайнз». Это было первое судно дальнего плавания, оборудованное ВРШ.

Диаметры ступиц ВРШ составляли около 30% диаметра гребного винта и были больше диаметров ступицы винтов фиксированного шага (ВФШ), которые обычно составляли около 20% диаметра гребного винта. Это не имело большого значения там, где гребной винт был установлен в окне ахтерштевня, в частности, на тихоходных каботажных судах того времени, имевших «парадный» ход 8 – 12 узлов. ВРШ показали себя достаточно надежными в эксплуатации и были признаны классификационными обществами и судовладельцами. Впоследствии они начали устанавливаться на многих судах малого плавания с дизельной силовой установкой для улучшения их маневренности.

После Второй Мировой войны интерес к ВРШ возрос и сегодня ими оборудуются многие типы судов. В частности, применение газовых турбин в качестве главных двигателей на быстроходных военных кораблях привело к широкому распространению ВРШ большой мощности, являющихся эффективным средством реверсирования и высокой маневренности.

Сегодня около 25% всех вновь построенных торговых судов оборудованы ВРШ и наблюдается тенденция к росту их числа, хотя для некоторых типов судов растёт конкуренция со стороны гребных

электродвигателей с регулируемой частотой вращения, приводящих в действие ВФШ.

Самый крупный ВРШ, построенный к настоящему времени, имеет диаметр 11 метров. Этот трехлопастный гребной винт потребляет 11400 кВт при довольно низкой частоте вращения - 45 мин^{-1} .

Максимальные мощности, при которых используются ВРШ: 37000 кВт на военных кораблях и 34000 кВт на торговых судах.

1.2 Область использования ВРШ

Возможности использования ВРШ определяются их свойствами, которые рассмотрены в главе 2. Повышенная тяга на гаке и способность использовать полную эксплуатационную мощность двигателя при различных скоростях хода и сопротивлениях движению судна снискали ВРШ популярность при их использовании на буксирах, рыбопромысловых и других типах судов, работающих как в режиме хода без веза, так и в режиме буксировки. Для этих судов высокая маневренность, обеспечиваемая ВРШ, является одним из преимуществ.

С целью дополнительного увеличения тяги на гаке при ограниченных диаметрах винтов ВРШ часто размещают в направляющих насадках. При размещении в направляющей насадке оптимальный диаметр гребного винта уменьшается на 10-15%. С учетом этого уменьшения диаметра использование направляющей насадки обычно повышает силу тяги при работе на швартовых на 15-20%.

Способность создавать большую силу тяги на малой скорости движения судна также делает ВРШ удобными для использования на судах, которые, в силу специфики своей работы, должны удерживаться в заданном динамическом положении с помощью гребных винтов и подруливающих устройств. Для этих целей гребные винты устанавливаются в направляющей насадке. ВРШ часто устанавливаются в поворотных движителях и туннельных подруливающих устройствах.

ВРШ эффективно используются также на судах со вспомогательными парусами, у которых потребная сила тяги, создаваемая гребными винтами, варьируется в зависимости от силы и направления ветра.

Способность ВРШ обеспечивать отличные маневренные качества судна, особенно на двухвинтовых установках в сочетании с

туннельными подруливающими устройствами, объясняет причину их широкого применения там, где требуется частое маневрирование в стесненных условиях. Морские паромы, работающие на коротких линиях и делающие несколько заходов в порт ежедневно, по этой причине, часто оборудуются ВРШ. Этот же тип гребных винтов устанавливается обычно на судах снабжения, работающих в условиях прибрежного плавания, которые должны становиться и удерживаться в определенном положении при различных погодных условиях, включая штормовые.

Способность ВРШ переводить судно на задний ход, не меняя направления своего вращения, привела к их широкому применению на газотурбоходах. На многих современных двухвинтовых военных кораблях каждый гребной винт приводится одним или более дизелями или газовыми турбинами для обеспечения малых мощностей и ускорительными газовыми турбинами, если требуется развитие большой мощности. Они представляют собой комбинированные газотурбинные ЭУ с маршевой и ускорительной газовыми турбинами, работающими на полном ходу совместно; комбинированные газотурбинные ЭУ с маршевой газовой турбиной, работающей только до крейсерского хода, и газовой турбиной полного хода. Это могут быть также комбинированные дизель-газотурбинные ЭУ с маршевым дизелем и ускорительной газовой турбиной, работающими на полном ходу совместно, и комбинированные дизель-газотурбинные ЭУ с дизелем, работающим только до крейсерского хода, и газовой турбиной полного хода. Иногда маршевый и ускорительный двигатели приводят отдельные гребные винты, например, два дизель-приводных ВРШ по бортам, а в центре один ВФШ, приводимый газотурбинной установкой.

Гибкость ВРШ дает ему возможность максимально эффективно использовать различные режимы работы. Военные корабли, проводящие большую часть времени в море, крейсируя на малых скоростях, как правило, используют один валопровод, оставляя другой винт в режиме свободного вращения или в флюгерном режиме с целью экономии топлива и моторесурса.

Таким образом, ВРШ нашли широкое применение. Сегодня конкуренцию им составляют лишь ВФШ, приводимые гребными электродвигателями переменного тока с регулируемой частотой вращения.

1.3 Экономические факторы

При выборе пропульсивного комплекса для нового судна учитывается много факторов. Не все из них могут быть объяснены только финансовыми соображениями, поэтому применяемый метод оценки должен учитывать как стоимость, так и маневренность, надежность, удобство обслуживания, шумность, подготовленность экипажа и воздействие на окружающую среду.

Многие из этих факторов могут быть выражены в стоимостных эквивалентах, если принимать во внимание их влияние на конструкцию или эксплуатацию судна. Размеры, вес и размещение механизмов также оказывают влияние на конструкцию судна и грузопместимость, что может быть выражено в стоимости судна и эксплуатационных расходах. Расход топлива влияет как на затраты на топливо, так и на запасы топлива, которые необходимо иметь на борту судна.

Следует производить сравнительную калькуляцию затрат для альтернативных пропульсивных комплексов на весь срок службы. Эта калькуляция включает затраты на:

- приобретение (судна);
- топливо;
- планово-предупредительное техническое обслуживание;
- внеплановое техническое обслуживание;
- запасные части и ремонт.

Прогнозируя затраты на планово-предупредительное и внеплановое техническое обслуживание, а также на запасные части и ремонт, следует учитывать надежность оборудования. Необходимо обращаться к фирмам-изготовителям оборудования с требованием о предоставлении информации о надежности и удобстве обслуживания. Важно определить, где полная и объективная информация, а где информация имеет рекламный характер; в противном случае легко прийти к ложным выводам.

Прежде чем делать какое-либо сравнение альтернативных гребных установок, следует знать условия эксплуатации судна (количество часов работы за год на разных уровнях эксплуатационных мощностей). Если судно может использоваться для выполнения различных функций, то возникает необходимость рассмотрения альтернативных профилей эксплуатации.

В некоторых случаях требования, предъявляемые к судну, могут ограничивать выбор пропульсивного комплекса. Например, судно должно обладать высокой маневренностью или способностью к длительной работе на малых скоростях. Даже когда в изложении требований не содержится ограничений выбора, следует принимать во внимание преимущества высокой маневренности и низких эксплуатационных расходов судна.

Теоретические исследования, проводимые для оценки относительных достоинств разных пропульсивных комплексов, не могут прогнозировать действительные издержки в эксплуатации. Тем не менее, если сделаны последовательные и разумные предположения, а использованные данные о разных системах сопоставимы, то полученные результаты также должны быть сопоставимы и представлять надежную основу для принятия обоснованных решений.

Коэффициент полезного действия винта обычно увеличивается за счет применения гребных винтов бóльшего диаметра и снижения частоты вращения. Диаметр гребного винта ограничивается условиями размещения его за корпусом судна, так как необходимо поддерживать достаточный зазор между верхней кромкой лопасти гребного винта и корпусом судна, чтобы уменьшить ударные импульсы о корпус судна масс воды, отбрасываемых лопастями. Если лопасти винта имеют большой скос, то величина зазора может быть меньше, чем у винтов с лопастями, не имеющими скоса, при одном и том же уровне ударных импульсов. Подробнее см. разделы 7.1 и 8.4.

Использование гребного винта большого диаметра при низкой частоте вращения означает утяжеление гребного винта, увеличение диаметра гребного вала и размеров редуктора и, как следствие, ведет к увеличению начальной стоимости судна. Это частично компенсируется сокращением расходов на топливо и окупается в течение нескольких лет эксплуатации.

2 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВРШ

Изменение шага лопастей дает возможность ВРШ изменять потребляемый крутящий момент и упор при постоянной частоте вращения. Свойства ВРШ и их особенности в различных режимах рассмотрены ниже.

2.1 Работа на швартовах

Швартовый режим определяется работой судна, при которой скорость его равна нулю, а сила упора винта направлена вперед. Суда обычно не работают в таком режиме, но приближаются к нему при выполнении буксировочных работ. При этом развиваемый упор винта значительно выше, чем в режиме полного свободного хода. Их отношение определяют буксировочные способности судна.

Упор T , развиваемый гребным винтом судна, особенно при работе на швартовах, больше полезной тяги винта F_{p0} , потому что перед гребным винтом создается область низкого давления, которая вызывает засасывание воды в кормовой части корпуса судна. Поэтому,

$$F_{p0} = T(1-t),$$

где: t - коэффициент засасывания, который в швартовном режиме обычно имеет значение 0,02-0,03, хотя может быть и выше.

На рис. 1 показана зависимость от частоты вращения мощности для ВФШ двухвинтового судна.

Без веза гребной винт работает по кривой на свободном ходу. При швартовном режиме гребной винт потребляет больше мощности, чем без веза, при любой частоте вращения. На рис. 1 показаны также кривые максимальных мощностей для среднеоборотного дизеля.

Предположим, что гребной винт сконструирован для работы в режиме холостого хода, то есть, он использует почти полную мощность двигателя при полной скорости хода без веза. В таком случае располагаемая мощность в режиме тяги на гаке или на малом ходу существенно снижается.



Рис. 1. Зависимость мощности от частоты вращения ВФШ

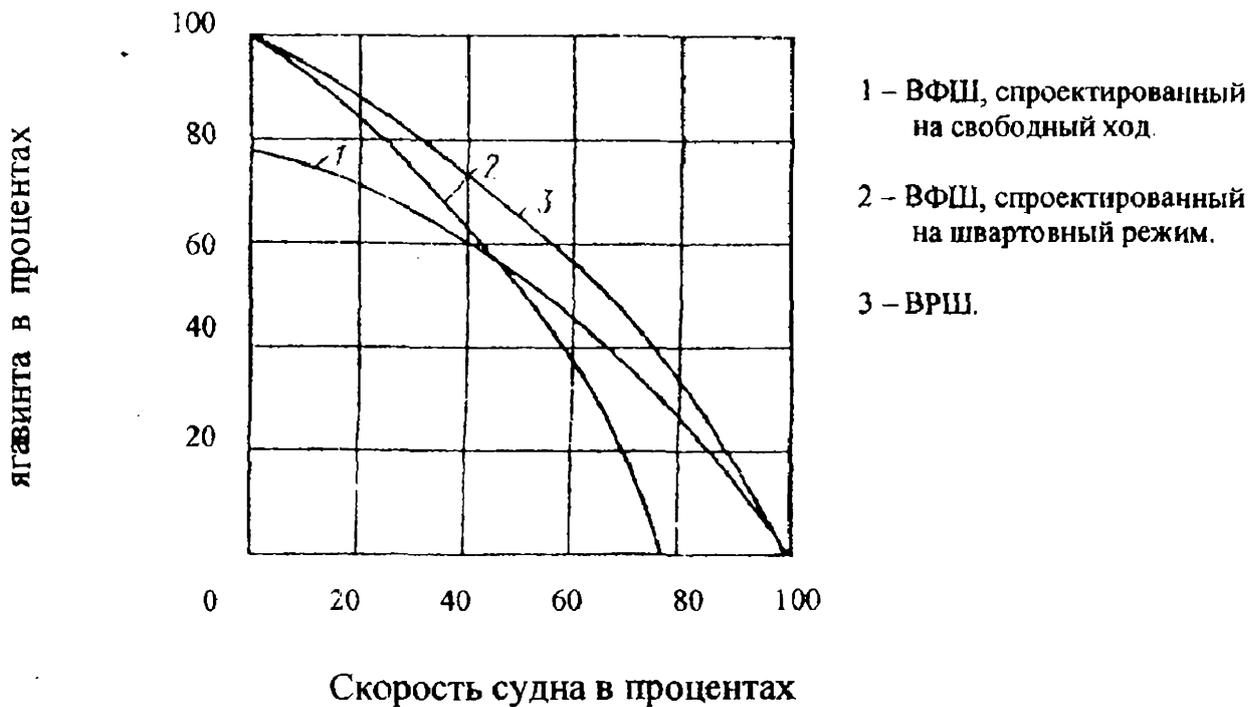


Рис.2. Кривые тяги винтов при работе по ограничительной характеристике

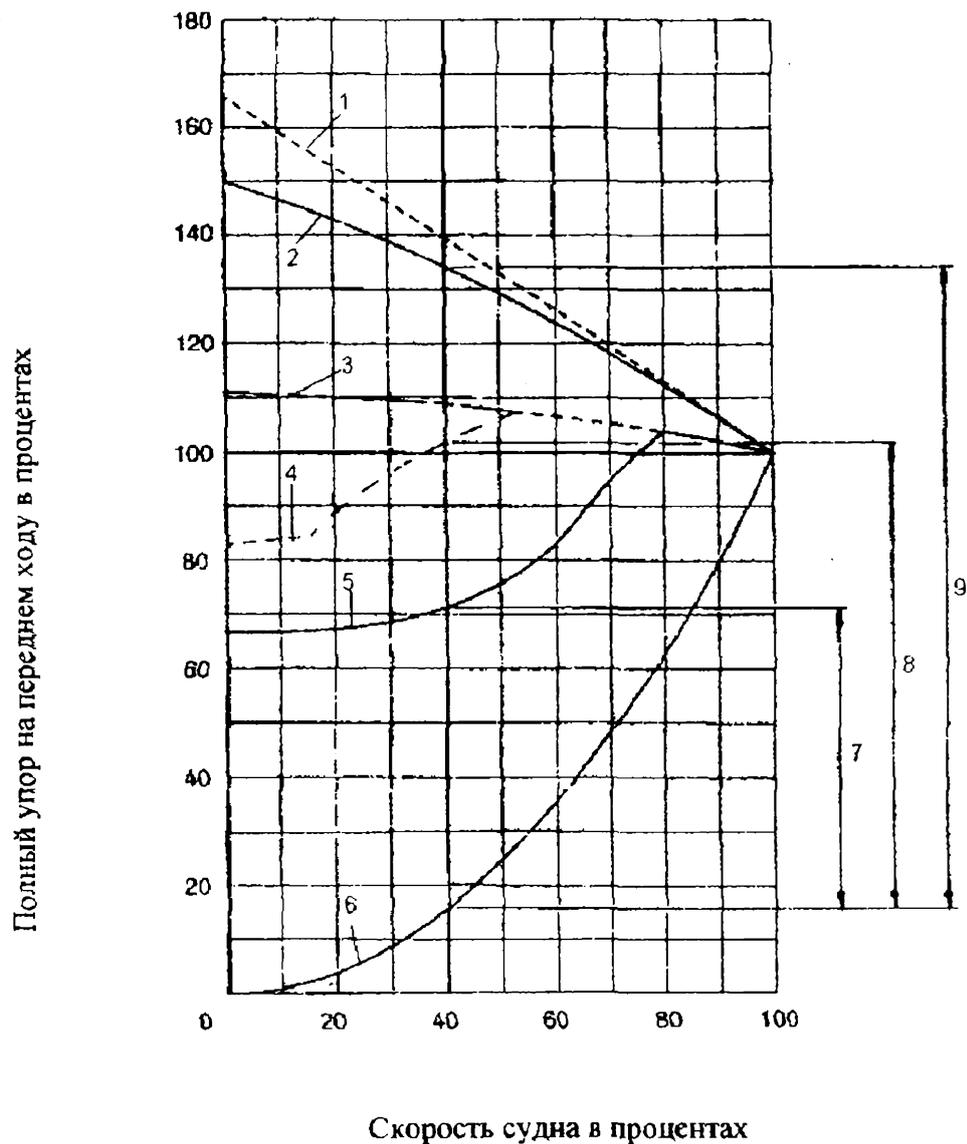
ВФШ может быть сконструирован для работы судна в режиме буксировки, но в таком случае он будет далек от способности использовать полную мощность двигателя при ходе без воза и скорость судна будет снижена.

Способность ВРШ использовать полную мощность двигателя на низких скоростях хода судна за счет уменьшения шага и поддержания полных оборотов приводит к значительному увеличению упора. Даже когда главный двигатель позволяет развивать максимальный конструктивный крутящий момент на пониженных оборотах, ВРШ обеспечивает тягу, которая на 30-40% больше тяги, развиваемой ВФШ.

В большинстве случаев дизельные двигатели на пониженных оборотах имеют максимальную кратковременную мощность, которая ограничивает величину крутящего момента и мощности, которые могут быть использованы, рис.1. Тяга, развиваемая ВФШ и ВРШ при работе двигателя по ограничительной характеристике показана на рис.2. Очевидно, что выигрыш в результате применения ВРШ будет тем больше, чем больше разница в сопротивлении судна на свободном ходу и с возом.

На рис. 3 показан располагаемый упор для ВФШ и ВРШ на различных скоростях хода двухвинтового судна со среднеоборотными дизелями. Для иллюстрации разницы отмечены величины располагаемого упора для буксировки и при разгоне для 40% скорости судна. Так как мощность, используемая на судне с ВФШ на малых скоростях хода, значительно снижена, то развиваемый упор также ограничен. Поэтому ВРШ может развивать намного больший упор, чем ВФШ.

Если ВРШ работает при высоких частотах вращения, уменьшенных шаговых углах и на малой скорости хода судна, то возможно появление пленочной кавитации гребного винта. Эта кавитация обычно развита незначительно и редко вызывает эрозию. Однако, длительная работа в подобном режиме может вызвать эрозию. Поэтому всегда следует соблюдать любые ограничения, предписываемые заводом-изготовителем.



- 1- Полная мощность двигателя на ВРШ (без учета кавитации).
- 2- Полная мощность двигателя на ВРШ (с учетом кавитации).
- 3- Максимальный крутящий момент ВФШ.
- 4- Предел максимальной нагрузки ВФШ.
- 5- Кратковременная максимальная мощность ВФШ.
- 6- Длительная максимальная мощность ВФШ.
- 7- Упор ВФШ при буксировке для 40% скорости.
- 8- Упор ВФШ при ускорении для 40% скорости.
- 9- Упор ВРШ при буксировке или разгоне для 40% скорости.

Рис. 3. Зависимость величины упора для ВРШ и ВФШ от скорости хода судна

2.2 Маневрирование

Если шаг ВРШ и частота вращения двигателя регулируются независимо, то могут быть заданы нежелательные или неприемлемые комбинации этих двух параметров, приводящие к перегрузке, кавитации или повышенному расходу топлива. Чтобы избежать этого, шаг винта и частота вращения двигателя обычно регулируются единой «комбинированной» рукояткой, находящейся на ходовом мостике. Этой рукояткой задается необходимое соответствие между этими параметрами. Возможность задания параметров отдельными независимыми рукоятками может предусматриваться в ЦПУ (см. главу 6).

На рис. 3 показано, что ВРШ производит бóльший упор, чем ВФШ, и позволяет осуществить более быстрый разгон судна.

ВРШ также улучшает тормозные характеристики. На переднем ходу уменьшение шага лопасти на несколько градусов приводит к созданию значительно большей реверсивной тяги торможения (см. также разделы 2.8 и 8.1).

Наличие ВРШ упрощает управление судном, поскольку не налагается никаких ограничений в отношении минимальной рабочей частоты вращения дизельного или другого типа главного двигателя при обеспечении минимальной скорости устойчивого хода судна. При установке рукоятки регулировки шага в положение «Zero Thrust» («Нулевой упор») главные двигатели продолжают работать, а судно не движется.

2.3 Авторотация (режим гидротурбины)

Если резко снизить мощность, подводимую к винту на движущемся судне, то винт будет стремиться прекратить вращение. В то же время поток воды, вызванный скоростью хода судна, будет стремиться вращать винт в том же самом направлении, вводя его в режим «авторотации» (гидротурбины). Если двухвинтовое судно работает на одном винте, то второй винт будет находиться в «авторотации», если он освобождён для вращения.

Частота вращения ВФШ от авторотации всегда меньше нормальной эксплуатационной частоты вращения при заданной скорости хода судна. При малой скорости судна суммарный момент трения на винте, гребном валу и двигателе (если они не

разобщены) может превысить момент вращения, развиваемый потоком воды на винте. В этом случае винт вращаться не будет.

Если же резко снижается вращающий момент ВРШ, а шаг винта при этом не меняется, то ВРШ будет также подвержен авторотации как и ВФШ. Однако, это для ВРШ не свойственно, так как обычным способом уменьшения вращающего момента ВРШ является снижение шага винта. Быстрое уменьшение шага винта приводит к тому, что винт перестаёт быть движителем судна. Момент вращения, вызываемый потоком воды, набегающим на лопасти, может оказаться больше, чем момент сопротивления валопровода и двигателя. Если это имеет место, то винт и двигатель будут подкручиваться до тех пор, пока вращающий момент на винте не уравнивается моментом сопротивления.

Крутящий момент (F_Q) и упор винта (T) зависят не только от шага (P) лопастей, но и от относительной поступи (J) винта, определяемой выражением:

$$J = V_a / nD,$$

где

V_a - средняя скорость перемещения гребного винта, равная скорости потока воды, набегающего на гребной винт (м/с);¹

n - частота вращения (c^{-1});

D - диаметр гребного винта (м).

Для некоторого фиксированного значения шага винта на рис. 4 представлен характер изменения момента, упора и к.п.д. винта в зависимости от его относительной поступи J . Как видно из графика, максимальные и близкие к ним значения крутящего момента и упора винта приходятся на режим работы движителя на швартовах или буксировочные работы (область «А»), что соответствует малым значениям J . Область «В», в которой к.п.д. имеет максимальное значение, характерна для ходового режима, область «С» соответствует границе перехода движителя в режим гидротурбины (авторотации).

¹ Средняя скорость перемещения гребного винта меньше скорости судна из-за неоднородного попутного потока. Влияние попутного потока в большинстве случаев больше для одновинтовых судов. Для одновинтового судна с большим коэффициентом общей полноты водоизмещения средняя скорость перемещения гребного винта может составлять до 70% от скорости судна.

Переход движителя из рабочей зоны в зону паразита и гидротурбины происходит всякий раз, когда изменяется знак упора и момента на винте.

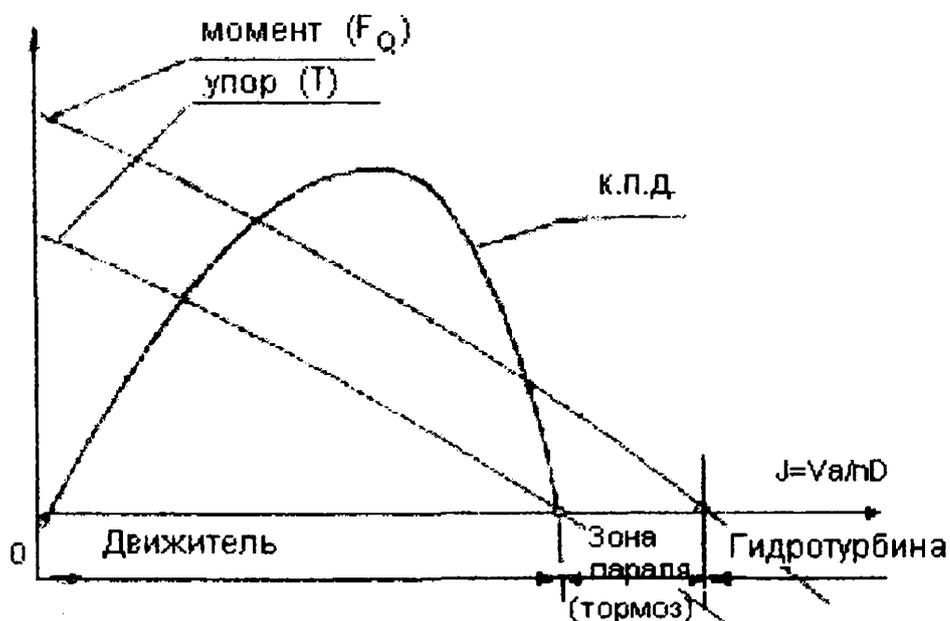


Рис. 4. Кривые гребного винта

Рассмотрим, в качестве примера случай, когда вначале $J = 1$ и $P/D = 1,2$.

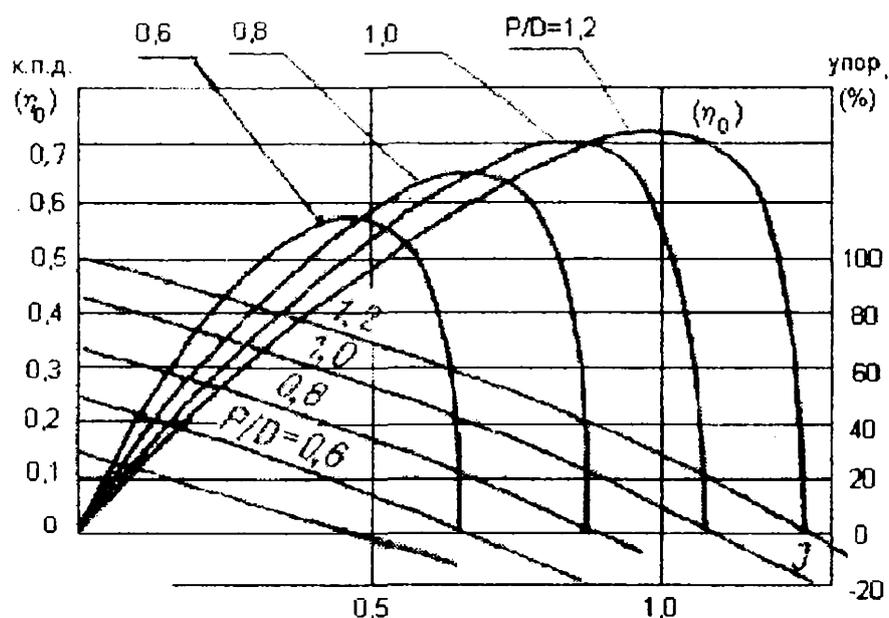


Рис. 5. Диаграмма кривых действия ВРШ

Как видно из рис.5, при изменении шага до значения $P/D=0,8$, упор изменяет свой знак на противоположный. При дальнейшем уменьшении шага винт начинает работать в режиме гидротурбины и усилие, создаваемое потоком воды на лопастях, может быть больше момента трения в опорных, упорных подшипниках и дейдвудных устройствах валов, зубчатой передаче и двигателе. Если это происходит, то механизмы будут увеличивать частоту вращения до тех пор, пока момент трения не уравнивается с крутящим моментом, развиваемым на гребном винте.

К.п.д. винта, при фиксированном шаге и уменьшении J , существенно падает. Однако, для ВРШ, при любом значении J , можно задать такой шаг, при котором уменьшение к.п.д. значительно меньше, что следует из рис.5.

При любом отдельном значении J крутящий момент падает по мере того, как уменьшается шаг, и до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное значение в районе $P/D=0,5$, то есть когда средний шаг лопасти составляет около половины диаметра винта.

Если после достижения минимального значения крутящего момента, шаг винта уменьшать далее до нуля, то крутящий момент будет возрастать до небольших отрицательных или положительных значений при нулевом шаге. Если затем установить лопасти в положение шага заднего хода, как в случае экстренной остановки судна с полного хода, то крутящий момент вырастет при полной мощности заднего хода приблизительно до значения крутящего момента полного хода вперед.

На некоторых высокоскоростных судах, которым свойственны низкие значения сил трения и инерции пропульсивных установок (газо- или паротурбинные установки), авторотация, вызванная быстрым изменением шага лопастей, может привести к резкому увеличению частоты вращения гребного вала. Это можно предотвратить с помощью автоматического ограничения скорости изменения шага, которое приводит к снижению высоких крутящих моментов авторотации. Даже когда опасности превышения частоты вращения нет, к такому воздействию прибегают в режиме манёвров, чтобы ограничивать как скорость уменьшения, так и скорость увеличения шага с целью предотвращения перегрузки на трансмиссионных системах, особенно с понижающими редукторами.

2.4 Особенности применения

Способность регулирования потребляемой мощности при любой частоте вращения путем изменения шага лопастей в широком диапазоне рабочих режимов делает ВРШ привлекательным для любого типа судна. Это относится не только к судам, выполняющим буксировку, но и к судам, работающим в транзитном режиме с выдерживанием требуемого графика работы.

На двухвинтовых судах можно добиться экономии топлива при работе на одном гребном винте, в то время как другой винт остается в состоянии свободного вращения или работает во флюгерном режиме. Уменьшение шага на работающем винте дает возможность использовать полную мощность, не создавая перегрузки по крутящему моменту. Таким же образом, там, где имеется два или более двигателей, работающих на один гребной винт, ВРШ позволяет полностью использовать имеющуюся в наличии мощность двигателей, когда один или более двигателей выведены из работы.

Так как ВРШ позволяет поддерживать оптимальные частоты вращения двигателей, при которых обеспечивается наивысший их к.п.д., то это позволяет сократить расходы топлива при длительно сниженных скоростях хода судна.

2.5 Работа на задний ход

Способность ВРШ производить изменение направления упора при неизменном направлении вращения привела к широкому их применению в сочетании с главными двигателями одностороннего вращения, такими как газовые турбины. ВРШ также дают возможность перехода на задний ход без остановки и последующего реверсирования дизельных двигателей, что уменьшает износ деталей и, следовательно, затраты на их техническое обслуживание и ремонт.

ВРШ, работающий на задний ход, может использовать полную мощность. Однако, эффективность его использования составляет примерно половину значения при работе на передний ход, что обычно обеспечивает судну максимальную скорость хода на задний ход, равную примерно трем четвертям максимальной скорости хода вперед.

При работе ВРШ на задний ход направление вращения гребного винта изменяется на обратное (реверсируется). Передняя и задняя

кромки лопастей меняются местами и поверхности лопастей меняются на противоположные. Это означает, что сечение профиля лопастей по отношению к набегающему потоку становится не оптимальным, что снижает к.п.д. и может вызвать сильную вибрацию. Этого недостатка нет у ВРШ.

2.6 Работа при нулевом упоре

Если ВРШ установлен на нулевой упор, то при неподвижном судне и хороших условиях окружающей среды (то есть при слабом ветре или течении) главные двигатели могут продолжать работать, не приводя судно в движение. Состояние нулевого упора не соответствует положению нулевого шагового угла. В разделе 3.4 даются определения нулевого упора и нулевого шага. В зависимости от формы лопасти нулевой упор возникает при малом шаге вперед либо при малом шаге назад.

Если гребной винт работает на номинальной частоте вращения, то потери мощности, поглощаемой самим винтом, составляют около 20% от номинальной мощности. Однако, обычной практикой работы в положении нулевого упора является вращение гребного винта на пониженных частотах вращения вала, так как это снижает потребляемую мощность и вероятность появления кавитации.

2.7 Работа на полную мощность

Конструкция ВФШ предусматривает использование полной эксплуатационной мощности переднего хода на определенных режимах работы. Изменение сопротивления судна, вызываемое состоянием его загрузки, силой и направлением ветра, состоянием моря и шероховатостью корпуса, требует определенную силу тяги и, следовательно, мощность, необходимую для достижения заданной скорости хода судна. Всякое изменение характеристик гребного винта, вызванное, например, шероховатостью поверхности лопастей, изменяет силу тяги при заданном моменте и частоте вращения.

Эксплуатация ВФШ при неблагоприятных условиях (то есть при обросшем или шероховатом корпусе судна и плохой погоде)

зачастую вызывает необходимость снижать частоту вращения для того, чтобы избежать перегрузки двигателя при его длительной работе в ходовом режиме судна. Такое снижение частоты вращения за счет уменьшения развиваемой двигателем мощности приводит к снижению скорости судна.

При благоприятных условиях (то есть при чистом корпусе и осадке судна в балласте) ВФШ не может использовать полную мощность двигателя, если частота вращения не увеличена до значений, превышающих номинальное.

У ВРШ шаг лопастей может регулироваться в любом направлении таким образом, что всегда можно работать на полной мощности двигателя, не перегружая его и не увеличивая частоту вращения выше номинального значения. При работе на полную мощность всегда можно минимизировать снижение скорости хода судна при неблагоприятных условиях и наоборот максимально использовать мощность при благоприятных условиях.

2.8 Экстренная остановка с полного хода

В аварийной ситуации и на ходовых испытаниях маневр экстренной остановки может выполняться с полного хода. Для установок с ВФШ это означает быстрый реверс двигателей и гребного винта при высокой скорости хода судна. Зачастую двигатель не способен остановить и реверсировать гребной винт до тех пор, пока скорость судна не снизится до определенного значения. На это уходит несколько минут. При выполнении маневра путем реверсирования вероятно возникновение повышенной вибрации и шума из-за пульсирующего характера кавитации. Кавитация уменьшает крутящий момент, подводимый к гребному винту, и упор, создаваемый гребным винтом.

Для экстренной остановки с полного хода судна установки с ВРШ могут развивать полную мощность на задний ход за 6-30 секунд, в зависимости от размеров гребного винта. При этом, по мере падения скорости судна, шаг винта на задний ход может постепенно увеличиваться для того, чтобы поддерживать заданную величину подводимой к винту мощности. Максимальный упор назад создается при достижении максимальной мощности и он может

быть в два раза больше полного упора вперед. По мере того как судно замедляет ход, упор заднего хода постепенно падает, однако, при нулевой скорости хода судна вероятно приближение его значения к полному упору вперед. При наличии кавитации максимальный упор назад, создаваемый гребным винтом, снижается и может достигать только 150% от значения полного упора переднего хода. На Рис. 6 показано изменение параметров во время экстренной остановки типичного теплохода.

Обозначения:

- n - частота вращения вала;
- P/D – шаговое отношение;
- S – пройденное расстояние;
- T - упор;
- V - скорость судна;
- t - время

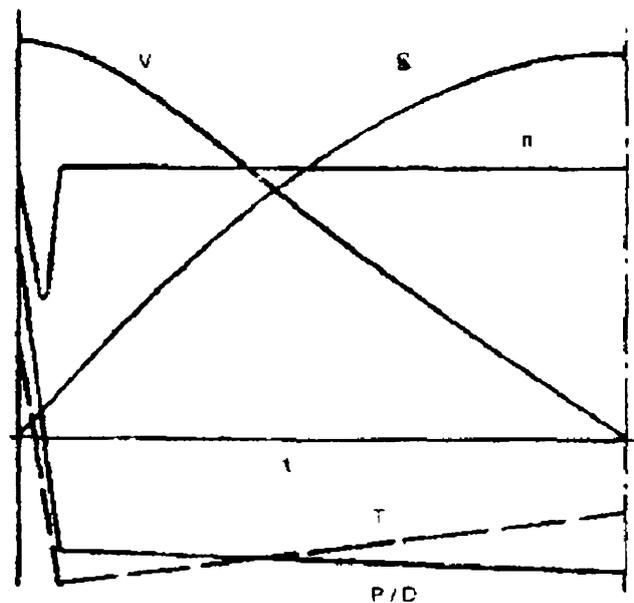
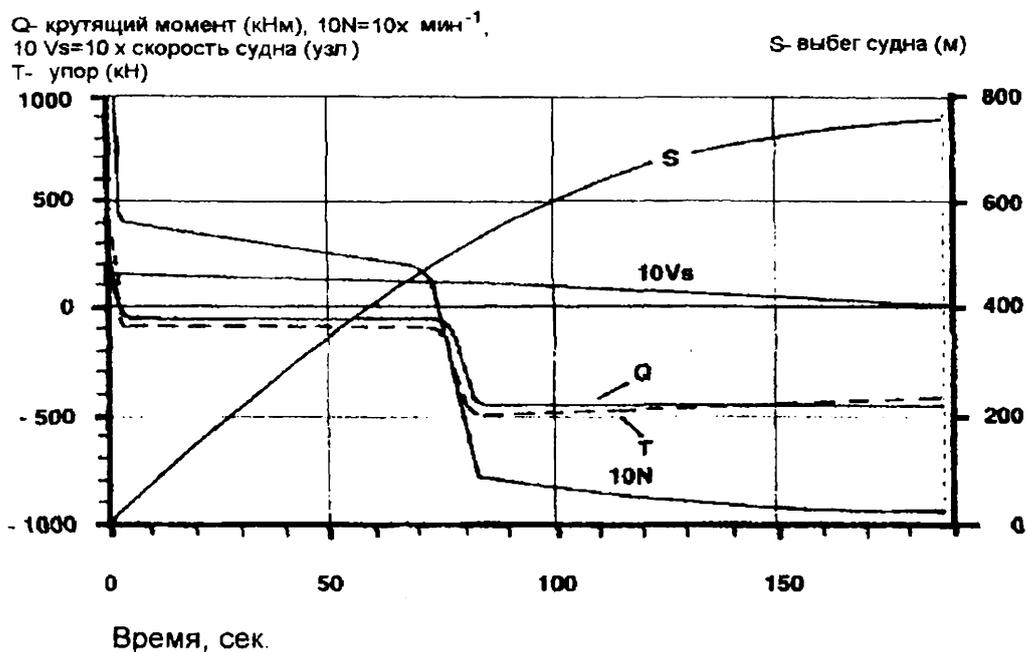


Рис.6. Экстренная остановка для маневра с полного хода типичного теплохода

Моделирование экстренной остановки двух ВРШ
 Прямой дизельный привод. $V_0 = 15$ узлов
 Тормозной момент = $0,1 \times$ (максимальный момент)



Моделирование экстренной остановки двух ВРШ
 Дизель-электрический привод. $V_0 = 15$ узлов
 Регулировка шага $2,5$ градус/с

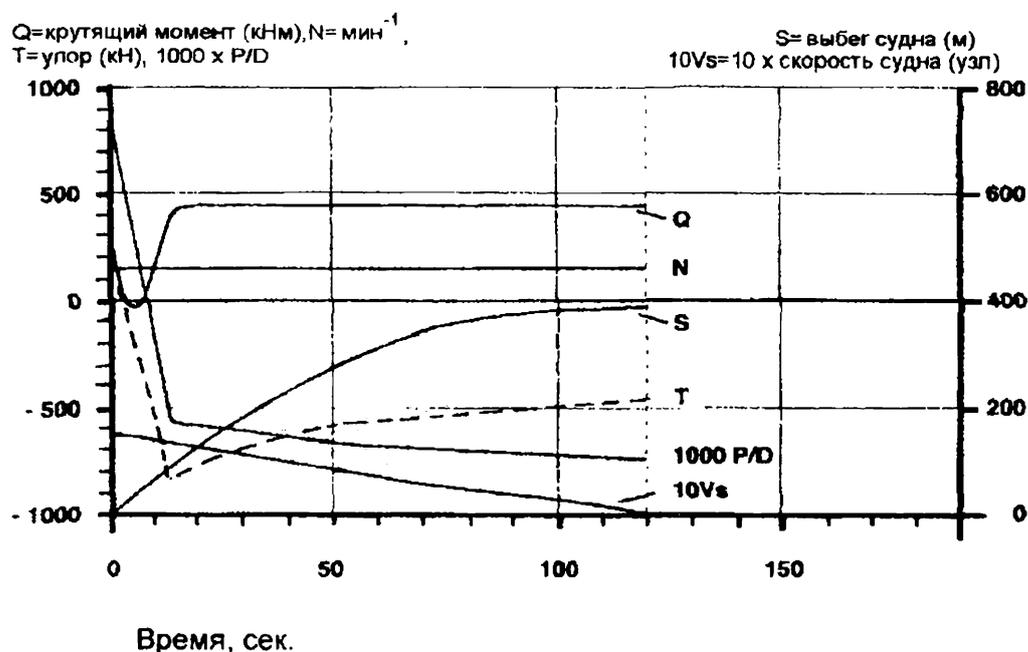


Рис. 7. Маневр экстренной остановки с полного хода альтернативных гребных установок

На Рис.7 показаны результаты сравнительных испытаний при экстренной остановке альтернативных гребных установок двухвинтового паромы с номинальной мощностью 6750 кВт на одном валу и максимальной скоростью хода 18,6 узлов. Пропульсивные установки имеют прямой дизельный привод: одна из них на ВФШ, а другая на ВРШ при постоянной частоте вращения.

Маневры с экстренной остановкой выполнялись с начальной скорости 15 узлов. Из представленных на рис.7 результатов испытаний видно, что ВРШ сокращают время остановки на 36%, а выбег судна на 48% по сравнению с установкой с ВФШ. Подобный маневр, выполненный для судна с дизель-электрическим приводом и ВФШ, дал сокращение времени остановки на 23% и выбега на 35% по сравнению с установками, имеющими прямой привод. В установке с ВРШ частота вращения постоянна при выполнении этого маневра и, поэтому, данное преимущество одинаково как при использовании прямого привода, так и электрического гребного привода.

В гребной установке с механическим приводом использование ВРШ сокращает время остановки и выбег судна на 30-50% по сравнению с ВФШ, в зависимости от типа и размеров судна.

Следует заметить, что некоторые одновинтовые, однорулевые суда с полными обводами могут проявлять во время экстренной остановки с полного хода сильное рыскание. Поскольку невозможно предотвратить резкие повороты таких судов, то следует избегать выполнения этими судами маневра экстренной остановки, если в этом нет необходимости и отсутствует достаточное пространство для маневрирования.

3. ЛОПАСТИ ВРШ И ГЕОМЕТРИЯ ИХ ПРОФИЛЕЙ

3.1 Определения

Чтобы избежать разночтений, необходимо понимать условные обозначения и терминологию, которые используются конструкторами ВРШ. Этот вопрос осложняется тем, что на протяжении многих лет инженеры по-разному называли одно и то же свойство и даже использовали одно и то же название для разных технических характеристик. В тексте используется общепринятая терминология и не допускается применение некоторых менее распространенных определений и двусмысленных терминов.

При рассмотрении геометрических показателей и в аналитических зависимостях, характеризующих действие гребного винта и пропульсивного комплекса, используются разные системы отсчета или координаты. Однако, предпочтительной системой отсчета является прямоугольная декартова система осей относительно судна, где ось X является осью вала и принимается положительной в направлении вперед от кормы к носу судна, ось Y положительна в сторону правого борта, а вертикальная ось Z положительна по направлению вниз.

Положение лопасти гребного винта определяется от оси лопасти, которая перпендикулярна к оси X и проходит через начало декартовых координат для гребного винта и середину основания (корня) лопасти.

Лопасть рассекают рядом цилиндрических поверхностей, соосных с винтом. Полученные сечения, развернутые на плоскость, характеризуют форму лопасти. Прямая линия, соединяющая наиболее удаленные точки сечения лопасти, называется хордой (см. рис.8). На лопасти каждая хорда совпадает с винтовой линией поверхности сечения. Семейство хорд различных сечений образует поверхность, которая называется номинальной поверхностью. Шаг этой поверхности, или кромочный шаг равен шагу хорды рассматриваемого сечения (винтовой линии, совпадающей с хордой). Хорда сечения лопасти (см. рис.8) на каждом радиусе пересекает плоскость, образованную осью лопасти и осью X . Геометрическое место пересечения этих точек известно как образующая лопасти и используется в качестве главного компонента для определения геометрии профиля лопастей. Для лопастей, не имеющих скоса, образующая является радиальной линией, перпендикулярной к оси X и совпа-

дающей с осью лопасти. Если имеется скос лопастей, тогда образующая будет лежать в плоскости оси лопасти и оси X , но будет находиться под некоторым углом к оси винта и оси лопасти.

Лопасть винта регулируемого шага поворачивается вокруг своей оси поворота, которая обычно совпадает с осью лопасти винта, хотя, очень редко, ось поворота лопасти может находиться не под прямым углом к оси X .

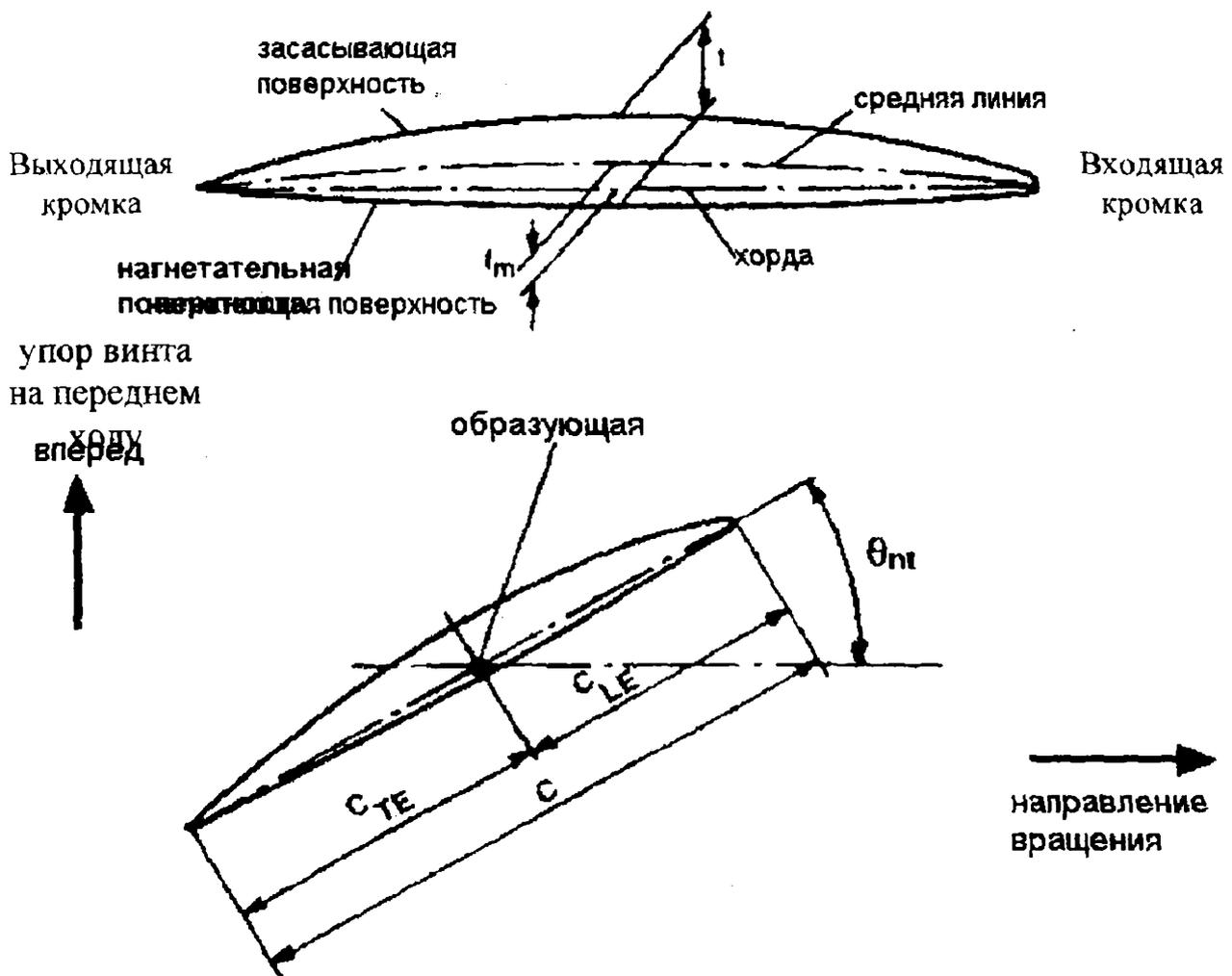


Рис. 8. Сечение лопасти аэродинамического профиля

3.2 Профили лопастей

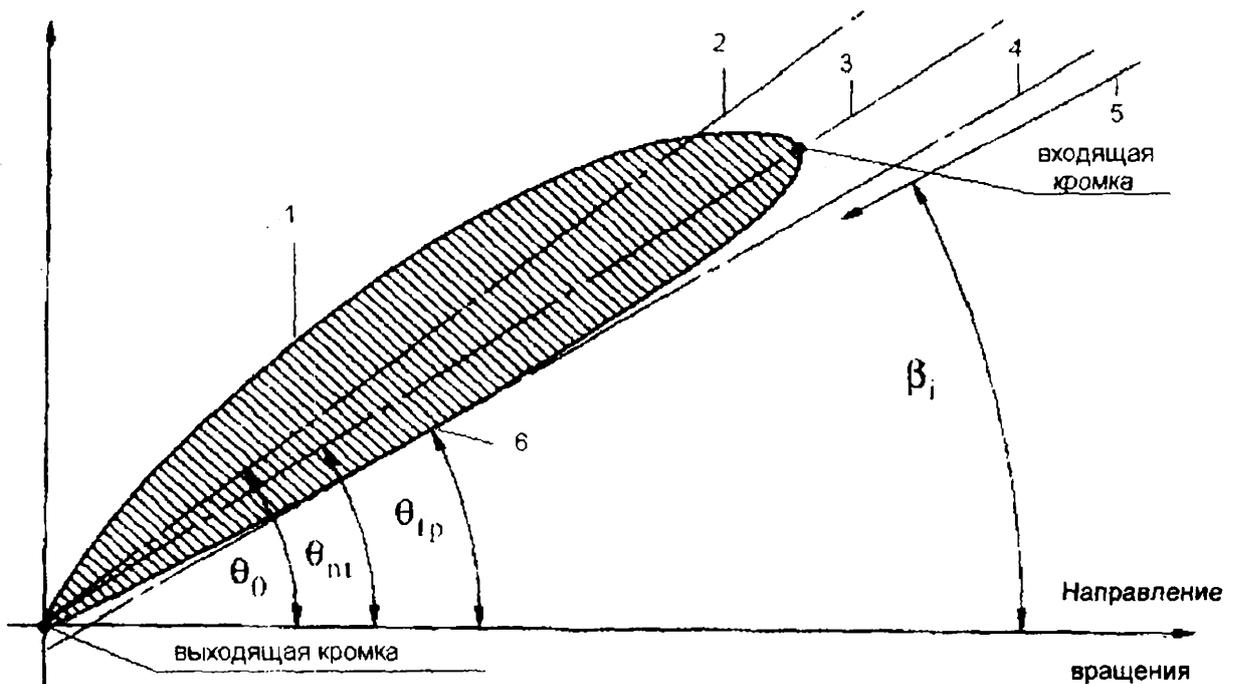
Для винтов используются аэродинамические профили, которые дают высокое значение упора и имеют слабую восприимчивость к кавитации. Эти профили имеют кривизну как засасывающей, так и нагнетательной поверхностей сторон (см. рис.8). Обычной практикой является увеличение толщины входящей кромки лопасти для

того, чтобы обеспечить достаточную прочность. Поскольку ВРШ не меняют направление своего вращения на обратное, то нет необходимости упрочнять выходящие кромки, как это делается на ВФШ.

На рис.8 показан профиль сечения лопасти гребного винта. Здесь показано сечение, полученное после рассечения лопасти цилиндром и развертывания его на плоскость. Длинной хорды (C) является ширина лопасти от входящей до выходящей кромки. Задняя сторона лопасти при работе гребного винта на передний ход находится в области повышенного давления и поэтому называется нагнетательной поверхностью. Выпуклая передняя сторона лопасти при работе гребного винта на передний ход находится в области пониженного давления и поэтому называется засасывающей поверхностью. Средняя линия, или линия кривизны является кривой, лежащей между засасывающей и нагнетательной поверхностями на равном расстоянии от обеих поверхностей. Толщина сечения (t) является наибольшей толщиной сечения профиля, а кривизна сечения (f_m) обычно принимается как наибольшее расстояние между средней линией и хордой. Там, где лопасти подходят к ступице, у них имеются сравнительно большого радиуса закругления. Однако, толщина корневого сечения лопасти принимается как толщина авиационного сечения без закруглений. Образующая проходит через хорду сечения, а расстояния до кромок сечений выражены в длине хорды входящей кромки (C_{le}) и длине хорды выходящей кромки (C_{te}).

3.3 Конструктивный шаг

Сечения лопастей винта устанавливаются под углом к поперечной плоскости YZ , и когда лопастям задана номинальная регулировка шага, угол между плоскостью YZ и сечением лопасти является шаговым углом. Поскольку здесь мы имеем дело с профилями, а не с плоскими пластинами, то возможно использование различных терминов, а поэтому необходимо установить определение шагового угла. Наиболее часто применяется термин “nose-tail pitch angle” - «шаговый угол профиля», что является углом между плоскостью YZ и хордой (См. рис.9 угол θ_{nt}). Настоящее определение используется в этой книге.



- 1- Засасывающая поверхность
- 2- Линия нулевой подъемной силы
- 3- Линия хорды
- 4- Линия шага по нагнетательной поверхности
- 5- Вектор скорости набегающего потока
- 6- Нагнетательная поверхность

Рис. 9. Шаговые линии и углы

Другое определение, используемое изготовителями гребных винтов, - это «угол нагнетающей поверхности» (См. рис.9. угол θ_{lp}). Ранее лопасти выполнялись с использованием сегментных профилей, с плоскими поверхностями со стороны нагнетания. В этих случаях шаг винта имеет такое определение. В настоящее время нагнетательные поверхности лопастей все чаще изогнуты и шаг нагнетающей поверхности не имеет большого значения, хотя местный шаг нагнетающей поверхности может использоваться при проверке точности изготовления. В этом случае длина хорды сечения разделяется на некоторое количество участков, имеющих равную длину, допустим 10, а местный шаг нагнетающей поверхности является шагом прямой линии, проведенной между точками на поверхности лопасти, которая соответствует двум концам хорды на одном из этих участков.

Применяется также термин “no-lift pitch angle” - «шаговый угол нулевой подъемной силы» (См. рис.9, угол θ_0). Шаговый угол θ_0

является углом, при котором не вырабатывается подъёмная сила на профиле лопасти.

Термин “hydrodynamic pitch angle” – «угол атаки» означает угол набегающей воды по отношению к сечению лопасти (включая составляющие скорости, индуцированные самим гребным винтом).

Шаг - p чаще задаётся линейным размером, чем угловым. Шаг на данном радиусе является расстоянием, на которое это сечение могло бы продвинуться вдоль оси X , двигаясь в твердой среде по винтовой линии, за один полный оборот. Эта величина эквивалентна шагу винтовой резьбы. При любом радиусе r , шаг равен:

$$p = 2\pi r \tan\theta_{nt} .$$

Некоторые лопасти конструируются с постоянным номинальным шагом на всех радиусах, однако, для большинства лопастей характерно изменение шага по радиусу. Общепринято определять номинальный шаг гребного винта - p как шаг на радиусе, где R - максимальный радиус гребного винта.

Средний эффективный шаг, возможно, является некоторым усредненным радиальным шагом, который дает возможность винтам с различными распределениями радиального шага подвергнуться сравнению с точки зрения потребления мощности. Зачастую мы сталкиваемся с таким положением, когда обычные гребные винты противопоставляются гребным винтам с большим скосом, где шаг изменяется непрерывно и плавно по радиусу, и они имеют средний эффективный шаг, близкий по значению к шагу на радиусе $0,7 R$.

К тому же равнодействующие сил упора и сопротивления, распределенные по лопасти, имеют свои центры приложения, расположенные около $0,7 R$. Для обычных лопастей прочность лопасти рассчитывается с использованием этих результирующих сил.

Отношение среднего шага гребного винта к его диаметру выражается отношением P/D , где P - номинальный шаг на $0,7 R$. Если отношение шага к диаметру винта постоянно для всех радиусов, то шаговый угол θ_r уменьшается от ступицы к краю лопасти обратно пропорционально значению радиуса.

3.4 Изменение шага винта поворотом лопастей

Большинство лопастей гребного винта не имеют постоянного шага от ступицы к краю лопасти при номинальном шаге. Они имеют меньший шаг у ступицы и края лопасти с целью уменьшения интенсивности вихреобразований. По этой причине местный шаговый угол лопасти не является обратно пропорциональным радиусу, хотя местный шаговый угол обычно варьируется от максимального значения у ступицы до минимального значения у края. При повороте лопасти все ее сечения поворачиваются на один и тот же угол, поэтому относительное (процентное) изменение шага у оконечности будет намного больше, чем у ступицы.

Тогда, при любом радиусе, соответствующее значение шага:

$$p = 2 \pi r \tan\theta.$$

Отсюда:

$$\tan\theta = \frac{p/D}{\pi r/R},$$

где $D = 2R$ – диаметр винта.

Рассмотрим пример ВРШ с лопастями без скоса при номинальном шаге:

| r/R | p/D | θ |
|-------|-------|----------|
| 0,325 | 0,971 | 43,56° |
| 0,4 | 1,018 | 39,01° |
| 0,5 | 1,079 | 34,48° |
| 0,6 | 1,130 | 30,94° |
| 0,7 | 1,167 | 27,95° |
| 0,8 | 1,182 | 25,19° |
| 0,9 | 1,172 | 22,51° |
| 1,0 | 1,145 | 20,03° |

Теперь рассмотрим ту же лопасть после поворота на 20°. Тогда отношение p/D будет следующим:

| r/R | p/D | θ |
|-------|-------|----------|
| 0,325 | 0,445 | 23,56° |
| 0,4 | 0,433 | 19,01° |
| 0,5 | 0,406 | 14,48° |
| 0,6 | 0,364 | 10,94° |
| 0,7 | 0,307 | 7,95° |
| 0,8 | 0,228 | 5,19° |
| 0,9 | 0,124 | 2,51° |
| 1,0 | 0,002 | 0,03° |

Указанные выше отношения p/D вместе со значениями для некоторых других изменений шаговых углов изображены на рис. 10.

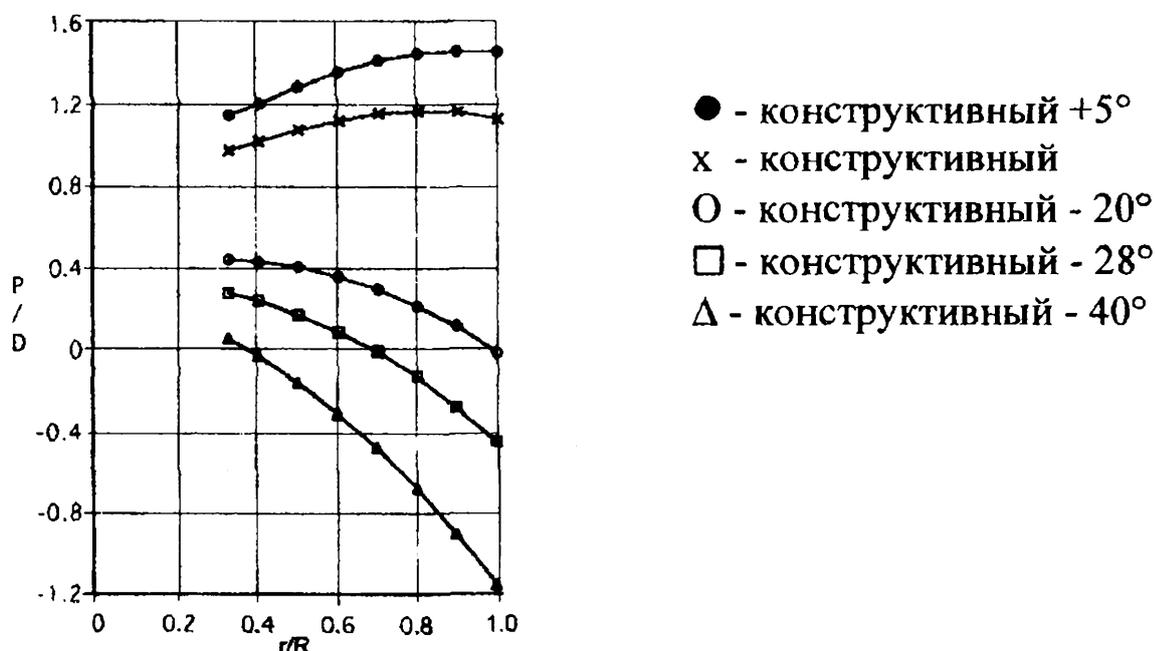


Рис. 10. Радиальное распределение шага при повороте лопасти

На рис. 10 видно, что изменение шагового отношения больше у края, чем у ступицы, и что распределение шага по радиусу изменяется, когда лопасть повернута относительно номинального положения. Заметим, что при повороте лопасти в направлении уменьшения шагового угла на величину угла, равную конструктивному шаговому углу на $0,7 R$, часть лопасти при $r/R < 0,7$ имеет положительный шаг переднего хода, а часть лопасти при $r/R > 0,7$ имеет отрицательный шаг заднего хода. При таком положении часть лопасти создает

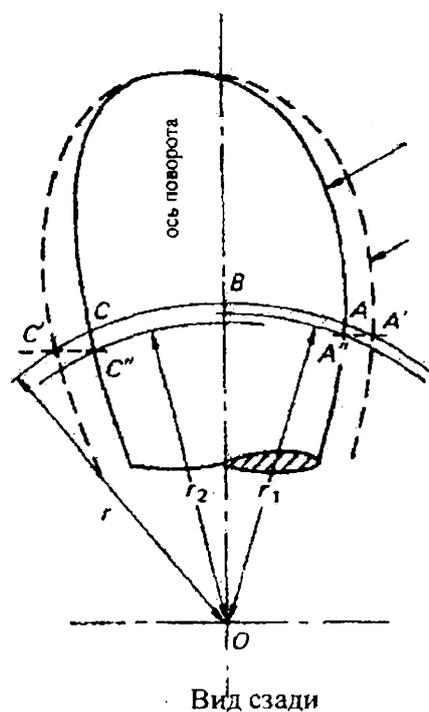
упор вперед, а часть создает упор назад. Нулевой упор возникает тогда, когда эти усилия вперед и назад нейтрализуют друг друга.

В некоторых случаях применения ВРШ требуется одинаковый упор в обоих направлениях. Примером такого применения ВРШ является туннельное подруливающее устройство, хотя есть и другие примеры, такие как паромы с симметричными образованиями носа и кормы. Там, где требуется одинаковый упор в обоих направлениях, используются плоские лопасти. У таких лопастей шаг равен нулю при среднем положении и сечения лопастей симметричны относительно хорд, то есть сечения не имеют изгиба. Когда лопасть отклоняется от положения угла нулевого шага, то шаговый угол всей лопасти равен углу поворота, и поэтому шаг в любом сечении пропорционален радиусу сечения. Это обеспечивает производительность, одинаковую в обоих направлениях, но создаваемый упор концентрируется на внешних радиусах и общая величина упора меньше той, которая могла бы быть создана обычной лопастью регулируемого шага, работающей на номинальном режиме переднего хода.

Следует рассмотреть еще один эффект изменения шагового угла ВРШ. Сечения лопасти лежат на поверхности соосных цилиндров. Когда происходит большое изменение шагового угла, точки, ранее лежавшие на рассматриваемом радиусе, уже не находятся на нем, за исключением точки, лежащей на оси поворота. Поэтому контур вновь образованного цилиндрического сечения на любом радиусе r состоит из точек, которые изначально находились на других радиальных сечениях, см. рис. 11.

Дугой ABC представлено конструктивное сечение на радиусе r вида сзади. Дуга A'BC' отражает сечение на радиусе r при уменьшенном шаговом угле лопасти.

До изменения шагового угла точка A' находилась в положении A'', то есть она являлась частью сечения лопасти на меньшем радиусе r_1 .



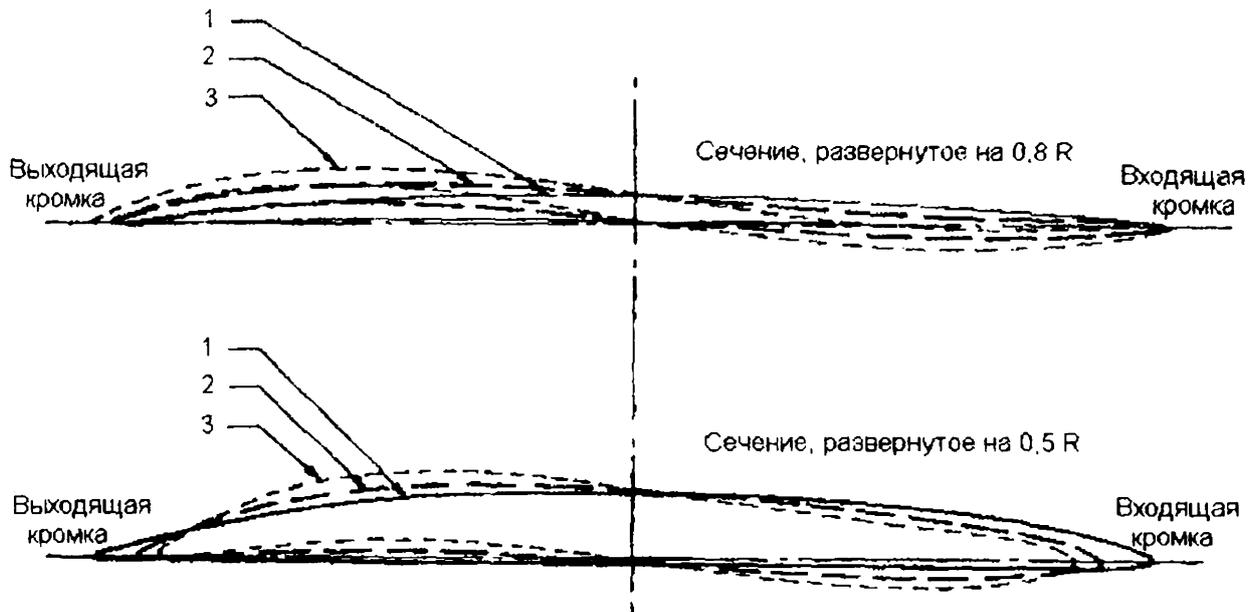
Проекция контура лопасти в положении конструктивного шага

Проекция контура лопасти после уменьшения шага на $\Delta\theta$

Рис. 11. Геометрический эффект на сечении лопасти как результат ее поворота

Таким же образом точка C' находилась в положении C'' до уменьшения шага и это было при радиусе r_2 . Поэтому новое сечение на радиусе r составлено из точек, которые изначально находились в пределах сечений с радиусами между r_2 и r . Как следствие этого - появление искажений при уменьшенном шаге винтовых сечений постоянного радиуса. Чем больше изменение шагового угла от конструктивного и шире сечение лопасти, тем больше искажения. На рис.12 показан пример искажения сечения на лопасти винта, установленного на пароме.

Одним из следствий такого положения является то, что определение шагового угла, данное в разделе 3.3, удовлетворительно лишь при конструктивном шаге. При повороте лопасти хорда искажается вместе с формой сечения и поэтому не может использоваться для определения шагового угла.



- 1 - конструктивный шаг
 2 - конструктивный шаг - 20°
 3 - конструктивный шаг - 40°

Рис. 12. Искажение сечения как результат изменения шагового угла при повороте лопасти

В обход этой трудности шаговый угол в любом, отличающемся от конструктивного, положении определяется как сумма конструктивного шагового угла на рассматриваемом радиусе и угла поворота (считая угол поворота отрицательным при уменьшении шага). В связи с этим средний шаговый угол лопасти при любой его установке, отличающейся от конструктивного шага, определяется из следующего выражения:

$$\text{Средний шаговый угол лопасти} = \theta_{0,7} + \varphi,$$

где: φ - значение угла поворота.

Тогда шаг при $0,7 R$:

$$r_{0,7} = 0,7 \pi D \tan (\theta_{0,7} + \varphi),$$

Регулировка лопасти на угол, соответствующий нулевому шагу, определяется как положение, при котором:

$$\varphi = -\theta_{0,7}$$

Установка лопасти на угол, соответствующий нулевому шагу, не обязательно совпадает с положением лопастей, когда винт создает нулевой упор в установившемся режиме работы и обеспечивает неподвижное состояние судна. В практике термин "нулевой упор"

характеризует состояние, когда результирующая сила, действующая вдоль оси судна, равна нулю и при идеальных погодных условиях судно остается неподвижным. Хотя всё-таки вследствие незначительного взаимодействия между гребным винтом и корпусом судна при нулевых значениях продольно действующей силы упор винта может быть не строго равным нулю. Нулевой упор может возникнуть при малом шаговом угле лопасти, установленной на работу вперед или назад, в зависимости от конструкции лопасти.

Следует отметить, что на любом режиме работы гребной винт может на мгновение создать нулевой упор в процессе установки такого шагового угла. Например, при работе на полный передний ход, незначительное уменьшение шагового угла приведет к нулевому упору и будет его сохранять до тех пор, пока судно не замедлит свой ход. Уменьшение шагового угла на большую величину, при тех же условиях, приведет к тому, что гребной винт будет создавать тормозное усилие.

Работа на задний ход является особым состоянием, когда имеются большие отклонения от конструктивного шагового угла. Это приводит к значительным изменениям в радиальном распределении шага при очень больших (отрицательных) шагах заднего хода на внешних сечениях лопастей и при значительных искажениях сечений. Во время маневров, при остановке и работе на задний ход, происходят дальнейшие изменения, влияющие на ходовые качества судна. Поверхности лопастей меняются ролями (реверсируются), то есть нагнетательная поверхность действует как засасывающая и наоборот. Это означает, что кривизна сечения направлена не в ту сторону. Указанное обстоятельство определяет большие углы установки или атаки, следствием чего являются значительное снижение к.п.д. винта и создание условий возникновения интенсивной кавитации. В результате уменьшаются крутящий момент и тяга.

Совсем иная ситуация возникает у ВФШ, работающих на задний ход. Вследствие изменения направления вращения происходит не только смена нагнетательной и засасывающей поверхностей и направления кривизны сечения, но и реверсируются входящие и выходящие кромки. Результатом является появление во время маневров значительных колебаний (пульсаций) давления на поверхности лопастей и в окружающем винт потоке воды, при этом гребной винт может подсасывать воздух с поверхности воды. Это при-

водит к возникновению очень сильной вибрации. При непрерывной работе на задний ход к.п.д. ВРШ ниже, чем при работе на передний ход, но все же выше, чем у работающего на задний ход ВФШ. В отличие от ВРШ, ВФШ не может использовать полную мощность при работе на задний ход.

3.5 Скос (серповидность или несимметричность) лопастей

Лопасть имеет скос, если точки середин хорд разных радиальных сечений не лежат на осевой линии лопасти, если смотреть на нее в направлении оси X (см. рис.13).

Местный угол скоса любого сечения θ_s является углом между осевой линией лопасти и линией, проходящей через осевую линию вала и середину хорды D в данном сечении, если смотреть вдоль центральной оси валопровода (то есть вдоль оси X). Угол скоса гребного винта (θ_{sp}) является разностью между наибольшим и наименьшим углами скоса сечения (θ_s), считая значения θ_s на входной стороне отрицательными. В ВРШ со скосом обычно реализуется конструктивное решение - "уравновешенный скос", где геометрическое место точек середин хорд сечения сначала движется к входящей кромке относительно оси лопасти, а затем к выходящей кромке по мере увеличения радиуса сечения. На рис. 13. показана конструкция винта с "уравновешенным скосом".

Многие ВФШ имеют конструкцию со смещенным скосом, где все геометрические точки середин хорд смещены от оси лопасти в сторону выходящей кромки.

Лопастей с углом скоса гребного винта θ_{sp} более 25° обычно считаются лопастями с большим скосом, хотя углы скоса, значительно превышающие половину угла между двумя лопастями (то есть более 45° для четырехлопастного гребного винта), применяются достаточно часто. В разделе 8.4 рассматриваются преимущества применения лопастей с большими значениями величины скоса.

Формирование скоса, основанное на точках средней хорды радиальных сечений, принято из практики формирования скоса крыльев летательных аппаратов. Оно не имеет особенного гидродинамического значения для судовых гребных винтов при том, что более важна стреловидность входящей кромки (см. раздел 6.4).

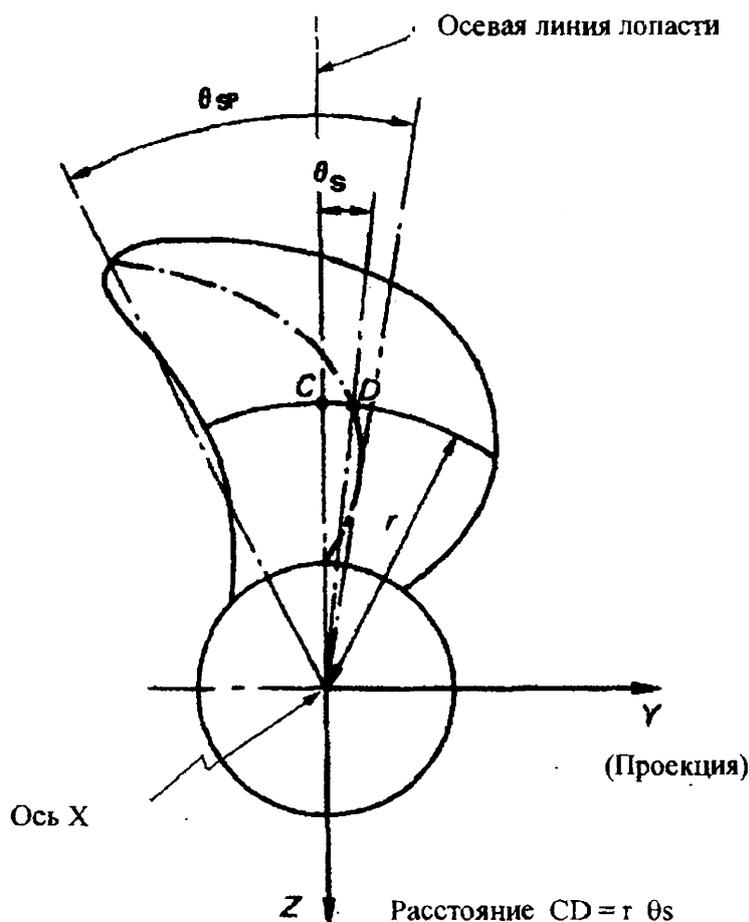


Рис. 13. Формирование скоса лопасти

3.6 Откидка лопасти

Когда лопасть наклонена назад или вперед по отношению к плоскости YZ , то о ней говорится, что она имеет откидку. Откидка лопасти на корму (назад) применяется для увеличения зазора между краем лопасти и корпусом судна. Откидка лопасти на нос (вперед) иногда применяется в ВФШ, работающих в условиях больших напряжений, поскольку результирующий центробежный изгибающий момент частично компенсирует изгибающий момент, вызываемый усилием упора. Откидка лопасти назад условно принимается как положительная.

На рис.14. показана развертка двух сечений лопасти, а именно: корневого сечения и сечения на некотором большем радиусе (r).

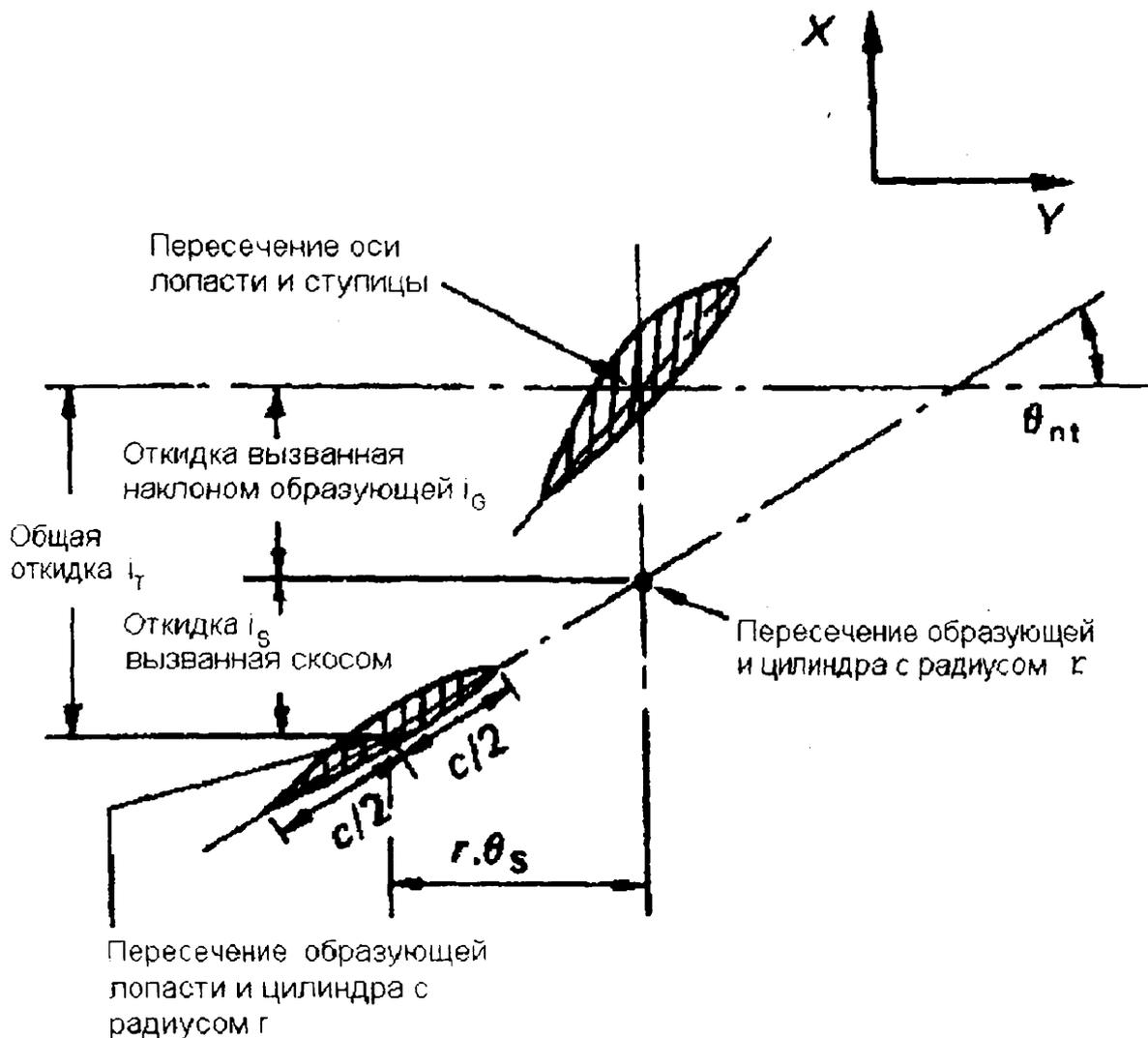


Рис. 14. Определение общей откидки лопасти

Можно видеть, что применение скоса также перемещает точки середин хорды в направлении X , образуя вызванную скосом откидку лопасти. Общая откидка лопасти на любом радиусе r является арифметической суммой откидок, вызванных наклоном образующей и скосом. Откидка, вызванная скосом i_s , представлена выражением:

$$i_s = r \cdot \theta_s \cdot \tan \theta_{nt}.$$

3.7 Контуры и площади поверхности лопасти

На чертежах ВРШ и их лопастей изображаются разные контуры поверхности лопастей, как это показано на рис.15.

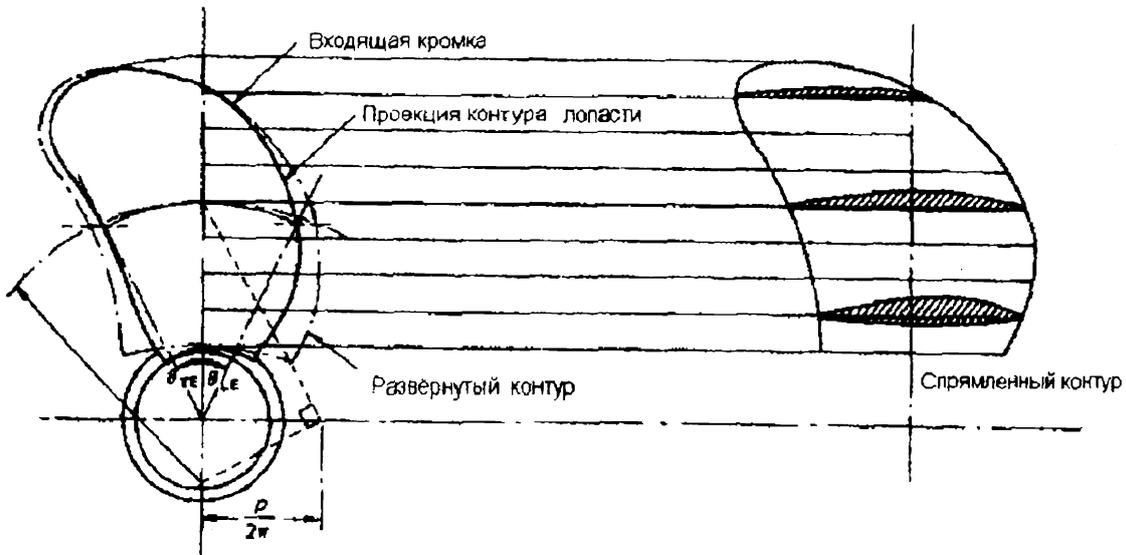


Рис. 15. Контуры лопастей

Развернутым контуром является контур лопасти, который она бы имела, если бы все ее сечения были повернуты так, чтобы их шаговый угол равнялся нулю. Спряmlенный контур получается вычерчиванием длин хорд ряда постоянных радиальных сечений (10 или более) в виде прямых линий с нулевым шагом на соответствующих расстояниях от центра вала. Иногда на чертежах изображают также “swept outline” – «обметаемый контур» для того, чтобы указать зазор между лопастями и корпусом судна в окне ахтерштевня.

На чертежах принято изображать лопасти винтов правого вращения который, если смотреть на него с кормы, вращается по часовой стрелке при работе на передний ход судна. На заводском чертеже лопасти имеется пояснение, указывающее базовое направление вращения лопасти (левое или правое).

Площадь лопастей гребного винта A_D является суммарной развернутой площадью всех лопастей. Однако проще рассчитать площадь спряmlенной поверхности лопастей A_E , которую обычно задают и используют. Разница между ними настолько мала, что ею можно пренебречь. Дискосым отношением θ винта называют отношение спряmlенной площади лопастей к площади диска винта A_0 , то есть:

$$\theta = \frac{A_E}{A_0} = \frac{4A_E}{\pi D^2}.$$

4. СИЛЫ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЛОПАСТИ

В процессе работы лопасть ВРШ подвергается воздействию сложной системы сил. Наиболее важными из них являются следующие: сила упора, крутящий момент на валу, центробежная сила, крутящий момент на цапфе лопасти.

Для того, чтобы представить себе весомость этих нагрузок рассмотрим два примера одновинтовых судов:

| | Танкер | Р ₀ /Р ₀ |
|--------------------------------------|--------|--------------------------------|
| Мощность, э.л.с. | 17000 | 5200 |
| Скорость судна, узлы | 16,1 | 16,5 |
| Частота вращения, мин ⁻¹ | 90 | 194 |
| Диаметр винта, м | 7,4 | 3,6 |
| Количество лопастей | 4 | 4 |
| Упор на 1 лопасть, кН | 320 | 80 |
| Крутящий момент на лопасть, кН·м | 325 | 45 |
| Центробежное усилие на лопасть, кН | 1080 | 275 |
| Макс. крутящий момент на цапфе, кН·м | 195 | 28,5 |

Приведенные данные являются действительными усредненными значениями при работе на передний ход и полной мощности, за исключением значений величин крутящего момента на цапфе, которые являются проектными максимальными величинами в случае самого неблагоприятного маневра.

4.1 Упор и крутящий момент

При вращении гребного винта возникает трение воды о поверхность лопастей, а вокруг лопастей, в потоке воды, создается переменное давление. Эти силы давления и трения могут быть разложены на свои аксиальные и радиальные составляющие. Результирующие этих составляющих представляют собой силы упора и крутящего (вращающего) момента. Так как лопасти выходят из своих подшипников в ступице в виде консоли, то эти силы создают и изгибающие моменты, действующие в корневых сечениях лопастей. Гребной винт работает в неоднородном попутном потоке, поэтому состояние этого потока на лопастях меняется при вращении гребного винта. В свою очередь это приводит к циклическому изменению

распределения поля давлений на поверхности лопастей, что определяет периодические изменения упорных и крутящих усилий. При неблагоприятных условиях периодические изменения усилий могут достигать значительных величин - 75% и более от средних их значений для одновинтового судна.

Как указывалось в разделе 3.3, для обычных лопастей результирующие упор и крутящий момент на лопасти действуют на радиусе, примерно равном $0,7 R$. Результирующие сил упора и крутящего момента (T и F_Q соответственно) на лопасти могут быть разложены на две силы: F_y , перпендикулярную к основной оси изгиба сечения и F_x , действующую вдоль этой оси. На рис. 16 показаны оси сечения лопасти и результирующие силы упора и крутящего момента, действующие на лопасти.

Принято считать лопасть консольной балкой и использовать результирующую силу F_y для расчета напряжений на обычных лопастях ВРШ на $0,35 R$ (или $0,4 R$ для ступиц, имеющих отношение диаметров больше, чем $0,33 R$). Сила F_x оказывает очень малое влияние на изгибные напряжения в сечениях лопасти и ею обычно пренебрегают. Следует отметить, что выше приведен весьма приближенный метод оценки действующих усилий. Для высоконагруженных лопастей или лопастей с большим скосом следует выполнять более тщательный учет всех усилий, действующих на лопасти. Эта информация может быть использована для анализа действующих напряжений, как правило, с использованием метода конечных элементов. Заметим, что это нецелесообразно для условий эксплуатации, значительно отличающихся от расчетных.

4.2 Центробежные усилия

Центробежные усилия зависят от массы, радиуса центра тяжести лопасти и квадрата частоты вращения гребного винта. Они не изменяются в течение полного оборота лопасти. Поскольку не все центры сечений лопасти лежат на ее оси, то центробежные усилия создают также центробежный изгибающий момент.

При проектировании лопастей важно добиться такого расположения сечений лопасти по образующей, чтобы центробежные изгибающие моменты, действующие в каждом из

сечений и корне лопасти (подшипнике), не были слишком большими.

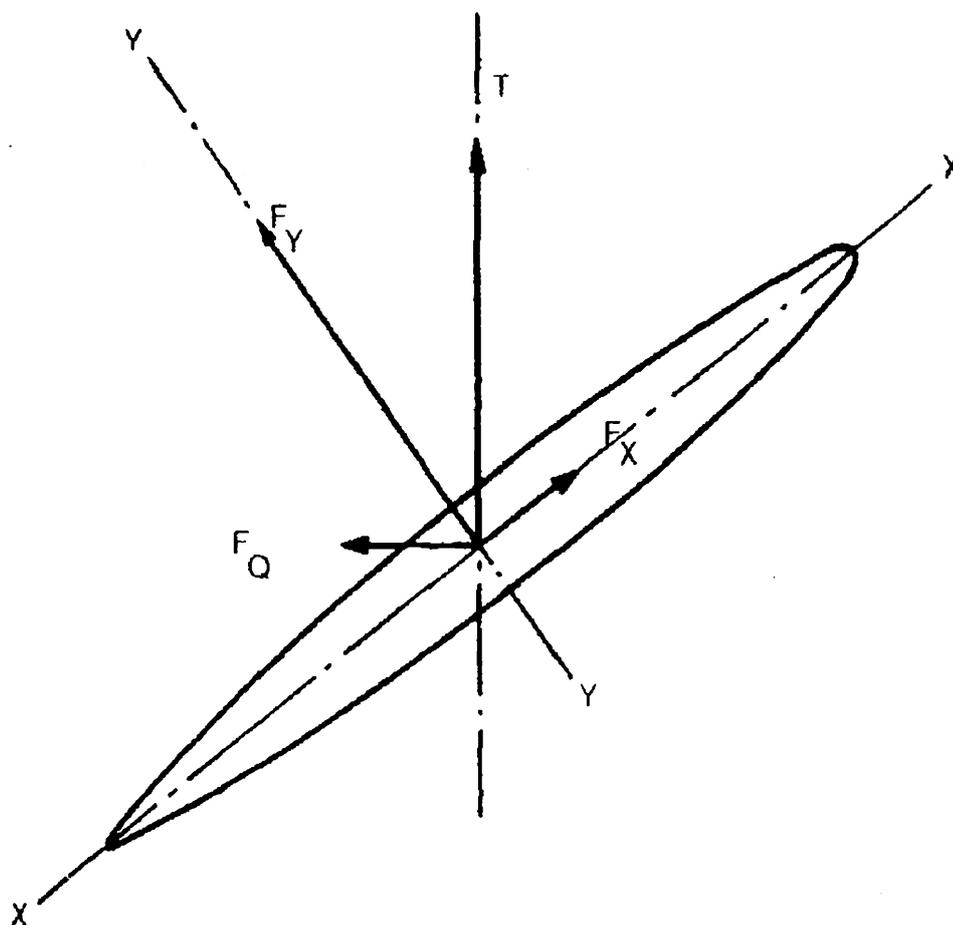


Рис. 16. Результирующие сил упора и крутящего момента, действующие на лопасти

4.3 Крутящий момент на цапфе лопасти

Крутящий момент на цапфе стремится скручивать лопасть вокруг оси цапфы. Он имеет три составляющих, а именно: от действия гидродинамических и центробежных сил, а также сил трения. Гидродинамический крутящий момент возникает вследствие того, что распределение поля давления на поверхностях лопасти создает результирующую силу, которая обычно не проходит через ось лопасти. Ее значение зависит от конструкции лопасти (включая снос, откидку, площадь и положение лопасти на ее фланце), заданного шага и относительной поступи J . На расчетном режиме

работы при ходе судна вперед гидродинамический крутящий момент на валу очень мал. При уменьшении шага винта этот крутящий момент увеличивается и стремится повернуть лопасть на шаг заднего хода. В установившемся режиме работы максимальный гидродинамический крутящий момент возникает в районе нулевого шага, но он остается большим, пока лопасти перемещаются к шагу полного хода назад. Максимальное значение гидродинамического крутящего момента на цапфе соответствует области нулевого шага, при $J = 1,0$. Условия, при которых это происходит на практике, зависят от значения J при расчетном режиме работы на передний ход. Если значение J в режиме полного хода вперед равно 1,0 или больше, то наибольший гидродинамический крутящий момент на цапфе будет достигнут, когда, начав с установившегося режима работы на полный вперед, шаг быстро уменьшается до нуля с одновременным уменьшением частоты вращения вала. В любом случае максимальный гидродинамический крутящий момент на валу возникает до того, как заметно снизится скорость хода судна.

Представление о центробежном крутящем моменте можно получить, рассмотрев небольшой элемент лопасти, как это показано на рис. 17.

Благодаря вращению гребного винта, элемент лопасти подвергается в радиальном направлении действию центробежной силы - F_c . Эта сила может быть разложена на две составляющие, F_z и F_y .

Составляющая F_y создает крутящий момент, действующий относительно оси лопасти и стремящийся её развернуть, он равен $F_y \cdot x$.

Центробежный крутящий момент для всей лопасти определяется интегрированием. Направление этого момента таково, что оно стремится двигать лопасть в поперечную судну плоскость YZ . Он имеет наибольшее значение при шаговом угле, равном 45° , уменьшаясь до нуля при шаговом угле 90° . Подобно гидродинамическому крутящему моменту, центробежный крутящий момент зависит от конструкции лопасти, включая площадь лопасти, скос, откидку и размещение лопасти на фланце.

Третьей составляющей момента на цапфе лопасти является момент от действия сил трения.

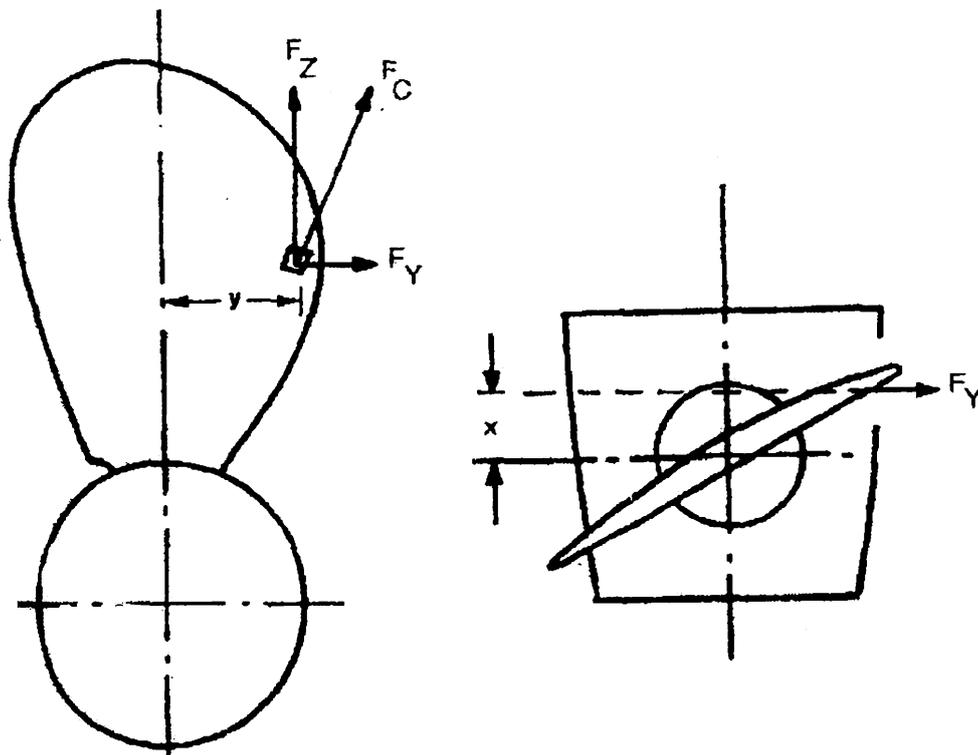


Рис. 17. Центробежный крутящий момент, действующий на элемент лопасти

Лопастей опираются на подшипники в корпусе ступицы, и момент возникает, когда изменяется шаговый угол.

Хотя поверхности скольжения смазываются жидкой или консистентной смазкой, создаваемый момент трения довольно велик и зависит от конструкции ВРШ, нагрузок, прилагаемых к поверхностям подшипников лопастей, и коэффициента трения. В свою очередь на коэффициент трения оказывают влияние материалы, образующие пару трения скольжения, сорт смазки и эффективность системы смазки. Эффект смазки зависит как от работы устройств, распределяющих смазочный материал по поверхностям скольжения, так и от состояния этих поверхностей. На подшипники лопасти действуют нагрузки упора и крутящего момента, а также центробежные силы и моменты. Дополнительно к этому, подшипники лопастей обычно подвергаются также воздействию аксиальных сил, создаваемых гидравлическим сервомотором. (Это не имеет места в случае установки в ступице гребных винтов сервомоторов двойного действия, см. раздел 5.3.).

Гидродинамический момент пытается развернуть лопасть в сторону шага полного заднего хода. Если лопасть повернута на шаговые углы большие, чем расчетное значение полного переднего хода, то направление будет изменяться так, что лопасти будут пытаться передвигаться дальше вперед (имеет огромное значение для флюгируемых гребных винтов). Центробежный момент стремится развернуть лопасть в положение, приблизительно соответствующее нулевому шагу. Как результат, при движении от положения вперед до нулевого шага гидродинамический и центробежный моменты помогают выполнению движения. При движении от нуля до полного назад гидродинамический момент содействует движению, тогда как центробежный оказывает ему сопротивление. Движению из положения полного назад до положения нулевого шага оказывает сопротивление гидродинамический момент, тогда как центробежный момент ему соответствует. И, наконец, движению из положения нулевого шага в положение шага полного переднего хода оказывают сопротивление как гидродинамический момент, так и центробежный момент.

Момент от действия сил трения всегда оказывает сопротивление любому изменению шага. Когда момент трения меньше результирующей двух других моментов, лопасть изменит шаг, если только сервомотор не обеспечит требуемый момент, чтобы противодействовать вращению.

Максимальный гидродинамический момент возникает в области нулевого шага при движении судна на полном ходу вперед, когда $J=1,0$. Центробежные силы пропорциональны квадрату частоты вращения, поэтому нагрузка на подшипник лопасти возрастает по мере роста частоты вращения, то же происходит и с центробежным моментом. При повороте из положения нулевого шага к шагу полного хода вперед все три составляющие момента на цапфе оказывают сопротивление движению. Отсюда следует, что маневр, требующий наибольшей мощности от сервомотора, начинается с установившейся работы на полный ход вперед, когда быстро уменьшают шаг до нуля, чтобы сохранить при этом полную скорость вращения вала, а затем изменяют шаг вперед до того, как скорость переднего хода судна заметно понизится.

При проектировании важно учитывать величину момента, действующего на цапфе, обеспечивая такое распределение усилий,

при котором центр приложения равнодействующей сил на лопасти не слишком удалялся от оси цапфы. Это основная причина того, что в лопастях ВРШ, имеющих скос, используется конструкция уравновешенного (симметрированного) скоса. Скос был предложен для того, чтобы ввести положительную откидку лопасти, поэтому, с целью сохранения низкого значения момента на цапфе, лопастям с большим скосом обычно придается отрицательная откидка. Если моменты на цапфе не компенсировать, то вращающий момент, требуемый для поворота лопастей, возрастает, силы, действующие в механизме ступицы, увеличиваются и рабочее давление сервомотора или его размеры должны быть увеличены. Это приведет к увеличению диаметра ступицы и, следовательно, к увеличению размеров гидравлической системы, снижению к.п.д. винта.

4.4 Лопасты со скосом

На лопастях без скоса или с небольшим скосом максимальные нагрузки действуют в радиальном направлении и локализируются в корневой части лопасти, расположенной в районе ступицы на удалении от входящей и выходящей кромок. Лопасты с большим скосом имеют более сложное распределение напряжений. Участки повышенных напряжений находятся в сечениях, расположенных вблизи края лопасти в районе выходящих кромок. Напряжения в лопасти зависят от ее конструкции и от того, является ли скос уравновешенным (симметрированным) или смещенным. Для конструкций с симметрированным скосом, которые используются в ВРШ, наибольшие напряжения концентрируются вблизи выходящей кромки. Распределение напряжений у этих лопастей зависит от кривизны выходящей кромки и могут быть снижены за счет уменьшения вогнутости выходящей кромки. Этого можно добиться, увеличив длину хорд сечений средней части лопасти без существенного изменения профиля входящей кромки, радиального шага или распределений нагрузки. Отрицательным фактором при этом является увеличение площади лопасти, которое снижает к.п.д. Хотя увеличение длин хорд сечений средней части лопасти уменьшает суммарный скос лопасти, как это было отмечено в разделе 3.5, оно не оказывает влияния на положительные качества этих гребных винтов (см. раздел 8.4), которые определяются стреловидностью

входящей кромки вместе с радиальным шагом и распределениями нагрузок.

Из-за более сложного характера распределения напряжений в лопастях с большим скосом необходимо выполнять более точный расчет нагружения лопастей и анализ действующих напряжений, чем для лопастей, имеющих умеренные значения скоса.

Изменение направления вращения при маневрировании и работе на задний ход. ВФШ вместе с упругой деформацией краёв лопастей с большим скосом приводит к появлению высоких нагрузок в периферийных сечениях лопастей, которые необходимо упрочнять, чтобы безопасно выдерживать эти нагрузки. Так как ВРШ не реверсируют вращения при работе на задний ход, в них могут применяться более тонкие сечения на периферии лопастей. Это означает, что на них можно добиться удовлетворительных кавитационных характеристик при меньших длинах хорд сечений. Меньшая длина хорды определяет снижение потерь на трение, что несколько компенсирует уменьшение к.п.д. ВРШ из-за увеличения диаметра его ступицы.

5. ТИПИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВРШ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ДЕЙСТВИЯ

Лопастей ВРШ устанавливаются на подшипниках скольжения в корпусе ступицы и изменяют шаг поворотом вокруг оси своих цапф посредством одного или двух эксцентриковых кривошипных пальцев.

Существует большое количество конструктивных исполнений ВРШ, так как каждый изготовитель имеет свои решения для судов различного типа и назначения. Далее будут описаны некоторые из наиболее широко применяемых конструкций. Однако, отдельные гребные винты могут отличаться от приведенных примеров, поэтому оператор должен всегда следовать инструкциям по эксплуатации и другой технической документации конкретного гребного винта, в которых изложена подробная информация.

5.1 Малоразмерные ВРШ с управлением из корпуса судна

Лопастей небольших ВРШ обычно имеют неразъемную конструкцию с цапфовой опорой и пальцем кривошипа, которые устанавливаются в ступице. Ступица состоит из двух частей и разделена надвое по центру подшипников лопастей. Носовая и кормовая части ступицы крепятся друг к другу болтами, а внутренняя полость, имеющая подвижные детали, заполняется консистентной смазкой. Такая конструкция показана на рис. 18.

С пальцами кривошипа взаимодействуют сухари, установленные в пазах ползуна, передвигаемого вперед и назад вдоль оси вала посредством штанги, проходящей внутри пустотелого гребного вала.

Гребной вал и штанга вращаются совместно за счёт того, что гребной вал прошлифован в носовом конце для размещения поперечного штифта, который крепит носовой конец штанги к кольцу или втулке, охватывающим вал. Втулка соединена с невращающимся корпусом при помощи упорных колец. Для управления шагом лопасти корпус перемещается в аксиальном направлении при помощи приводимой вручную червячной передачи или двух гидроцилиндров. Такие конструкции используются для передачи мощностей, не превышающих 700 кВт.

Для установок мощностью до 2500 кВт устройство ступицы может быть подобным, но сервомотор имеет другую конструкцию. Гидравлический сервомотор обычно устанавливается на участке промежуточного вала, имеющем увеличенный диаметр, как это показано на рис.19.

В некоторых случаях для уменьшения длины цилиндр гидравлического сервомотора устанавливается в редукторе.

Масло к вращающемуся сервомотору подается через маслораспределитель - невращающейся маслобуксы, в которой имеются внутренние кольцевые полости для двухходовой подачи и возврата масла. Масло достигает боковых поверхностей сервомотора через радиальные сверления в валу. Уплотнение вала низкого давления на обоих торцах маслобуксы совместно со сливным устройством возвращают протечки масла высокого давления в масляную цистерну.

Если в качестве смазочного материала используется консистентная смазка, то при неполном заполнении смазкой ступицы винта могут возникнуть проблемы при управлении ВРШ. В связи с этим во многих ВРШ с расположенными внутри судна сервомоторами используется цельная, заполняемая смазочным маслом ступица. На рис.20 показана заполняемая маслом ступица ВРШ.

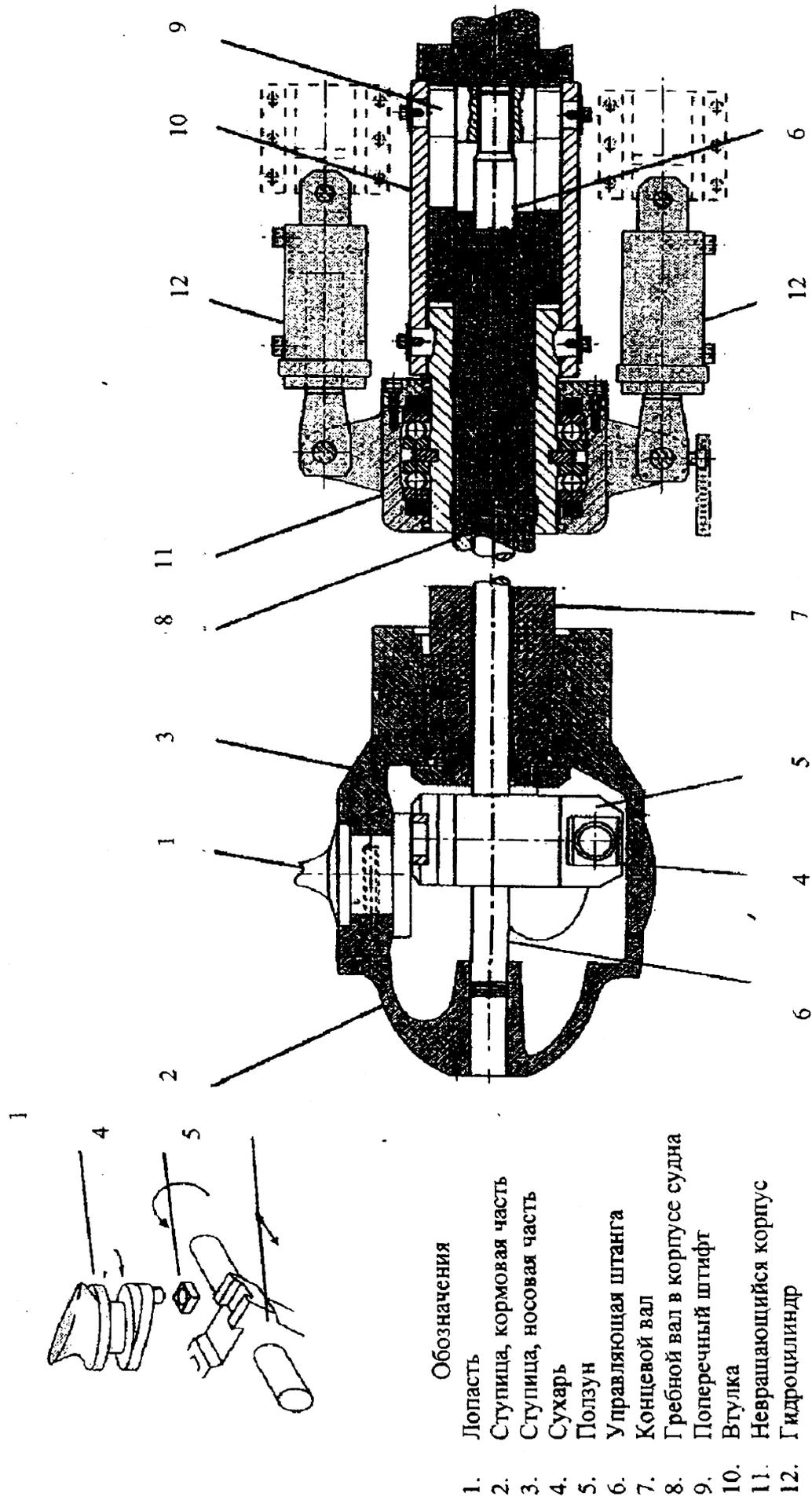
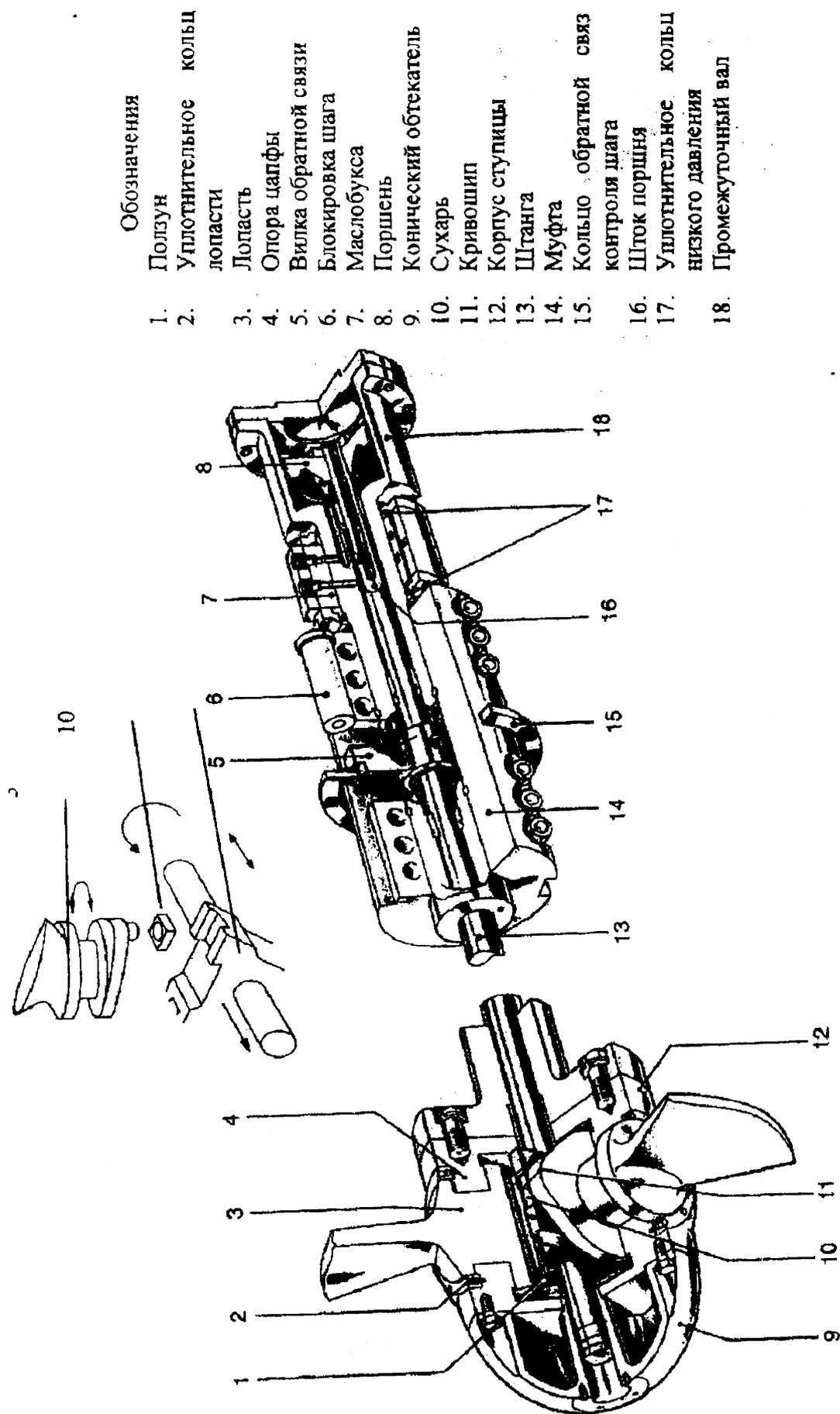


Рис. 18. Малоразмерный ВРШ



- Обозначения
1. Ползун
 2. Уплотнительное кольцо
 3. Лопасть
 4. Опора цапфы
 5. Вилка обратной связи
 6. Блокировка шага
 7. Маслобукса
 8. Поршень
 9. Конический обтекатель
 10. Сухарь
 11. Кривошип
 12. Корпус ступицы
 13. Штанга
 14. Муфта
 15. Кольцо обратной связи контроля шага
 16. Шток поршня
 17. Уплотнительное кольцо низкого давления
 18. Промежуточный вал

Рис. 19. ВРШ с вращающимся сервомотором, расположенным внутри промежуточного вала

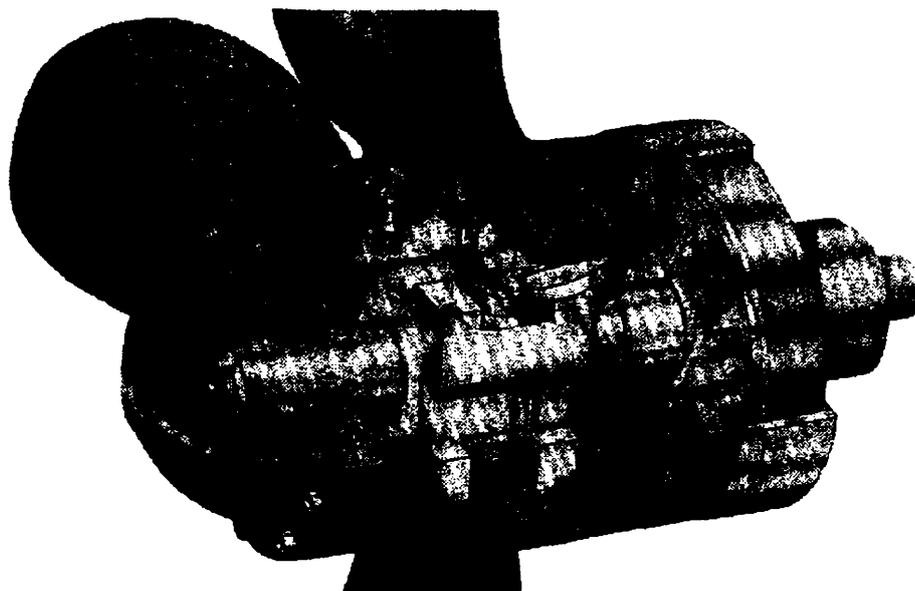


Рис. 20. Заполняемая маслом ступица ВРШ при расположении сервомотора внутри корпуса судна

В этих ВРШ лопасти крепятся болтами к стальным втулкам кривошипа, которые несут эксцентрикующие пальцы и образуют основные рабочие поверхности подшипников лопастей. Подобные гребные винты обычно применяются для мощностей, достигающих 5000 кВт, однако известно использование этого типа ВРШ и при больших мощностях.

5.2 Большие ВРШ с размещением сервомотора в ступице

В ВРШ с диаметрами ступицы более 0,9 м сервомоторы для изменения шага обычно устанавливают внутри корпуса ступицы, хотя такое размещение сервомоторов применяют и в гребных винтах значительно меньших размеров. При этом в ступице избыточное давление смазочного масла поддерживается напорной цистермой, расположенной внутри корпуса судна выше ватерлинии.

В таких гребных винтах лопасти обычно крепятся болтами, что облегчает замену лопастей и позволяет применять более прочную конструкцию. Сервомоторы и механизмы изменения шага имеют большое разнообразие конструктивных решений:

- местоположение клапана изменения шага;
- положение сервомотора в ступице;

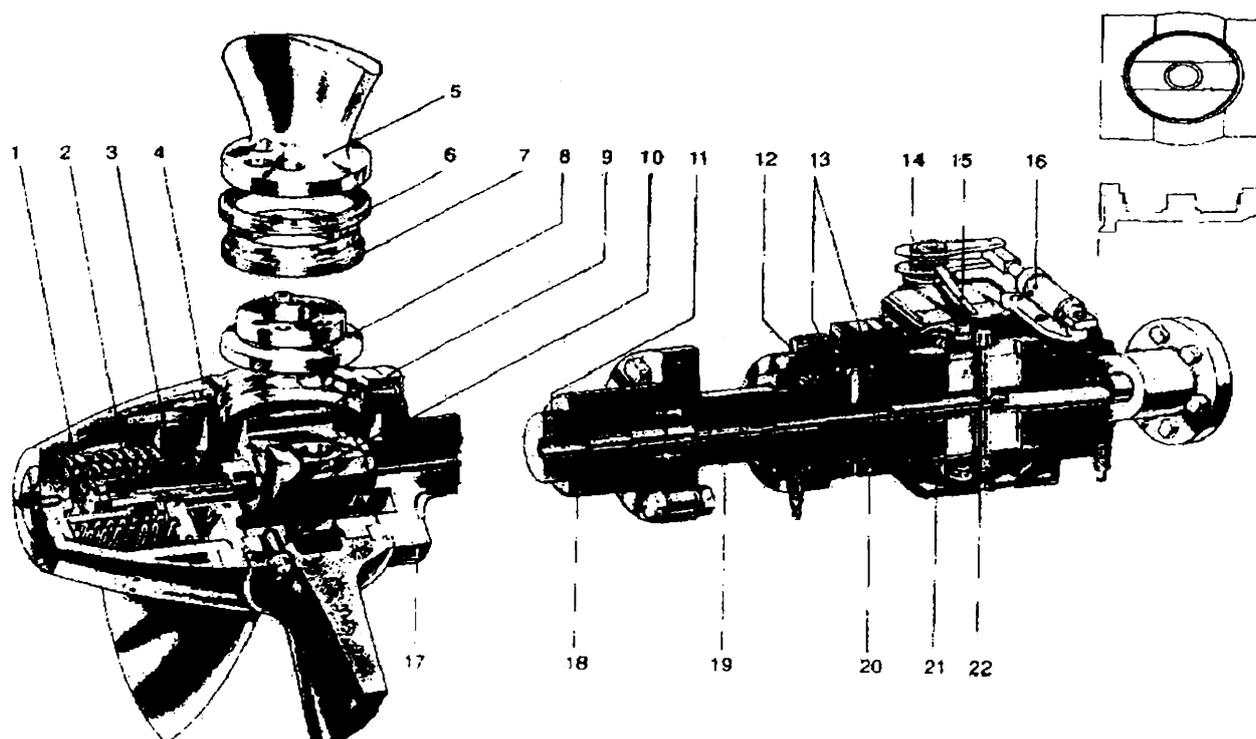
- механизм, используемый для преобразования движения сервомотора в изменение шага.

Ниже приводится описание нескольких типичных конструкций.

5.2.1 Гребной винт с клапаном изменения шага в ступице

На рис.21 показан ВРШ типа S фирмы КаМеВа, который имеет наибольшее распространение на морских судах. В этой конструкции лопасти крепятся болтами к втулкам кривошипа, а в корпусе ступицы расположены неразъемные цапфы для опорных и упорных подшипников. Поскольку подшипники цапфы имеют малый диаметр, то результирующий момент трения от радиальных и аксиальных усилий невелик.

На поршневом штоке размещен ползун с пазами для сухарей, которые приводят в движение эксцентриковые пальцы во втулках кривошипа. Так как эта конструкция позволяет применять сервомоторы большого диаметра, то рабочее давление масла в сервомоторе имеет сравнительно малое значение, обычно не превышающее 6,0 МПа. В этой конструкции масло высокого давления подводится к ступице через полый вал к сервоклапану управления, который служит для регулировки подачи масла к любой стороне цилиндра сервомотора. Втулка клапана установлена в полости поршневого штока, а золотник прикреплен к маслораспределительному патрубку.



- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1. Предохранительные пружины ступицы | 13. Подвод масла высокого давления |
| 2. Сервоклапан | 14. Рычаг вилки |
| 3. Поршень | 15. Указатель шага |
| 4. Ступица | 16. Вспомогательный сервомотор |
| 5. Лопасть | 17. Предохранительная переходная втулка вала |
| 6. Уплотнительное кольцо ступицы | 18. Съемная муфта |
| 7. Опорное кольцо | 19. Вал распределителя подвода масла |
| 8. Втулка кривошипа | 20. Распределитель подвода масла |
| 9. Ползун | 21. Скользящее кольцо |
| 10. Сухарь | 22. Штифт держателя |
| 11. Шток клапана | |
| 12. Подвод масла низкого давления | |

Рис. 21. ВРШ с сервомотором и клапаном управления, размещёнными в ступице

Когда маслораспределительный патрубок и золотник движутся вдоль оси, то давление масла с одной стороны поршня увеличивается, в то время как с другой стороны масло возвращается в полость

вала. Поршень и втулка с клапаном следуют за движением золотника до тех пор, пока втулка не установится в нейтральном положении по отношению к золотнику. Таким образом положение поршня «отслеживает» движение маслораспределительного патрубка.

Обычно на одновинтовых судах сервомотор включает в себя пружины (см. рис.21). В случае падения давления масла гребной винт примет положение шага полного хода вперед и судно сможет продолжать идти на сниженной мощности, используя гребной винт как ВФШ. Поскольку пружины создают меньшее усилие, чем может развить сервомотор, то следует проявлять определенные меры предосторожности, так как при высокой частоте вращения или быстром ее наборе шаг лопастей винта может внезапно занять положение полного хода назад.

Вал распределителя подвода масла имеет сверления, а маслораспределительная полость совершает осевые движения при помощи пальца, прорези и вилки, которые приводятся в действие вспомогательным сервомотором. Органы управления устанавливают маслораспределительную полость в положение, соответствующее требуемому шагу лопастей, также посредством вспомогательного сервомотора.

Основным преимуществом установки клапана регулирования шага в ступице винта является то, что требуется только одна маслораспределительная полость (патрубок), установленная в центральном сверлении вала, что упрощает конструкцию. К недостаткам этих конструкций следует отнести:

- при установке шага возможны небольшие погрешности, так как сигнал обратной связи фактически измеряет шаг, установленный вспомогательным сервомотором, а не шаг, на который развернута лопасть, а они могут отличаться на некоторую величину;
- клапаны управления могут быть источником шума, что неприемлемо для кораблей военно-морского флота или любого другого судна, для которого требуются низкие шумовые характеристики винтов;
- невозможен доступ к клапану управления.

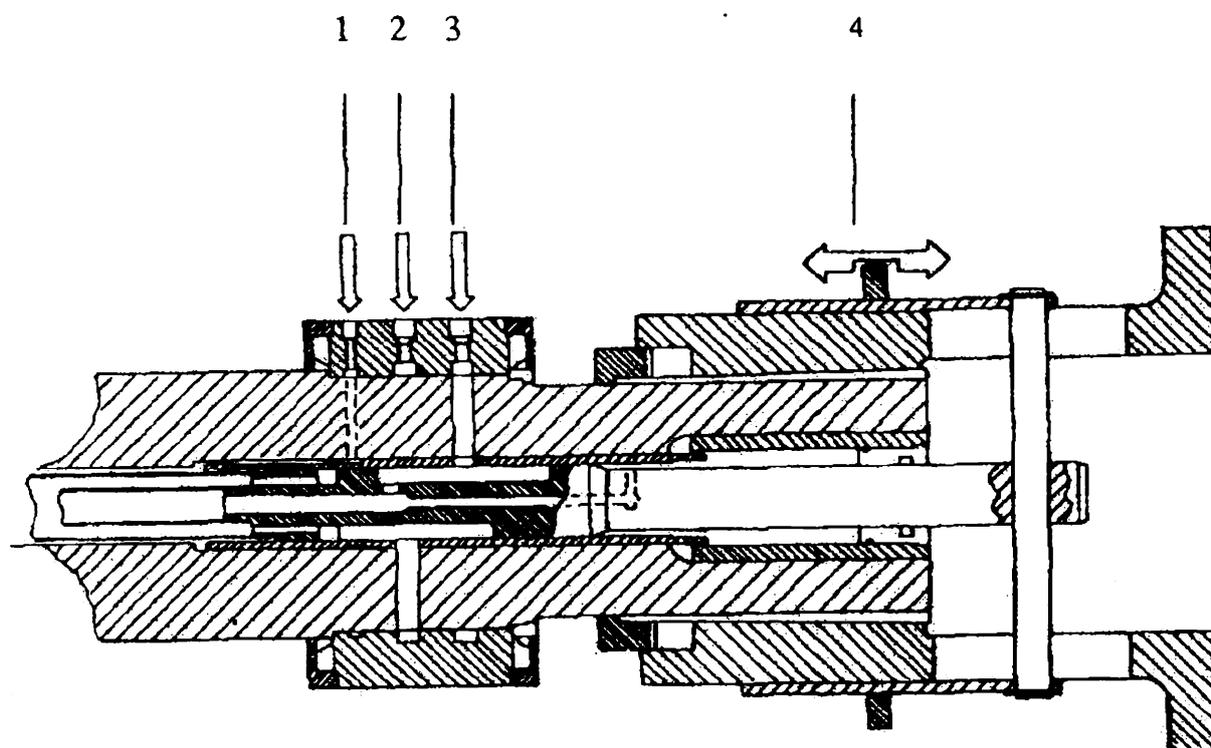
5.2.2 Гребной винт с клапаном изменения шага, расположенным внутри судна

В настоящее время у большинства ВРШ клапан изменения шага расположен внутри судна. В более ранних конструкциях, если клапаны изменения шага устанавливались внутри судна и представляли собой клапаны золотникового типа, они монтировались на маслоподводящей магистрали. Изменения шага винта задавались смещением золотника в клапанной втулке, и при этом устанавливалась обратная связь в виде "рычага преследования" так, чтобы золотник восстанавливал свое нейтральное положение во втулке после разворота лопастей на требуемый шаг. В современных конструкциях для изменения шага применяются клапаны пропорционального регулирования. Система управления сравнивает требуемый шаг с сигналом обратной связи шага. Затем она выдает сигнал на клапан пропорционального регулирования для обеспечения больших скоростей потока управляющего масла, если требуется значительное изменение шага, и меньших скоростей потока управляющего масла, когда фактический шаг близок к заданному. Конструкции винтов фирмы КаМеВа, типа XF5, являющиеся примером современной ступицы, применяют соленоидные клапаны пропорционального регулирования шага, устанавливаемые внутри корпуса судна. В этой конструкции отсутствуют радиальные подшипники цапф, так как лопасти устанавливаются только с помощью опорных подшипников. Это делает корпус ступицы намного проще, а усталостная прочность подшипника лопасти увеличивается.

Спаренные концентричные маслопроводы подают масло к сервомотору в ступице и отводят масло от сервомотора. Устройство уплотнения лопасти упрощено и состоит из одного уплотнительного кольца большого сечения вместо конструкции, использующей подпружиненное бронзовое кольцо, несущее два уплотнительных кольца, как показано на рис.21.

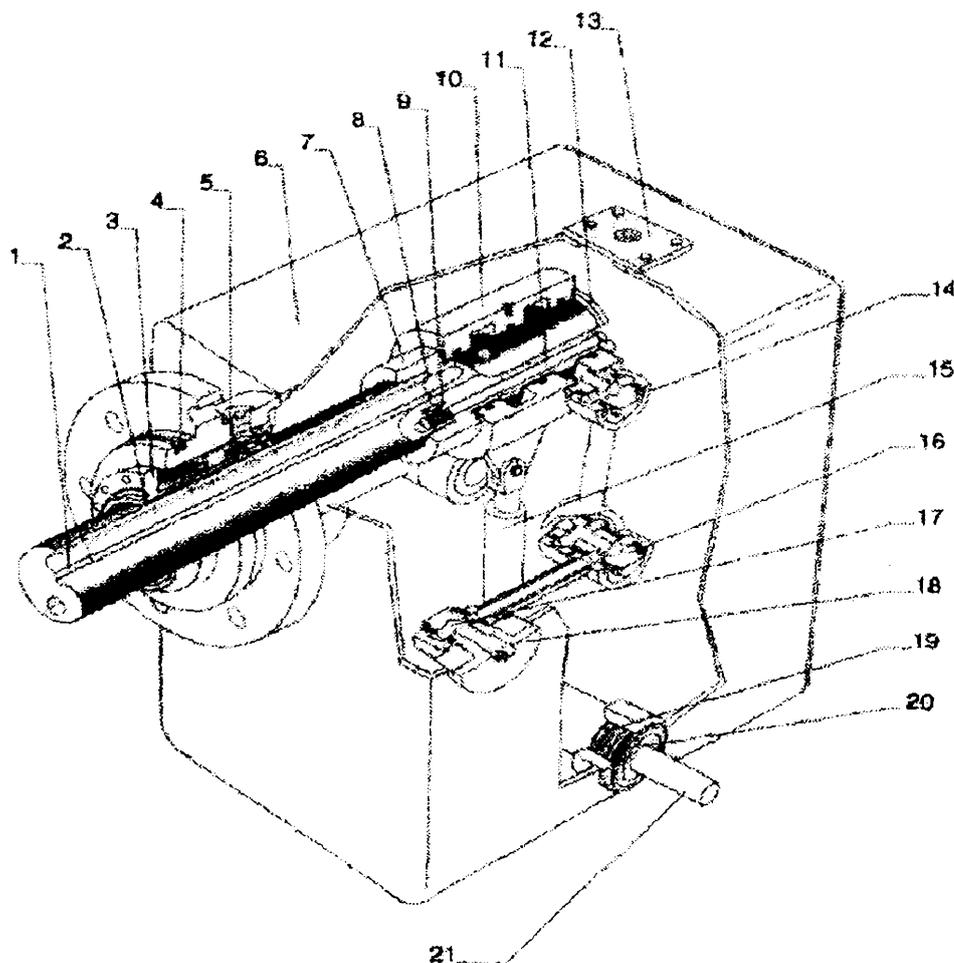
Маслораспределительная коробка, используемая со ступицами типа XF5, рис.22, имеет наиболее простую конструкцию. Вилочное приспособление на валу с прорезями является указателем аксиального положения маслораспределительных патрубков, которые крепятся к поршневому штоку сервомотора и, таким образом, указывают установленный шаг. Подобная маслораспределительная коробка устанавливается на главном валопроводе и необходима там,

где гребной винт имеет прямой привод от ДВС или электродвигателя. Она необходима также там, где применяется коаксиальная редукторная передача; ее использование также предпочтительно при протяженных валопроводах. В других случаях намного меньшая по размерам маслораспределительная коробка может устанавливаться у носового торца главного вала редуктора. Конструкция узла распределителя подвода масла, применяемая с гребными винтами типа XF5, показана на рис.23.



- 1 – Статическое давление (обеспечение избыточного давления масла в ступице)
- 2 – Рабочее давление заднего хода
- 3 – Рабочее давление переднего хода
- 4 – Обратная связь (указатель шага)

Рис. 22. Маслораспределительная коробка с пропорциональным регулированием изменения шага



- | | |
|-----------------------------------------|--------------------------|
| 1. Спаренный трубопровод | 11. Винт |
| 2. Кольцевое уплотнение | 12. Шайба |
| 3. Втулка | 13. Крышка |
| 4. Кольцевое уплотнение | 14. Шарнирное соединение |
| 5. Муфта | 15. Шток обратной связи |
| 6. Корпус | 16. Шарнирное соединение |
| 7. Короткий валик | 17. Шарнирное соединение |
| 8. Кольцевое уплотнение | 18. Подвод масла |
| 9. Штифт | 19. Подшипник |
| 10. Кольцо распределителя подвода масла | 20. Кольцевое уплотнение |
| | 21. Вал обратной связи |

Рис. 23. Распределительная коробка, расположенная в носовой части редуктора

В конструкциях фирмы Вяртсила НСД типа Н применяется только один маслораспределительный патрубок между размещённым внутри корпуса судна клапаном управления и установленным в

ступице сервомотором. Канал этого патрубка присоединен к одной стороне сервомотора, а кольцевая камера между этим патрубком и полостью вала соединяется с другой стороной сервомотора. Используется общая система смазки ступицы гребного винта и дейдвудных подшипников. Масло поступает в ступицу, проходя между втулкой кормового уплотнения вала и самим валом и затем через сверление во фланце гребного вала.

5.2.3 Гребной винт с сервомотором, расположенным между лопастями

В некоторых конструкциях ступицы ВРШ и цилиндр сервомотора располагается между лопастями. В качестве примера такой конструкции на рис.24 и 25 представлен ВРШ фирмы Стоун Викерс типа XL.

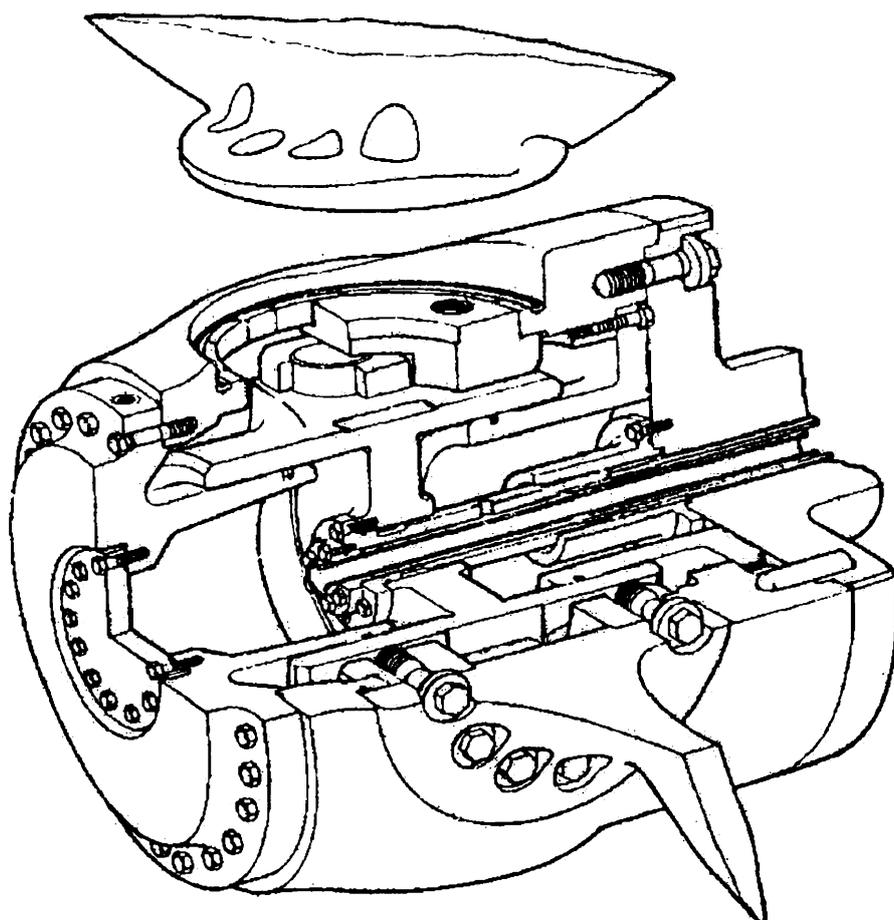


Рис. 24. Ступица ВРШ с сервомотором между лопастями

В этой конструкции ступица винта укорочена, однако, вследствие ограничения диаметра цилиндра сервомотора, требуется большее давление масла, чем в конструкциях с размещением сервомотора с кормовой стороны лопастей. При этом такие конструкции требуют давлений масла в сервомоторе до 15,0 мПа, что приемлемо по стандартам обычной гидравлической системы.

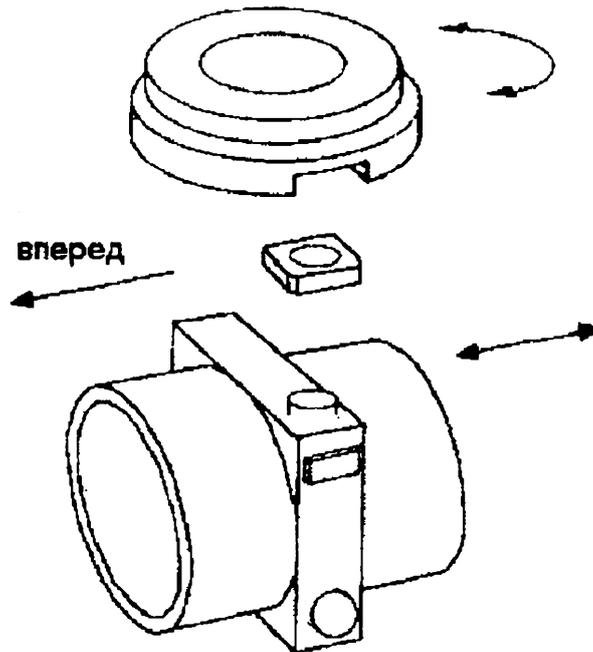


Рис. 25. Механизм изменения шага для ступицы, показанной на рис. 24

Когда сервомотор размещен между лопастями, то удобнее применять устройство, которое может называться скорее движущимся цилиндром, чем движущимся поршнем. Обычный механизм, состоящий из пальца кривошипа и паза, может тогда быть «обращён» за счет того, что палец станет частью цилиндра сервомотора, а паз будет выполнен во втулке кривошипа, к которой лопасть крепится болтами.

Использование более высокого давления масла для обеспечения работы сервомотора означает, что особое внимание должно быть обращено на конструкцию маслоподводящего устройства, когда оно располагается вокруг вала большого диаметра. Торцевые уплотнения большого диаметра по этой причине имели бы высокую стоимость, поэтому в этих случаях обычно применяются уплотнения втулочного типа. Если не принять никаких специальных мер, то

давление в кольцевом канале будет заставлять втулку расширяться, увеличивая зазор между валом и втулкой. По мере повышения давления увеличиваются утечки масла из напорных полостей и магистралей, находящихся под действием повышенного давления. Указанная проблема может быть разрешена, если конструктивно обеспечить воздействие полного давления потока масла на наружную поверхность втулки и кольцевой канал. Это приведет к уменьшению зазора при повышении давления и регулированию утечек масла. Такая конструкция показана на рис.26.

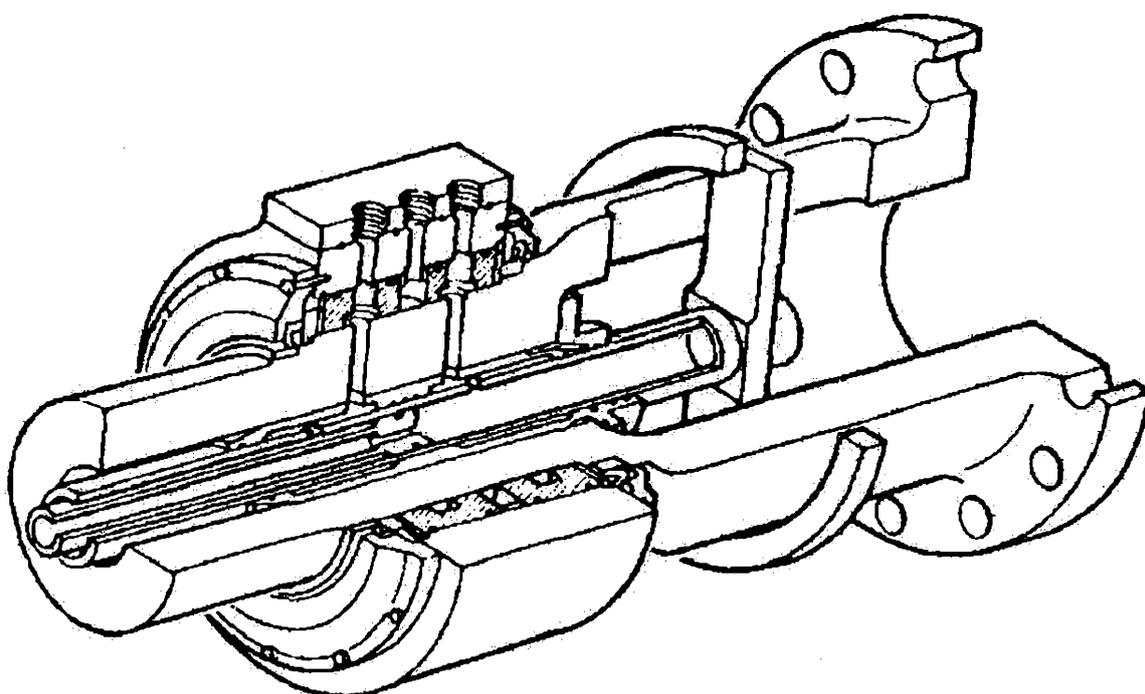


Рис. 26. Узел распределительной коробки с уплотнительными кольцами высокого давления

В некоторых ранних конструкциях для валов с большими диаметрами избегали уплотнений высокого давления: вместо них на вращающийся вал устанавливались насосы высокого давления, приводившиеся в действие шестернями (сателлитами), катившимися вокруг неподвижного кольца, имеющего внутренние зубья.

5.2.4 Ступица с МИШ рычажного типа (Link Type Hub)

Фирма "Эшер-Висс" во многих конструкциях своих гребных винтов применяет отличное от других устройство соединения

поршня сервомотора с лопастями. На рис.27 показана конструкция узла ступицы типа N.

В этих конструкциях лопасти либо крепятся болтами к цапфам, либо выполнены за одно с цапфами. Последнее предназначено для работы в тяжелых условиях, например, на ледоколах или военных кораблях.

Неразъемные цапфы обладают повышенной прочностью, однако, для замены лопастей необходимо вскрытие ступицы, демонтаж цилиндра и поршня сервомотора.

Каждая лопасть и цапфа опираются на два опорных подшипника, встроенных в корпус ступицы. Между этими подшипниками к цапфам прикреплены втулки кривошипов, которые соединяются с поршнем сервомотора при помощи шатуна или поворотного рычага.

Этот механизм создает большие крутящие моменты на лопасти по направлению вперед при умеренных значениях давления масла. В направлении назад требуются намного меньшие значения крутящего момента и, следовательно, меньшие давления масла. Полость корпуса ступицы подвергается воздействию давлений, требуемых для поворота лопастей назад.

Расположенным внутри корпуса судна клапанам требуются спаренные концентрические маслопроводы, которые размещаются в сверлениях валопровода, что является характерным для большинства современных конструкций.

Ступицы с механизмом изменения шага рычажного типа получили широкое применение.

5.3 Ступицы с сервомоторами двойного действия

Конструкции ступицы с сервомоторами двойного действия применяются там, где требуются очень большие значения крутящего момента для поворота лопастей. В этих конструкциях имеется либо два движущихся в противоположных направлениях поршня, либо один поршень и цилиндр сервомотора, движущиеся в противоположных направлениях. Примером последней конструкции служит ступица фирмы "Стоун Викерс" типа XX, показанная на рис.28.

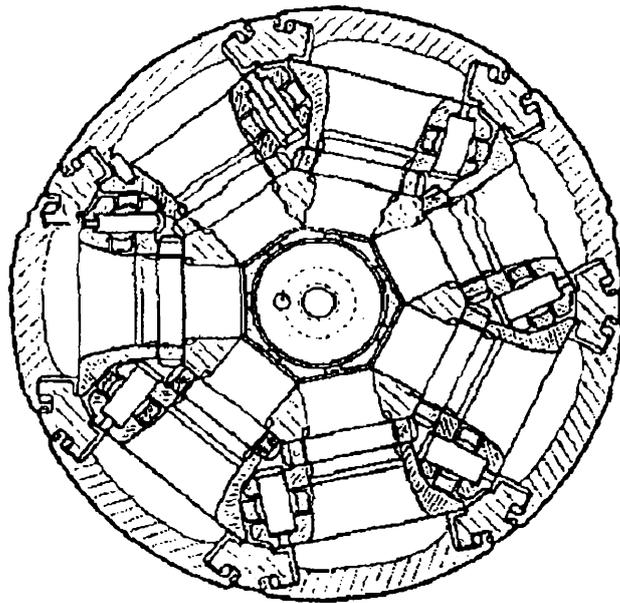
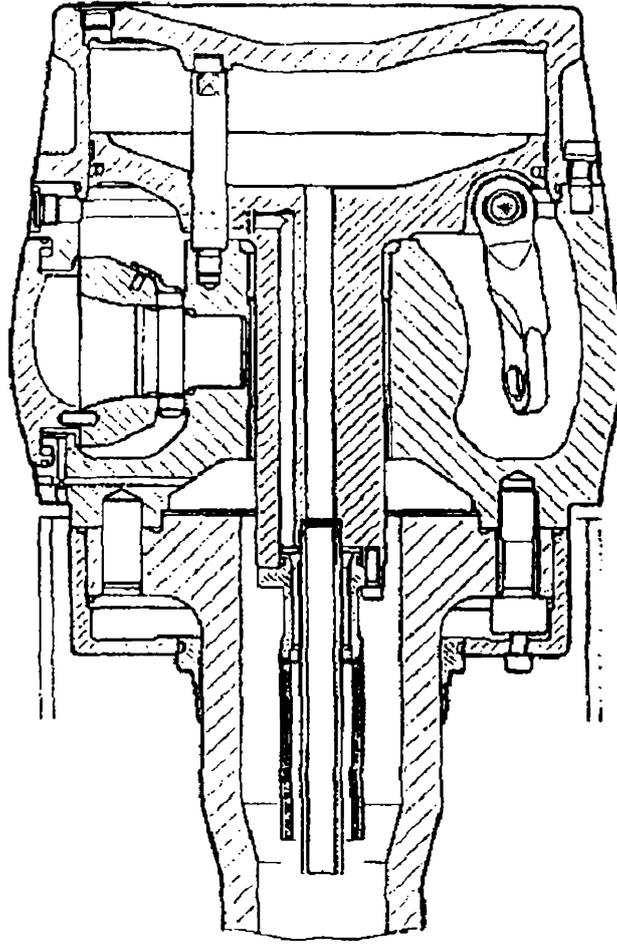


Рис. 27. Ступица с МИШ рычажного типа

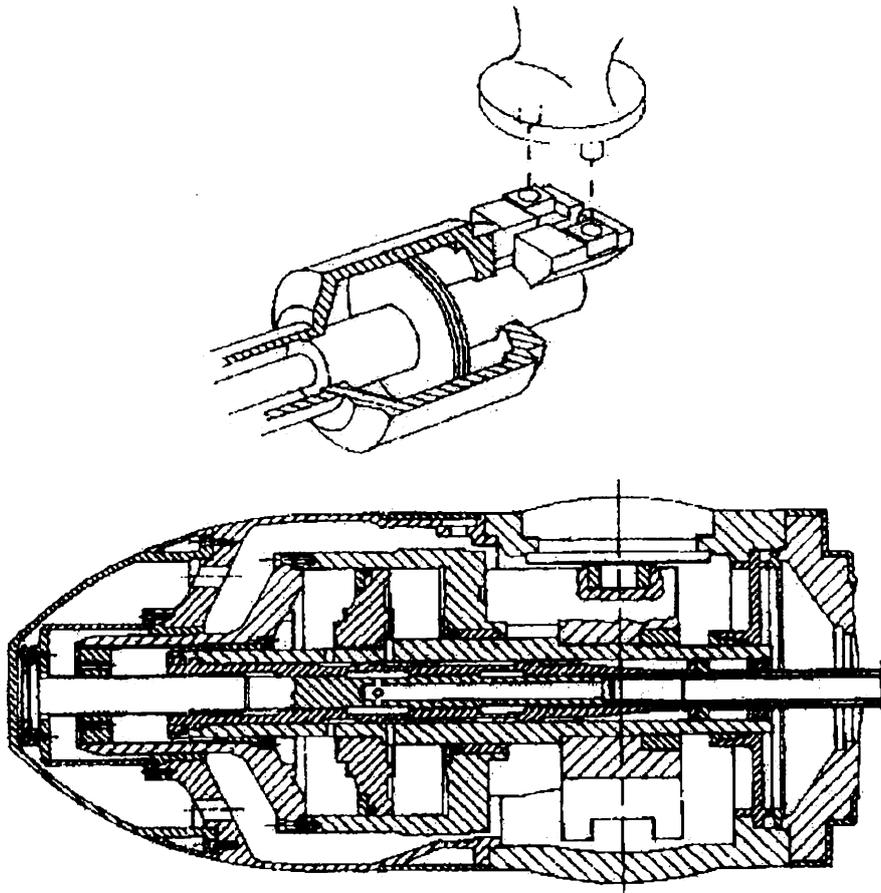


Рис. 28. Ступица ВРШ двойного действия

Каждая втулка кривошипа имеет по два пальца. В данных конструкциях сервомотор прикладывает к каждой втулке только момент пары сил, поэтому отсутствует силовое воздействие сервомотора на подшипник лопасти, а трение меньше, чем в конструкциях с сервомотором простого действия.

Конструкция двойного действия способна создать почти в два раза больший крутящий момент для поворота лопасти, по сравнению с эквивалентной конструкцией простого действия. Большие крутящие моменты требуются при высоких частотах вращения гребного винта и значительных изменениях шага. Гребные винты двойного действия применяются на многих кораблях военно-морского флота и других высокоскоростных судах. Однако, в настоящее время у военных кораблей частота вращения гребных валов значительно снижена, с целью уменьшения создаваемого винтами шума и повышения к.п.д. Кроме того, для того чтобы изменить шаг на большую величину, требуется снизить подводимую

к винту мощность и уменьшить частоту его вращения. Указанные выше причины ограничивают применение ВРШ двойного действия.

5.4 Флюгерно-реверсивные (флюгеруемые) гребные винты

Для судов, имеющих многовальные гребные установки, при плавании малыми и средними ходами, целесообразна работа одним валом. Такой режим сокращает расход топлива и время работы двигателей.

Если неработающий вал заблокирован и не вращается, то ВФШ и ВРШ с лопастями, установленными в положение, соответствующее конструктивному шагу (или несколько меньше этого значения), создают значительное сопротивление. Сопротивление уменьшается, но все еще остается высоким, если винту предоставляется возможность свободно вращаться, или работать в режиме авторотации. При помощи флюгерования лопасти разворачиваются в плоскости, параллельные оси винта. Вращение винта прекращается и в результате значительно снижается его сопротивление.

При работе одним винтом следует уменьшить шаг этого винта так, чтобы подводимая к нему мощность могла быть использована без перегрузки или превышения допустимой величины крутящего момента полного переднего хода.

Флюгеруемые гребные винты применяются также на двусторонних паромах с симметричными образованиями носа и кормы, на которых двигатели приводят во вращение гребные винты, установленные на той оконечности парома, которая в данный момент является "кормой", в то время как "носовые" гребные винты разоб- щаются и лопасти фиксируются во флюгерном положении.

Чтобы получился флюгеруемый гребной винт, максимальный диапазон шаговых углов ступицы должен быть увеличен от обычного значения, приблизительно равного 60° , до значений между 105° и 110° . Обычная конструкция ступицы, включающая втулки кривошипов, пальцы кривошипов, сухари и ползуны с прорезями (пазами), не подходит для обеспечения таких диапазонов изменения шага, поскольку создаваемые крутящие моменты на цапфах лопастей в конце хода недостаточны для преодоления сил трения. По этой причине во флюгеруемых гребных винтах обычно используются механизмы шатунного типа, показанные на рис.29 и 30.

Ступица КаМеВа, типа XF4 является альтернативной простой конструкцией флюгеруемого гребного винта и показана на рис.31.

Она подобна конструкции, представленной на рис.22, за исключением того, что ход поршня длиннее, а состоящее из пальца кривошипа и паза устройство размещено так, что палец расположен на ползуне, а паз во втулке кривошипа.

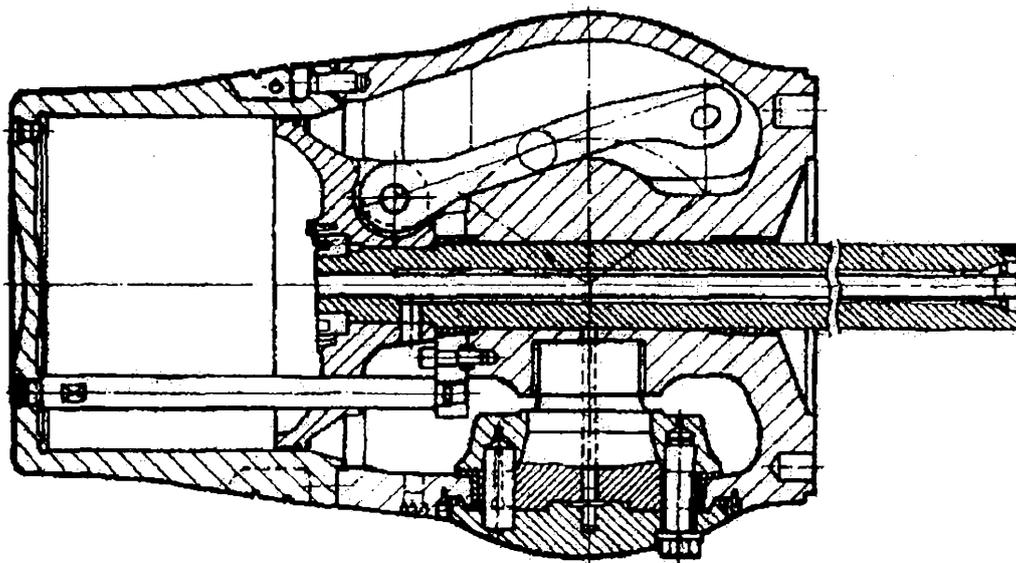


Рис. 29. Ступица ВРШ рычажного типа фирмы "Эшер-Висс" для флюгеруемого гребного винта

Это обеспечивает создание максимального крутящего момента цапфы в конце каждого хода, то есть в положении полного хода назад и во флюгерном положении. Для получения требуемого шагового угла используются длинные сухари, которые позволяют центру пальца выходить из паза втулки кривошипа в конце хода, в то время как большая часть сухаря остается внутри паза.

5.5 Гребные винты с фиксируемым углом установки лопастей

Раньше изготавливались конструкции небольших "двухпозиционных" гребных винтов, в которых шаг лопастей мог устанавливаться в двух различных положениях: меньший шаг, для обеспечения работы судна в режимах «тяжелого винта» - буксировки, траления и др., и больший шаг, для хода судна без воя. Эти системы были проще по сравнению с обычно применяемыми конструкциями ВРШ, так как ход сервомотора был ограничен. Скорость изменения шага могла быть низкой и не требовался сигнал обратной связи. Однако у

них имелись серьезные ограничения, в связи с чем они не нашли широкого применения.

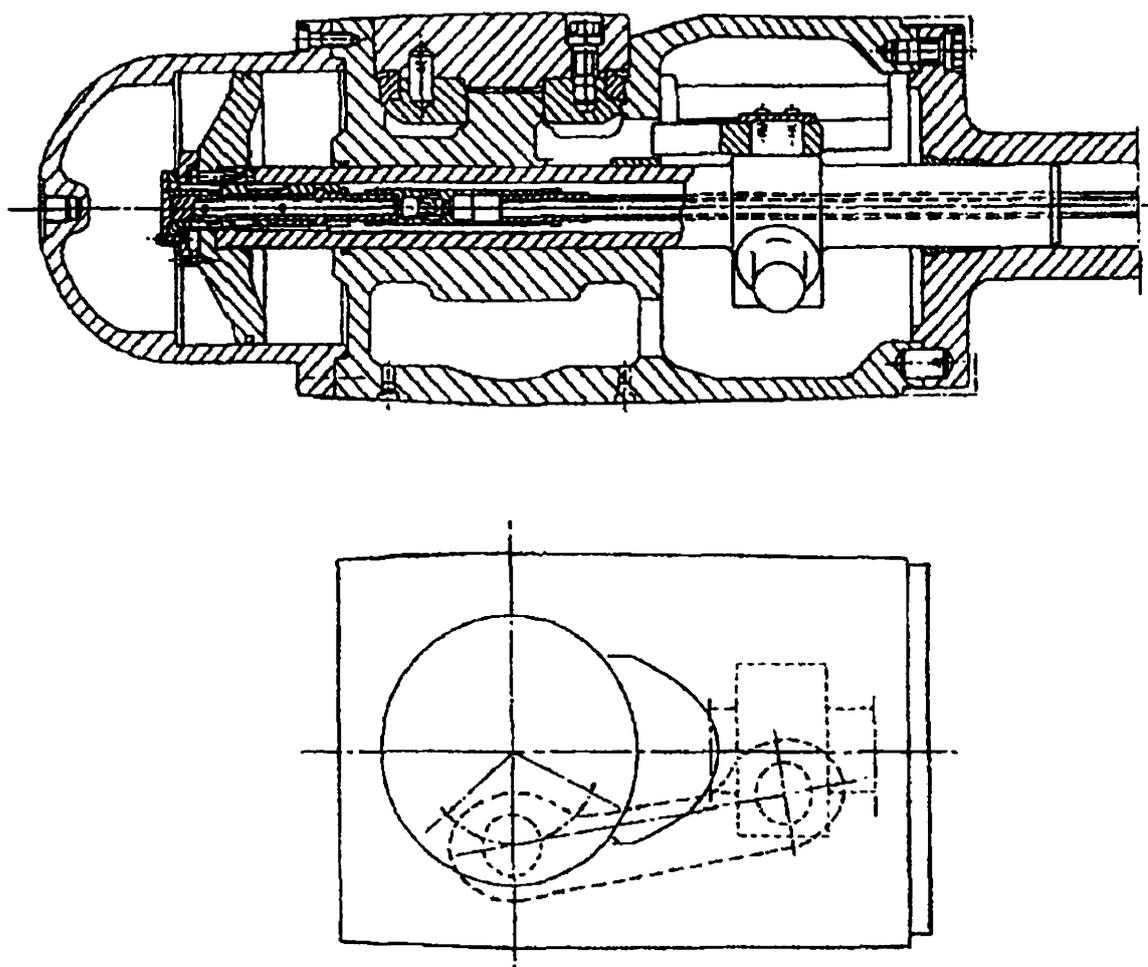
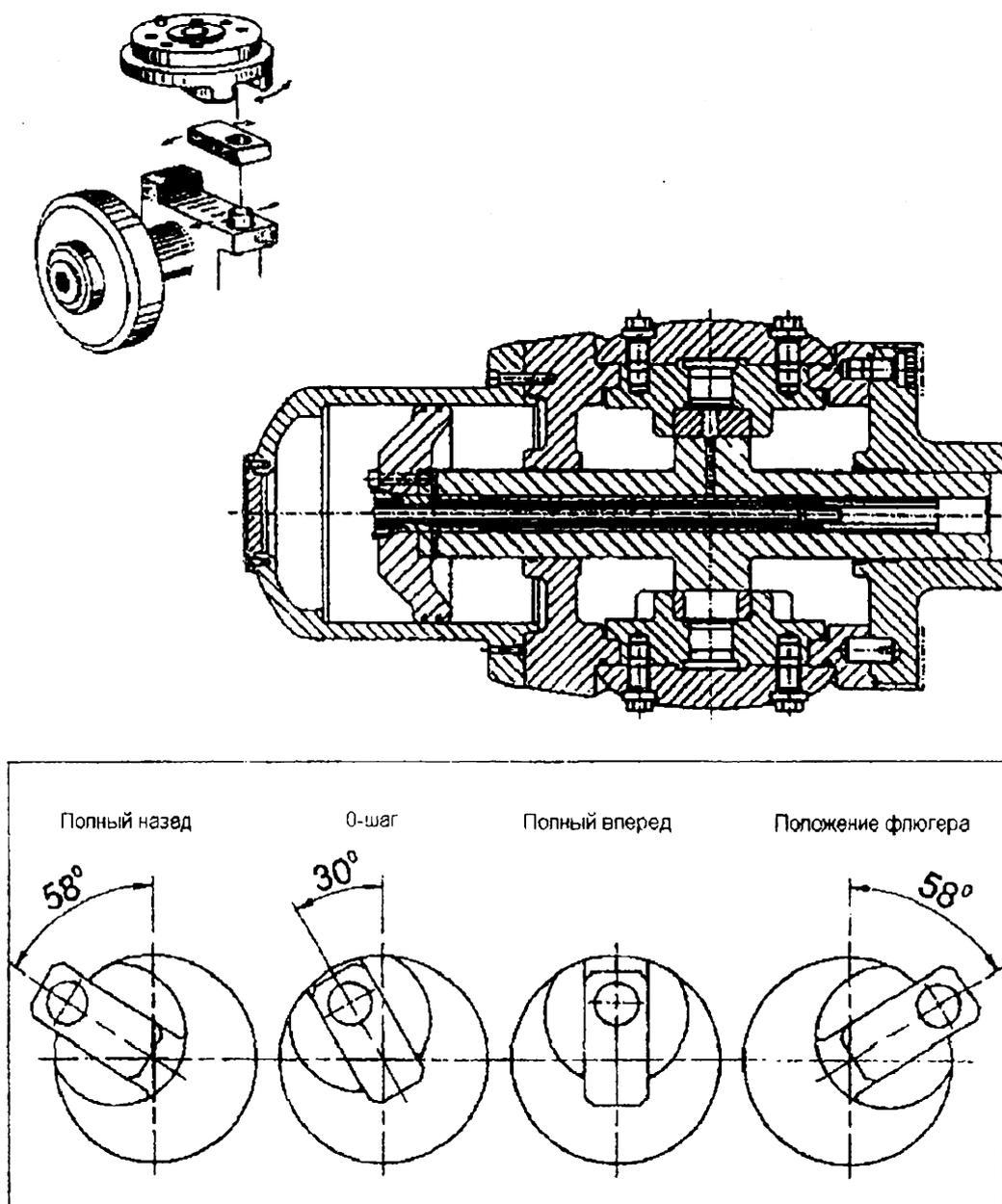


Рис. 30. Конструктивная схема ступицы типа L ВРШ фирмы "КаМеВа"



**Рис. 31. Конструкция ступицы флюгеруемого ВРШ типа FX4
Ка Ме Ва**

Фирма-изготовитель гребных винтов "Липс" поставляет на рынок гребные винты «фиксируемого шага», в которых обеспечена непрерывная регулировка шага в ограниченном диапазоне шагов переднего хода. Они предназначены для дизельных гребных установок большой мощности с прямой передачей на винт. Изменение шага может компенсировать неблагоприятные погодные условия и состояние моря, позволяя поддерживать полную частоту вращения двигателя и номинальную мощность. У них величина хода сервомотора ограничена, а вращающие моменты на цапфе не велики по сравнению с максимальными для ВРШ значениями, поэтому они обладают небольшими размерами гидравлической системы. Размеры ступицы также могут быть уменьшены, за счет чего можно использовать бóльшие дисковые отношения, что делает винты «фиксируемого шага» более экономичными, чем гребные винты полностью регулируемого шага.

5.6 Материалы

Почти все ВФШ и те детали и части ВРШ, которые подвергаются воздействию морской воды, изготавливаются либо из бронзы, либо из нержавеющей стали.

В своё время большинство гребных винтов изготавливались из пластичных сортов латуни, высокостойких к растяжению, которые обычно относят к марганцовистой бронзе. Затем использование этого материала для изготовления гребных винтов шло на спад, но ещё сейчас в эксплуатации находится большое количество гребных винтов из марганцовистой бронзы. Высокостойкие к растяжению сорта латуни являются сплавами обычно около 60% меди и 40% цинка, с добавлением небольших количеств алюминия, олова, железа, марганца и, возможно, никеля. Их относительно нетрудно отливать и подвергать механической обработке, однако, они обладают посредственными механическими свойствами и низкими значениями сопротивления коррозионной усталости. Они также могут подвергаться обесцинкованию в морской воде и коррозионному трещинообразованию. Из-за этих недостатков в настоящее время марганцовистая бронза редко используется.

В 60-е годы марганцовисто-алюминиевая бронза достаточно широко использовалась некоторыми изготовителями гребных винтов. Эти сорта бронзы обычно содержат 1÷2% марганца. У них

более высокие значения условного предела текучести, предельного растягивающего напряжения и сопротивления коррозионной усталости, чем у высокостойкой к растяжению латуни. Они также менее подвержены коррозионному трещинообразованию.

Хотя у сортов марганцево-алюминиевой бронзы несколько более высокий условный предел текучести, чем у никелево-алюминиевой бронзы, они все же имеют более низкое значение сопротивления коррозионной усталости, а для гребных винтов это свойство является самым важным. Марганцево-алюминиевая бронза применяется не так широко, как никелево-алюминиевая. Ремонт с применением сварки для лопастей из марганцево-алюминиевой бронзы всегда нуждается в последующей термической обработке, в то время как для никелево-алюминиевой бронзы это не обязательно. Из-за этих недостатков марганцево-алюминиевая бронза редко применяется в настоящее время и подавляющее большинство гребных винтов изготавливаются теперь из никелево-алюминиевых сортов бронзы.

Сорта никелево-алюминиевой бронзы, применяемые для изготовления гребных винтов, варьируются по составу, обычно они содержат 9-10% алюминия и по 4-5,5% железа и никеля. Как было указано выше, никелево-алюминиевая бронза имеет значительно более высокое сопротивление усталости в морской воде, чем марганцевисто-алюминиевая бронза и она не подвержена коррозионному трещинообразованию.

Важным свойством материалов гребных винтов является их сопротивляемость кавитационной эрозии. Никелево-алюминиевые бронзы имеют бóльшую сопротивляемость кавитационной эрозии, чем марганцево-алюминиевые и магниевые-алюминиевые бронзы. Винты, изготовленные из никелево-алюминиевой бронзы и магниевые-алюминиевой бронзы, имеют приблизительно в три раза бóльшую сопротивляемость износу или кавитационной эрозии входных кромок и краёв лопастей, чем винты из марганцевистых бронз.

В шестидесятые и семидесятые годы некоторыми фирмами-изготовителями достаточно широко применялись нержавеющие стали. Однако, в настоящее время их применение ограничено такими гребными винтами, где свойства нержавеющей стали наиболее предпочтительны. Для большинства гребных винтов нержавеющая

сталь не лучше никелево-алюминиевой бронзы, а подходящие сорта нержавеющей стали намного дороже. Несмотря на это, фирма «Вяртсила НСД» применяет для изготовления корпуса ступицы высокопрочные нержавеющие стали практически во всех ВРШ, за исключением маломощных. Считается, что это придает конструкции ступицы компактность. В окнах ступиц из нержавеющей стали, предназначенных для монтажа лопастей, устанавливаются подшипники скольжения с уменьшенным коэффициентом трения. Лопасты, монтируемые на таких ступицах, изготавливаются из никелево-алюминиевой бронзы, за исключением тех особых случаев, когда условия работы позволяют применение нержавеющих сталей.

Для изготовления гребных винтов применяются три основных вида нержавеющих сталей. Это 13% хромомартенситная сталь, 18% хромистая сталь, 8% никелевая сталь, 3% молибдено-аустенитная сталь, 13% хромомартенситная сталь (типа отечественной 1Х14НДЛ), 18% хромистая сталь (типа отечественной ОХ17Н3Г42ТЛ). Недавно освоено производство ВРШ из 15-25% хромистой, выплавленной дуплекс-процессом, 5% никелевой (аустенитная и мартенситная) нержавеющей стали.

Аустенитные нержавеющие стали имеют не очень высокую прочность, однако они более вязки и хорошо противостоят ударным нагрузкам. Эти материалы используются преимущественно при изготовлении гребных винтов для малых речных и озерных судов.

Мартенситная нержавеющая сталь применялась для изготовления гребных винтов многих судов дальнего плавания. Ее условный предел текучести достаточно высок, хотя предел прочности при растяжении такой же, как и у алюминиевой бронзы. Значения сопротивления коррозионной усталости лишь приближаются к значениям высокостойкой к растяжению латуни и намного ниже, чем у никелево-алюминиевой бронзы. Единственным главным преимуществом мартенситной нержавеющей стали является её очень высокая сопротивляемость ударным воздействиям. Поэтому эта сталь является полезным материалом для изготовления гребных винтов, подверженных таким воздействиям, например, на дноуглубительных снарядах.

Новейшие сорта нержавеющей стали, выплавленные дуплекс-процессом, имеют большую сопротивляемость коррозионной усталости и высокую механическую прочность. Поэтому они спо-

способны сопротивляться ударной нагрузке и пригодны для изготовления гребных винтов высокого ледового класса.

6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6.1 Системы гидравлики

За исключением небольших ВРШ, шаг лопастей регулируется гидравлическими системами. Сервомотор устанавливается либо внутри корпуса судна, либо в ступице гребного винта. Существует много разновидностей гидравлических систем, хотя в широком смысле они могут быть сведены к следующим двум категориям.

Замкнутые контуры – насос постоянной или переменной производительности подает масло к сервомотору, после чего оно возвращается непосредственно на всасывание насоса.

Разомкнутые контуры – насос постоянной производительности подает масло к клапану изменения шага (распределительному клапану), который подаёт масло под давлением к одной или другой стороне сервомотора и возвращает масло в цистерну с другой стороны сервомотора, когда требуется изменить шаг. При сохранении (удержании) шага масло, нагнетаемое насосом, направляется в цистерну.

Система *замкнутого контура*, оборудованная насосом переменной производительности, изящна по конструкции, так как масло должно перекачиваться лишь при необходимости изменения шага. При такой концепции экономится энергия на удержание шага. Однако, эти системы требуют включения в состав оборудования подкачивающего (бустерного) насоса для создания определенного давления в системе. Производительность бустерного насоса должна быть не менее 15-20% от производительности насоса сервомотора.

В большинстве установок ВРШ используются гидросистемы *разомкнутого контура* с насосами постоянной производительности (шестеренчатого, лопастного или винтового типа). Хотя для простейшей системы требуется лишь один клапан управления, большинство систем включают в свой состав дополнительное оборудование, обеспечивающее минимизацию расхода энергии и создание резерва для работы в аварийных ситуациях.

На рис. 32 показана типичная гидравлическая система с разомкнутым контуром, которая включает в состав оборудования два главных насосных агрегата с электроприводом одинаковой мощности. Каждый насосный агрегат состоит из насоса, обслуживающего сервомотор и имеющего большую производительность бустерного насоса.

Для небольших изменений шага или при его корректировке насос подаёт масло к сервомотору через клапан с пропорциональным управлением, а бустерный насос возвращает масло в цистерну через разгру-

зочный клапан. Для больших изменений шага разгрузочный клапан бустерного насоса открывается, направляя общий поток от сервомоторного и бустерного насосов к соответствующей стороне сервомотора, тем самым обеспечивая более быстрое изменение шага.

Момент, когда поток от бустерного насоса направляется к сервомотору, может регулироваться и обычно устанавливается так, чтобы он наступал, когда разница между требуемым шагом и фактически существующим шагом достигнет 10% шагового диапазона.

Для повышения надежности действия системы, уменьшения тепловыделений и увеличения срока службы насоса давление в магистральных контролируется и разгрузочный клапан автоматически регулирует давление на выходе насоса на 3,0-1,5МПа выше, чем рабочее давление в цилиндре сервомотора. Это обеспечивает давление, достаточное для удержания шага, и снижает потребление мощности насосными агрегатами. При работе с шагом, близким к конструктивному, требуются низкие значения давления для обеспечения работы сервомотора, при этом давление в системе сервомотора падает.

Иногда необходимо применение охладителей и подогревателей для поддержания температуры масла на требуемом уровне.

Масло низкого давления используется для смазки маслораспределительного устройства и механизма ступицы, а также для поддержания давления в узле ступицы бóльшим, чем давление заборной воды. Это достигается либо применением напорной цистерны, устанавливаемой внутри судна выше ватерлинии, либо при помощи насоса, поддерживающего требуемое значение давления. В некоторых случаях применяются оба решения. Данная система имеет много конструктивных вариантов исполнения. Например, главная масляная цистерна устанавливается на высоком уровне, а небольшая сливная цистерна внизу. Кроме того, система оборудуется перекачивающим насосом, возвращающим масло в верхнюю цистерну. В некоторых установках контрольные (запорные) клапана размещаются внутри вала маслораспределительного устройства или на цилиндре сервомотора. Это способствует удержанию шага до тех пор, пока система управления не даст команду установить новый шаг. Могут использоваться различные сочетания насосов. Один насосный агрегат может иметь механический привод непосредственно от главного двигателя, редуктора или валопровода.

Обычно только один насос или насосный агрегат находится в работе, а второй насос находится в автоматическом режиме "готов к

пуску", если давление масла в магистрали подачи к клапану управления упадет ниже заданной величины.

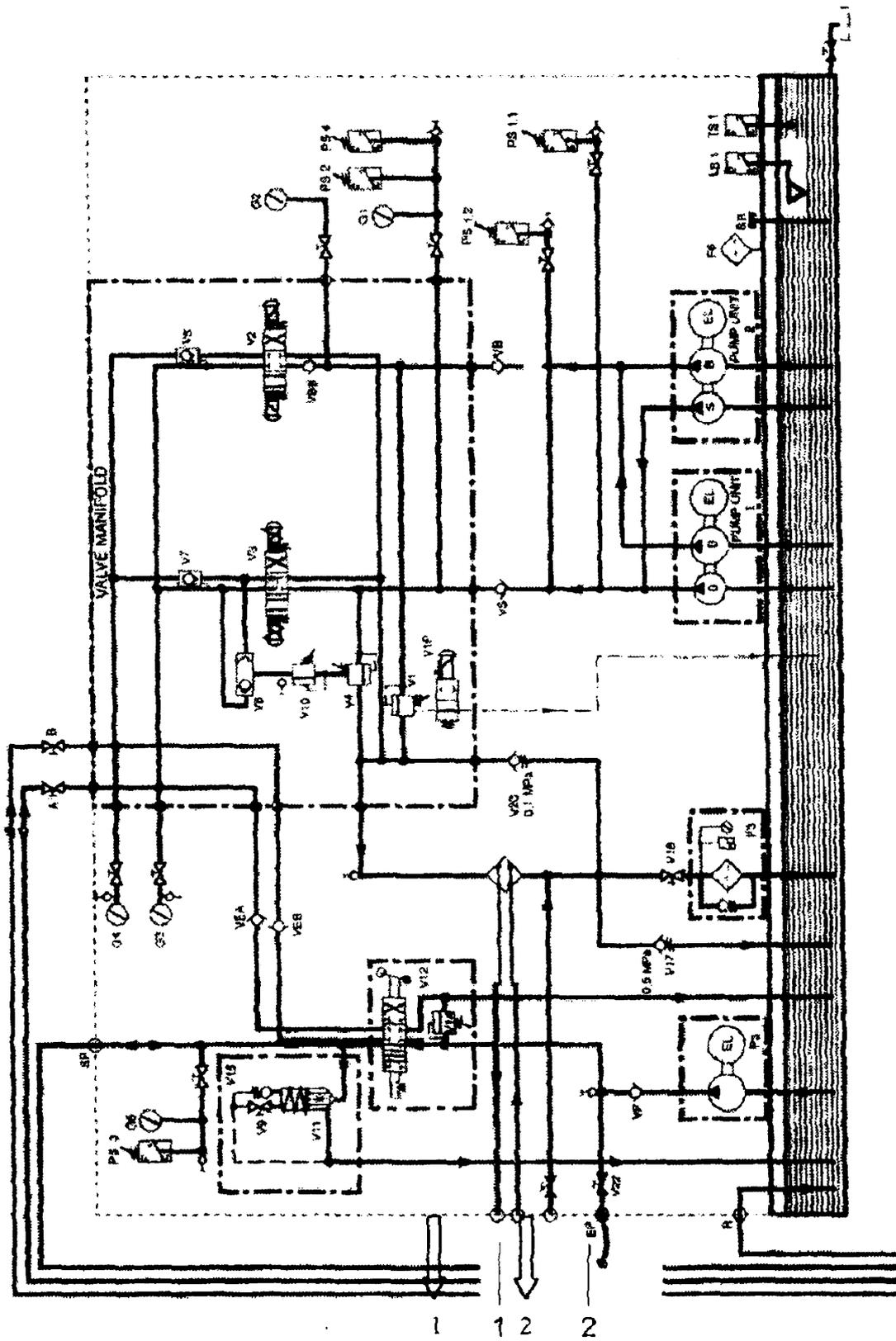
В современных установках гидравлические системы обычно поставляются как отдельный модуль, включая главную масляную цистерну, а судовой верфь изготавливает и поставляет соединительные трубопроводы. Гидравлический модуль может быть испытан в действии изготовителем, что облегчает и ускоряет задачу монтажа системы на судне.

Рабочие жидкости, применяемые в установках ВРШ, должны выполнять двойную роль: управлять сервомотором и смазывать механизмы ступицы и маслораспределения. Обычно это высококачественные минеральные масла, как правило, с классом вязкости на уровне ISO VG68, но возможны и другие варианты в зависимости от конструкции оборудования и климатических условий эксплуатации.

Там, где рабочая жидкость используется для смазки редукторных передач и для создания давления в ступице винта, сорт масла выбирается из условия обеспечения достаточности смазки шестерен редуктора. В этих случаях предпочтение отдается более высоковязким сортам, таким как ISO VG100. Это характерно для туннельных и роторных подруливающих устройств, оборудованных ВРШ, и для установок, в которых главный сервомотор ВРШ и редуктор имеют общую гидравлическую систему.

В любом случае необходимо следовать указаниям изготовителя относительно требуемых вида и сорта масла. В сомнительных случаях требуется консультация с фирмой-изготовителем перед заполнением системы маслом, не значащимся среди рекомендованных сортов.

Процесс полного удаления из системы непригодного масла требует много времени, а во многих системах из полостей ступицы гребного винта масло сливается с большим трудом, если это не делается в условиях сухого дока.



1 – Вода охлаждения ← выход
 → вход

2 – Аварийный гибкий шланг

Рис. 32. Гидравлическая система с "разомкнутым контуром"

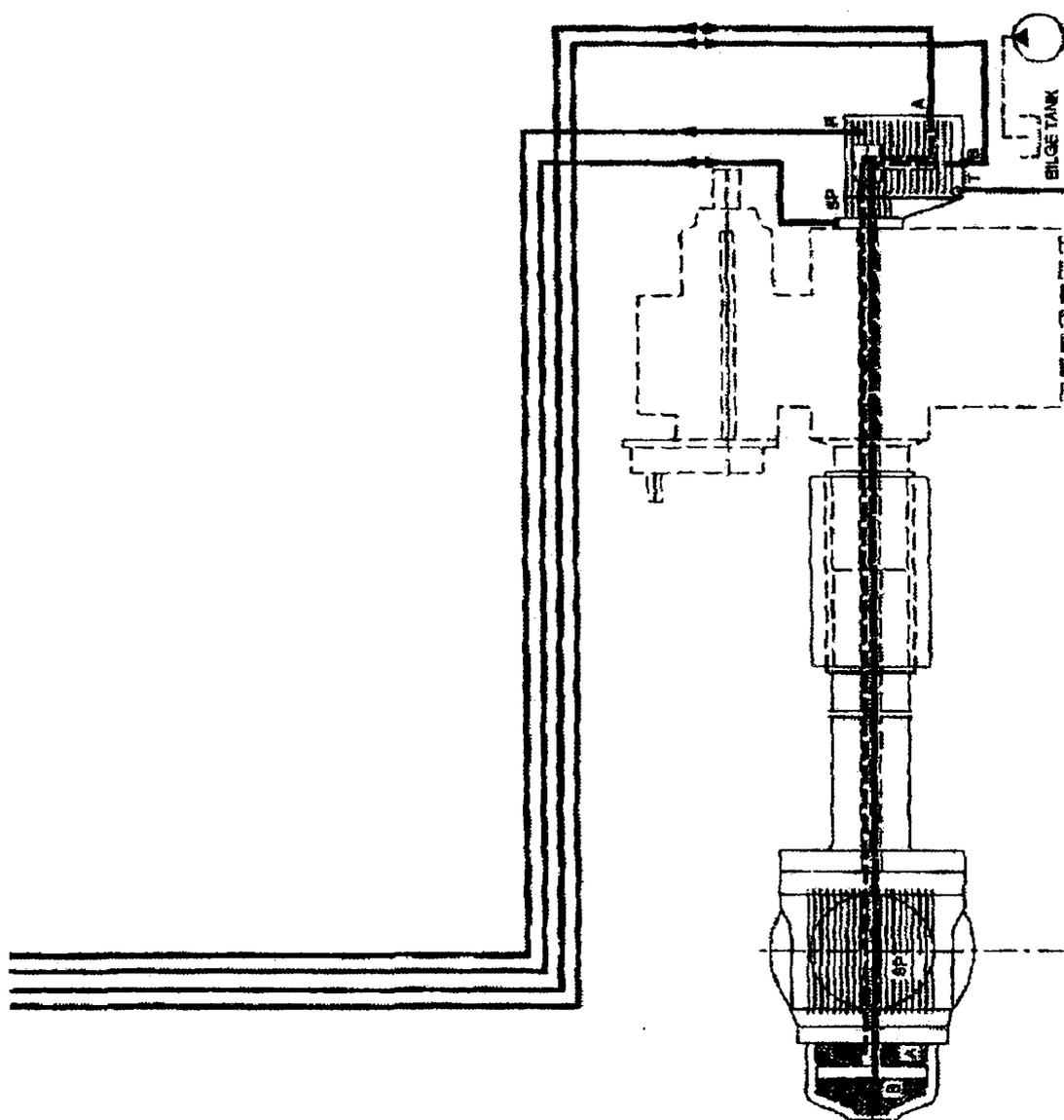


Рис. 32. Гидравлическая система с "разомкнутым контуром"
(продолжение)

Условные обозначения рис.32

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| V1 Разгрузочный и предохранительный клапан (бустерный насос) | V14 Клапан разгрузки давления |
| V2 Клапан управления (бустерный насос) | V15 Клапан управления повышенным давлением в ступице (0,4 мПа) |
| V3 Пропорциональный клапан (насос сервомотора) | V17 Нагнетательный клапан байпасного фильтра |
| V4 Разгрузочный клапан насоса сервомотора | V18 Запорный вентиль фильтра |
| V5 Управляющий (распределительный) контрольный клапан | V20, V21 Нагнетательный вентиль для байпасированного охладителя |
| V6 Сдвоенный запорный клапан | V22 Запорный вентиль (нормально закрытый) |
| V7 Управляющий (распределительный) контрольный клапан | V24 Затвор сопла |
| V9 Регулирующий клапан F, статическое давление в ступице, открыт=нормальное давление; закрыт=высокое давление | VB Контрольный клапан на магистрали от бустерного насоса |
| V10 Клапан предварительной регулировки давления насоса сервомотора (0,15 мПа) | VP Контрольный клапан насоса P3 |
| V11 Нагнетательный клапан (статическое давление) | V5 Контрольный клапан насоса сервомотора |
| V12 Селекторный клапан управления при аварии | VBB Контрольный клапан на магистрали от бустерного насоса |
| | F3 Фильтр масла слива |
| | F6 Фильтр сапуна |
| | G1 Манометр насоса сервомотора |
| | G2 Манометр бустерного насоса |
| | G3 Манометр, задний ход |
| | G4 Манометр, передний ход |
| | G5 Манометр, статическое давление |
| | SR Измерительный щуп |

| Список компонентов дистанционного контроля, указанных на рис.32 | |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Объект контроля | Описание |
| PS 1.1 | Самозапускающийся насос (установка №2) |
| PS 1.2 | Самозапускающийся насос (установка №1) |
| PS 2 | Сигнализация низкого давления в насосе сервомотора |
| PS 4 | Сигнализация высокого давления в насосе сервомотора |
| PS 3 | Сигнализация низкого статического давления в ступице |
| TS 1 | Сигнализация высокой температуры масла |
| LS 1 | Сигнализация низкого уровня масла в главной цистерне |
| F 3 | Сигнализация засорения фильтра |

Разумной мерой предосторожности перед заливкой масла в систему ВРШ является его фильтрация или, по крайней мере, процеживание. Поставляемое новое масло не всегда может быть чистым. Поэтому перед его применением необходимо выполнить анализ проб масла, чтобы убедиться в его пригодности к использованию. Если масло мутное, то можно предположить, что в нем присутствует вода.

Загрязненное масло будет вызывать быстрый износ компонентов системы и может привести к нарушениям в функционировании или полному выходу из строя клапанов управления. Приспособленность узлов гидросистемы к содержанию загрязняющих примесей в масле может быть различной. Как правило, насосы переменной производительности и управляемые сервоклапаны требуют более высокого уровня чистоты масла, чем насосы постоянной производительности и пропорциональные электромагнитные клапаны. По поводу рекомендуемого уровня чистоты масла следует обращаться к рекомендациям и инструкциям фирмы-изготовителя. Следует производить регулярный отбор проб масла для контроля и поддержания требуемого уровня чистоты масла в системе перед вводом ее в работу и в процессе эксплуатации. Если гидросистема чистая, то она обычно работает без отказов длительное время, при условии, что техническое обслуживание производится регулярно, а фильтры очищаются или заменяются, когда это необходимо. Если при анализе проб оказывается, что уровень загрязненности возрастает или на фильтрах скапливаются металлические частицы, то можно предположить, что в насосах или в механизме изменения шага имеет место повышенный износ.

Если в пробах масла или в цистернах присутствует вода, то необходимо предпринимать действия по удалению воды, отысканию и устранению источника её поступления. Следует помнить, что вода может попасть в масляную систему через палубные соединения воздушных и приемных трубопроводов цистерн запаса вследствие негерметичности крышек или через указатели уровня на масляных цистернах. Вода также может попасть в узел ступицы снаружи, если уплотнения лопастей повреждены или поддерживаются неправильные значения давления масла. Нельзя допускать содержание воды в масле гидросистемы выше 0,5%.

6.2 Автоматизация управления

В маломощных ВРШ шаг может регулироваться с мостика при помощи рукоятки, соединенной через гибкие тросы или штанги и рычаги с гидравлическим клапаном управления, который регулирует поток масла к расположенному внутри судна сервомотору.

Некоторые суда могут быть оборудованы пневматической системой управления. Датчики давления, соединенные с управляющими рычагами на посту управления, передают меняющийся сигнал давления на исполнительные механизмы, которые воздействуют как на гидравлический клапан управления ВРШ, так и на регулятор частоты вращения двигателя.

В настоящее время почти все системы управления электронные. Первые электронные системы были аналоговыми, однако современные системы являются цифровыми, микропроцессорными. Эти системы монтируются с использованием стандартных плат, а программное обеспечение дает возможность стандартной системе выполнять функции настройки (регулировки), требуемые в каждом конкретном случае. Современные цифровые системы более мобильные и гибкие, чем аналоговые, которым требуется отдельная схема для каждой функции и поэтому добавление новой функции или изменение существующей реализуется в виде новой монтажной (схемной) платы.

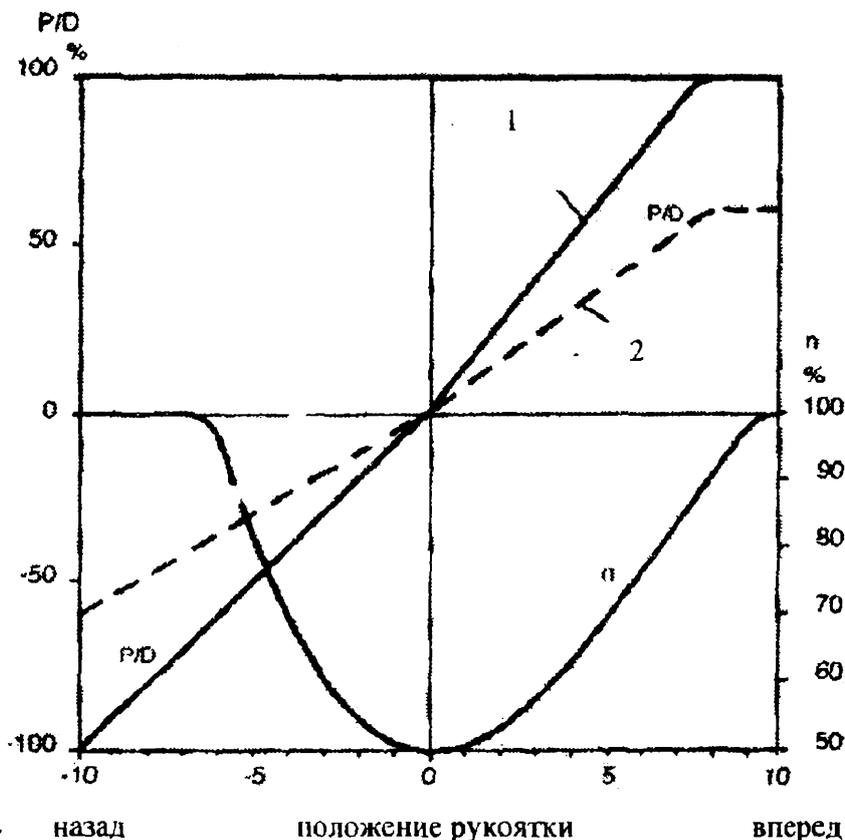
В микропроцессорных системах используется лишь небольшое количество плат (блок питания, центральный процессор, аналоговые модули ввода-вывода и цифровые модули ввода-вывода). Каждая система запрограммирована на выполнение любых требуемых функций. Применение операционного языка программирования высокого уровня значительно сокращает загруженность программным обеспечением. Настройка системы управления обычно осуществляется с помощью алфавитно-цифрового терминала, который может быть смонтирован в одном из пультов управления, обычно на пульте ЦПУ, или посредством переносного ручного терминала. Терминал дает возможность проверять наладочные параметры и производить коррекцию всех необходимых параметров и функциональных характеристик. Терминал может также использоваться как средство для локализации неисправностей. В некоторых системах вместо текстового

терминала используется графический дисплей и действующий совместно с ним терминал. В систему могут быть включены критерии, позволяющие вести непрерывные внутренние проверки и корректировки функциональных зависимостей.

На некоторых маломощных установках ВРШ каботажных судов, буксиров и траулеров имеются отдельные рукоятки управления для изменения шага гребного винта и частоты вращения двигателя. Эти простые системы позволяют опытному судоводителю обеспечить максимальную эффективность действия судовой энергетической установки при любых условиях работы. Безусловно, что для правильного подбора частоты вращения двигателя к шагу гребного винта требуется проявлять осторожность и быть внимательным, так как существует вероятность установки неблагоприятных комбинаций, что может вызвать кавитацию, снижение к.п.д. и перегрузку двигателя. По этим причинам почти у всех ВРШ применяется одна комбинированная рукоятка, управляющая как частотой вращения двигателя, так и шагом гребного винта в соответствии с установленными заранее соотношениями. У многих установок имеется также альтернативный режим работы на постоянных частотах вращения. При выборе такого режима работы комбинированная рукоятка управляет только шагом гребного винта. Положения комбинированной рукоятки обычно обозначаются в секторе шкалы от +10 (полный вперед) до -10 (полный назад).

Органы управления отрегулированы обычно таким образом, что когда рукоятка установлена на нулевой отметке, лопасти разворачиваются в положение нулевого упора (см. раздел 2.6 и раздел 3.4). Такая настройка не имеет особого значения при маневрировании судна и в настоящее время редко используется. Преимуществом такой настройки является то, что ее можно быстро выполнить в сухом доке перед началом испытаний. На фланцах лопастей наносится метка, соответствующая нулевому шаговому углу, которая совмещается с установочной меткой на корпусе ступицы, когда лопасти находятся в положении нулевого шагового угла. В отличие от этого положение нулевого упора может быть определено с достаточной степенью надежности только после проведения серии ходовых испытаний при благоприятных внешних условиях.

На комбинированной диаграмме, рис.33, показана взаимосвязь между шагом гребного винта (P/D), частотой вращения (n) двигателя или гребного винта и положением комбинированной рукоятки.



1 – рекомендуемый шаг

2 - уменьшенный шаг

Рис. 33. Комбинированная диаграмма

Практическая реализация этой взаимосвязи позволяет оптимизировать работу двигателя и гребного винта, при этом: обеспечить максимальную эффективность действия гребного винта; избежать перегрузки двигателя; произвести тщательную регулировку (коррекцию) в верхней области рабочего диапазона. В случае, показанном на рис.33, движение рукоятки в сторону от нулевой отметки сначала увеличивает только шаг, затем как шаг, так и частоту вращения. Максимальный шаг переднего хода обычно получается при некотором положении рукоятки ниже максимального, в данном случае в положении 8. Дальнейшее перемещение рукоятки в положение полного хода вперед (10) увеличивает частоту вращения до номинального значения. Изменение шага на диаграмме выражается

в процентах. Следует помнить, что 100% шаг полного хода назад меньше, чем 100% шаг полного хода вперед примерно на одну треть. Многие современные дизельные двигатели, применяемые для привода ВРШ, имеют ограниченную величину крутящего момента на сниженных частотах вращения двигателя, поэтому они не используются для привода ВФШ.

Для каждой установки устанавливается соответствующая зависимость шаг-обороты, однако, эта взаимосвязь не является идеальной для всех диапазонов рабочих режимов.

Выравнивание (коррекция) шага вручную там, где рукоятка точной настройки уменьшает крутизну характеристики шага на комбинированной диаграмме, дает оператору возможность избежать перегрузки двигателя, когда от гребного винта требуется использование полной мощности в широком диапазоне различных режимов работы. Ручная коррекция шага не только целесообразна для таких судов, как буксиры и траулеры, она также дает возможность системе регулирования приспособляться (подстраиваться) к тяжелым погодным условиям или к двигателю, который не может набрать номинальные частоты вращения.

Защита от перегрузки временно уменьшит заданный шаг и, следовательно, нагрузку двигателя, если сигнал перегрузки будет принят от регулятора двигателя. Это может случиться во время маневров или быть вызвано неблагоприятной погодой или иными условиями работы.

Когда срабатывает защита от перегрузки, то загорается лампочка аварийной сигнализации. Если перегрузка не является кратковременной, шаг должен быть уменьшен движением комбинированной рукоятки или с помощью рукоятки точной настройки.

Регулятор нагрузки автоматически ограничивает шаг в пределах всего диапазона частот вращения во избежание перегрузки двигателя. Это особенно удобно для тех дизельных двигателей, которые не могут развивать максимальную мощность при пониженных частотах вращения. Форма кривой предельной нагрузки двигателя выбрана так, чтобы она подходила двигателю, а ее уровень может регулироваться вручную с помощью рукоятки управления нагрузкой двигателя. На пульте управления с мостика предусмотрена возможность ручной коррекции предельной нагрузки так, чтобы

можно было экстренно получить номинальную (100%) мощность двигателя, если это необходимо.

В систему регулирования нагрузкой подаются сигналы, пропорциональные частоте вращения вала и положению топливной рейки, сопоставляются мощность двигателя и частота вращения вала с заданными характеристиками. Если есть необходимость, система регулирования предельных нагрузок уменьшает шаг так, чтобы мощность двигателя не превышала значения, заданного характеристикой регулирования нагрузка-частота вращения. В некоторых случаях система регулирования нагрузки не действует, если мощность двигателя меньше мощности, заданной кривой регулирования нагрузки. В других установках система регулирования нагрузки уменьшит или увеличит шаг таким образом, чтобы режим работы приближался к нагрузочной характеристике двигателя оптимально для развиваемой мощности и частоты вращения. Такая система регулирования нагрузки может обеспечить эффективную защиту силовой установки от чрезмерных колебаний нагрузки в штормовых условиях.

В установках с двумя двигателями, приводящими один гребной винт, может быть предусмотрена возможность выбора либо нормальной комбинированной характеристики для использования при двух работающих двигателях или альтернативная характеристика, применяющаяся в случаях, когда на гребной винт работает только один двигатель.

Системы управления могут включать программу "Работа" или "Прогрев", посредством которой регулируется скорость повышения мощности. Программа защищает двигатель от высокого темпа набора нагрузки и связанного с этим роста тепловых напряжений, а также обеспечивает турбонагнетателям возможность подавать воздух, требуемый для полного сгорания топлива. При наличии такой программы запросы быстрого увеличения мощности, осуществляемые передвижением комбинированной рукоятки управления, модифицируются так, чтобы мощность увеличивалась постепенно с предварительно заданной скоростью. Аналогичная программа может быть включена в систему для регулирования скорости снижения мощности, для предохранения двигателя от тепловых перегрузок и предотвращения неустойчивых режимов работы (помпажа) турбонагнетателей. Для того чтобы предусматривались аварийные

остановки, последняя из названных программ должна обеспечить быстрое уменьшение шага до требуемого значения без какой бы то ни было задержки, если комбинированная рукоятка управления передвинута ниже предварительно заданного положения переднего хода.

Если у двигателя имеется запретный диапазон частот вращения, то его можно объединить с системой регулирования частоты вращения двигателя.

Вяртсиля НСД является фирмой-изготовителем такой системы управления, в которой предусмотрена зависимость скорости изменения шага винта от нагрузки двигателя. При нагрузке двигателя ниже 50% используется максимальная скорость изменения шага. В диапазоне нагрузок двигателя выше 50% скорость изменения шага уменьшается постепенно, по мере того как растет нагрузка, до тех пор пока, при 100% нагрузке не станет использоваться более низкая скорость изменения шага. Считается, что такой принцип действия системы обеспечивает быстрое реагирование (хорошую чувствительность) и оптимальную загрузку двигателя во всем диапазоне мощностей.

У некоторых систем управления имеются другие характерные особенности, такие как "регулирование на марше", где используется сигнал обратной связи от судового лага, для поддержания постоянной скорости судна, или "вспомогательная тяга". Последний режим регулирования шага предоставляет ограниченное число регулировок шага для совместного использования с аварийной силовой установкой, такой как электропривод, когда главные двигатели выйдут из строя.

Для защиты механизмов системы управления включают в себя целый ряд сигнальных устройств и защитных блокировок.

На тех военных кораблях, где ВРШ приводятся во вращение газовыми турбинами, работа на конструктивном шаге и сниженных частотах вращения возможна до малых скоростей хода судна, так как газовая турбина может развивать достаточный крутящий момент и на низких частотах вращения. Работа на конструктивном шаге или вблизи от него для обеспечения устойчивой работы на переднем ходу обычно соответствует самым высоким значениям к.п.д. гребного винта и создает наименьший шум. По этим причинам такой режим работы наиболее распространен. На маневрах и при работе

на заднем ходу как шаг лопастей, так и частота вращения винта изменяются. Для двухвинтовых судов работа на одном валу применяется для обеспечения средних и малых скоростей хода судна, при этом на работающем гребном винте устанавливается уменьшенный шаг лопастей. В этом случае лопасти неработающего гребного винта должны быть установлены на максимально возможный шаг для того, чтобы скорость авторотации и результирующее сопротивление были как можно меньшими. Иногда предусматривается установка вспомогательного гребного электро- или гидромотора для вращения неработающего вала так, чтобы гребной винт не действовал как движитель и не вращался под воздействием потока воды. При этом шаг лопастей неработающего гребного винта также должен быть установлен на максимальное значение.

Установкам с двумя или более двигателями, приводящими один гребной винт, требуется функция распределения нагрузки. Она распределяет нагрузку между двигателями при помощи изменения положения топливной рейки. Требуемое соотношение между нагрузками двигателей будет зависеть от технического состояния двигателей, что позволит обеспечить безопасное маневрирование в аварийных ситуациях.

На высокоскоростных судах быстрое уменьшение шага, особенно при постоянных частотах вращения вала, может вызвать резкое увеличение частоты вращения двигателей (см. раздел 2.3). В этом случае предусматривается "авторотационная защита" для замедления фактической скорости уменьшения шага, когда частота вращения гребного вала превышает заданную на установленное количество процентов или когда фактическая частота вращения достигнет максимальной величины.

Положение лопастей ВРШ и частота вращения двигателя могут регулироваться как из ЦПУ, так и с ходового мостика. ЦПУ является главным постом управления, где находится переключатель перевода на другой источник команд. При переводе управления на ходовой мостик пост управления должен принять команду до того как произойдет переключение. Пост в ЦПУ путем соответствующего переключения может немедленно вернуть себе управление, забрав его у ходового мостика.

На многих судах имеются посты управления на крыльях ходового мостика и, в некоторых случаях, другие посты, такие как,

например, кормовой пост управления. Очевидным является требование, чтобы рукоятки управления на всех постах управления двигались синхронно, во избежание проблем при смене постов управления.

Раньше рукоятки управления на крыльях ходового мостика соединялись с главной рукояткой управления на мостике при помощи системы звездочек, цепей и валов. В настоящее время синхронизация рукояток осуществляется системой, так называемых, "электрических валов". Каждая рукоятка снабжена сельсинами, и все рукоятки синхронизируются с той из них, которая используется в данный момент для подачи команд.

Обычно в установке предусматривается резервный орган управления шагом, оборудованный нажимной кнопкой, который может использоваться при выходе из строя главной системы управления. Во многих случаях возможным является также регулирование шага вручную с непосредственным воздействием на клапан регулирования шага, который расположен в машинном отделении.

На рис.34 и 35 показаны типичные пульта управления, устанавливаемые на ходовом мостике и в ЦПУ одновинтового судна.

Управление ВРШ может производиться джойстиковой системой. Джойстиковые системы имеют единую рукоятку управления частотой вращения двигателей, гребными винтами, подруливающими устройствами и рулями.

Система управления может быть соединена с системой динамического позиционирования ("dynamic position system"), системой оптимизации подачи топлива или, как на некоторых паромах, с комплексной системой управления с ходового мостика.

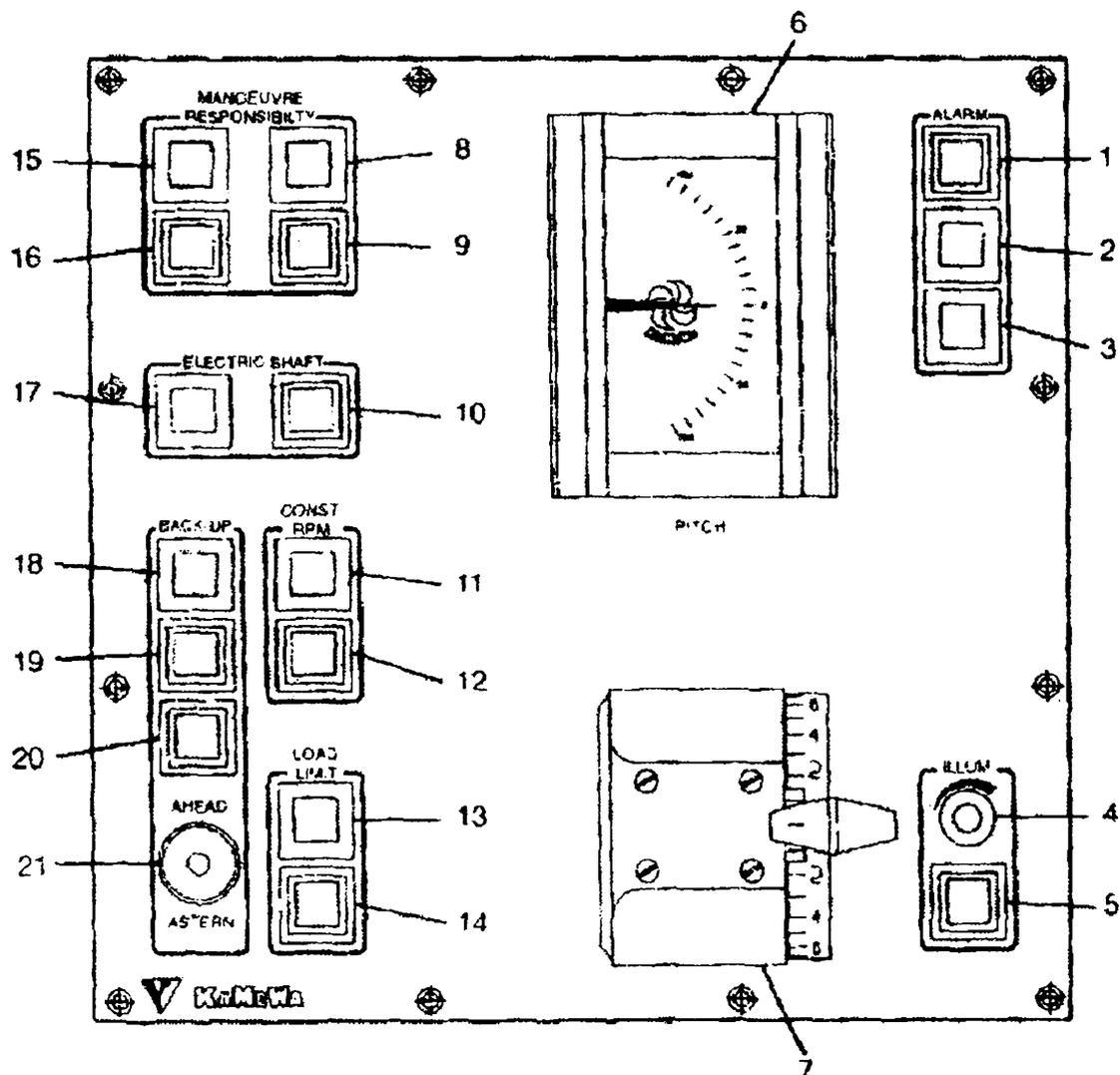


Рис. 34. Пульт управления, расположенный на мостике

Условные обозначения рис.34

Сигнальные устройства

| | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. Подтверждение отказа управления сигнальным устройством | Красная нажимная кнопка |
| 2. Отказ регулятора нагрузки | Красная лампочка |
| 3. Перегрузка двигателя | Красная лампочка |
| 4. Регулятор освещенности | Вращающаяся ручка |
| 5. Проверка лампочек | Нажимная кнопка |
| 6. Индикатор шага | - |
| 7. Комбинированная рукоятка управления | - |

Пост, ответственный за маневр

| | |
|----------------------|------------------|
| 8. ЦПУ | Желтая лампочка |
| 15. Мостик | Зеленая лампочка |
| 9. Подтверждение ЦПУ | Нажимная кнопка |
| 16. Согласие мостика | Нажимная кнопка |

Управление с выносных постов

| | |
|----------------------------------------|------------------|
| 10. Запрос на осуществление управления | Нажимная кнопка |
| 17. Осуществляю управление | Зеленая лампочка |

Постоянные об/мин

| | |
|---------------------------------------|-----------------|
| 11. Режим работы на постоянных об/мин | Желтая лампочка |
| 12. Постоянные об/мин вкл/выкл | Нажимная кнопка |

Предельная нагрузка

| | |
|---------------------------------------------|-----------------|
| 13. Блокировка предельной нагрузки | Желтая лампочка |
| 14. Блокировка предельной нагрузки вкл/выкл | Нажимная кнопка |

Резервное управление

| | |
|---------------------------------|-----------------|
| 18. Режим резервного управления | Синяя лампочка |
| 19. Резерв вкл | Нажимная кнопка |
| 20. Резерв выкл | Нажимная кнопка |
| 21. Вперед/назад | Переключатель |

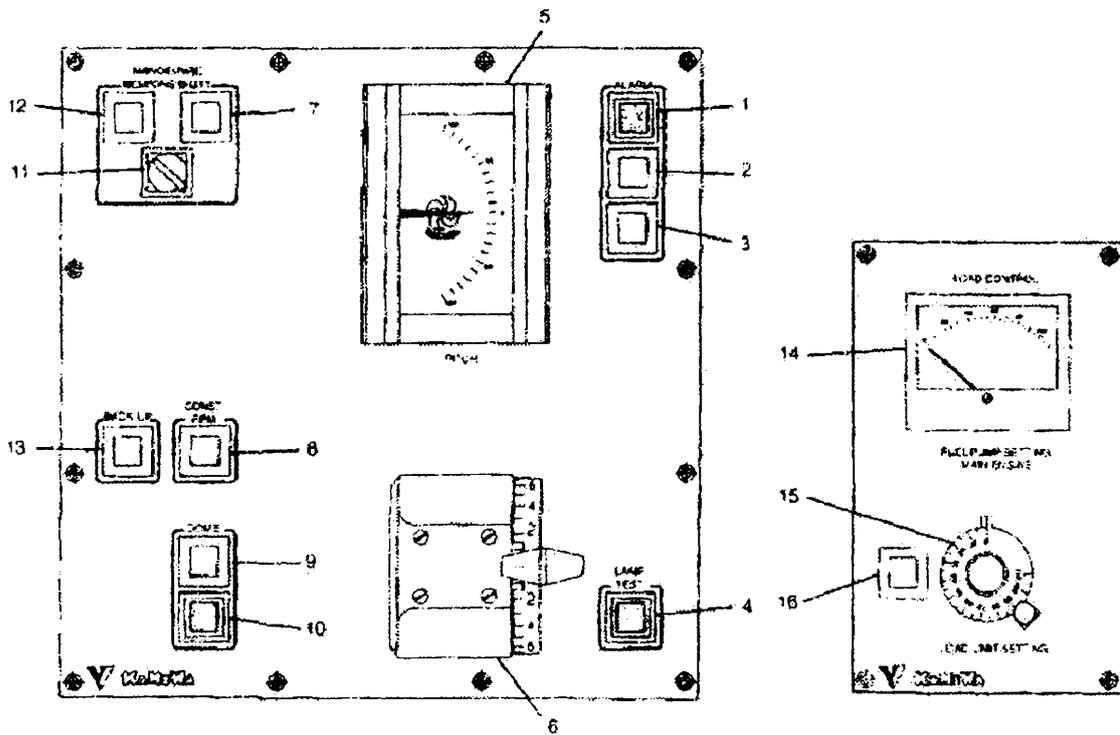


Рис.35. Пульт управления и регулирования нагрузки, расположенный в ЦПУ

Условные обозначения рис. 35

| | | | |
|----------------------------------------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| Сигнальное устройство | | Комбинированное управление | |
| 1. Сигнализация об отказе управления | Красная кнопка | 9. Режим комбинированного управления | Зеленая лампочка |
| 2. Отказ регулятора нагрузки | Красная лампочка | 10. Режим комбинированного управления | Кнопка |
| 3. Перегрузка двигателя | Красная лампочка | 13. Резервное управление | Синяя лампочка |
| 4. Проверка лампочек | Кнопка | Пульт регулирования нагрузки | |
| 5. Индикатор шага | - | 14. Индикатор настройки топливных насосов | - |
| 6. Комбинированная рукоятка управления | - | 15. Регулировка предельной нагрузки | Роторный регулятор |
| Пост, ответственный за маневр | | 16. Блокировка предельной нагрузки | Желтая лампочка |
| 7. ЦПУ | Зеленая лампочка | | |
| 12. Мостик | Желтая лампочка | | |
| 11. Переключение Мостик/ЦПУ | Переключатель | | |
| 8. Режим работы на постоянных об/мин | Желтая лампочка | | |

7. УСТАНОВКА И НАСТРОЙКА ВРШ НА СУДНЕ

7.1 Особенности выбора ВРШ

Заводы-изготовители ВРШ предлагают стандартные конструктивные решения для целого ряда модификаций в определенных диапазонах размеров узлов ступиц гребного винта, маслораспределительных устройств и гидравлических систем, а также стандартных электронных систем управления.

За исключением отдельных случаев применения сравнительно малых гребных винтов лопасти ВРШ конструируются с учетом соответствия требованиям, предъявляемым к каждой конкретной установке. Затем выбираются наиболее подходящие стандартные агрегаты: узел ступицы, маслораспределительное устройство и гидравлическая система.

Валопроводы и маслопроводы проектируются и изготавливаются согласно установившейся технологии и техническим характеристикам так, чтобы они подходили для конкретного судна и удовлетворяли правилам соответствующего классификационного общества или надзорной организации.

Системы управления проектируются так, чтобы они удовлетворяли техническим условиям и обладали характеристиками, необходимыми для данной установки.

Частота вращения и диаметр гребного винта должны выбираться так, чтобы они обеспечили наилучшее сочетание высокого значения пропульсивного к.п.д., пониженного уровня шума и небольшой пульсации давления на корпус судна. Поставщики гребных винтов должны сотрудничать с конструкторами судна в выборе частоты вращения и диаметра. При этом должно учитываться, что более низкая частота вращения дает улучшенные показатели пропульсивного комплекса и более низкий уровень генерируемого шума. К сожалению, это достигается за счет выбора более тяжелого гребного винта большего диаметра и более тяжелых валопровода и редуктора, что означает повышение весогабаритных характеристик и себестоимости. Во многих случаях диаметр гребного винта ограничивается размерами окна ахтерштевня.

Важно предусмотреть достаточный зазор между краями лопастей и корпусом судна, чтобы уменьшить пульсацию давления на корпусе судна. Приемлемый зазор будет зависеть от прогнозируе-

мой пульсации давления, однако необходимо соблюдать следующий принцип: зазор между краями лопастей и корпусом судна не должен быть меньше 0,2 диаметра гребного винта, для двухвинтовой установки. Однако, при неблагоприятных условиях подвода воды к гребному винту большой зазор не гарантирует отсутствие вызванной кавитацией пульсации давления, порождающей вибрацию и шум. В этих случаях преимуществами обладают лопасти с большим скосом. Основной целью на стадии проектирования судна должно являться обеспечение максимально возможного однородного обтекания гребного винта.

При проектировании судна необходимо стремиться свести к минимуму уклон линии вала от горизонтального направления, а также предусмотреть установку кронштейнов и обтекателей гребного вала, которые будут создавать как можно более однородное радиальное поле действия попутного потока.

ВРШ для транспортных судов чаще всего имеют по три лопасти при малых диаметрах винтов и по четыре лопасти при средних и больших диаметрах винтов. Гребные винты военных кораблей обычно имеют пять лопастей; известны случаи применения и семилопастных ВРШ.

Применение большего числа лопастей приводит к увеличению общей площади поверхности лопастей, а это несколько снижает пропульсивный к.п.д. По этой причине не следует увеличивать число лопастей, если для этого нет веских оснований.

Собственная частота колебаний лопасти должна отличаться от частот резонансных колебаний. Следует избегать торсионных частот системы гребной винт - валопровод - двигатель, а также основных частот собственных колебаний корпуса судна и надстройки в районе диапазона рабочих частот вращения. Во избежание резонансных колебаний число лопастей может быть увеличено.

Число лопастей может также быть изменено с целью снижения акустических характеристик гребного винта или для того, чтобы избежать одновременного прохождения лопастей через фронты давления в поле попутного потока.

Ясно, что техническое задание судовладельца и предполагаемый профиль эксплуатации судна должны быть известны поставщику гребных винтов для того, чтобы он мог предложить наиболее подходящую конструкцию.

Делая первоначальное предложение, изготовитель определяет стоимость валопровода, имеющего рекомендованную судостроительным заводом длину и диаметр, удовлетворяющего требованиям классификационного общества. Изготовители предоставляют также данные о массе гребного винта, его центре тяжести и моменте инерции. Эти данные необходимы для разработки предварительной проектной схемы линии валопровода и расчета вибрационных характеристик двигателя, валопровода и гребного винта. По результатам расчета крутильных колебаний может потребоваться увеличение диаметра гребного вала и изменение местоположения подшипников. Если эти изменения значительны, то изготовителю гребного винта необходимо предоставить новые технические характеристики валопровода. В дополнение к этому, прежде чем будет выполнен окончательный конструктивный проект валопровода и произведен его детальный расчет, изготовителю гребного винта понадобится информация о подшипниках валопровода, включая дейдвудное устройство.

Подобным же образом, для подбора конструкции лопастей, соответствующих судну и обводам корпуса, изготовителю гребного винта должны быть предоставлены сведения о характере попутного потока и о всех выступающих частях корпуса.

7.2 Наладка ВРШ при заводских испытаниях

В процессе заводских испытаний органы управления ВРШ должны быть настроены таким образом, чтобы положения рукоятки управления давали требуемые положения шага лопастей и частоты вращения двигателей. Конкретная технология настройки варьируется для разных установок, однако, общие принципы ее являются одинаковыми.

На фланцах лопастей имеется маркировка с указанием устанавливаемого шага. На корпусе ступицы имеется установочная метка, которая наносится на поперечной линии центров окна предназначенного для установки лопасти, напротив которой должны быть выставлены метки на фланце лопасти. Минимальный набор меток на фланцах лопастей следующий: конструктивный шаг, полный вперед и полный назад. В некоторых случаях может быть обозначен весь набор регулировок шага.

Перед первым пуском механизмов в работу лопасти должны быть установлены в конечное положение переднего хода. Если есть возможность, это должно быть выполнено до спуска судна на воду, чтобы можно было сопоставить положения лопастей с метками на их фланцах. Перед первым пуском гидравлической системы разгрузочный клапан следует отрегулировать на наименьшее значение, которое все же будет давать возможность поворачивать лопасти, когда винт не вращается. Способ поворота лопастей зависит от используемой гидравлической системы. В гидравлической системе, показанной на рис. 32, это может выполняться с помощью нажимных кнопок на клапане управления бустерного насоса V2, расположенном на гидравлическом блоке питания. Предварительно необходимо переключить выключатель "Local/Remote" (Местное/Дистанционное) в положение "Local". Если такой переключатель не предусмотрен, то кабели соленоидов следует отсоединить. По манометру, расположенному на гидравлическом блоке питания, определяют конечное положение и соответствующее ему открытие разгрузочного клапана. Установив лопасти в конечное положение хода вперед, выставляют указатель шкалы, расположенный на маслораспределительном устройстве, в положение, соответствующее механическому полному вперед, как это указано на комбинированной диаграмме или в руководстве по эксплуатации. Затем указатель должен быть зафиксирован в этом положении. Если должны применяться какие-то другие контрольные положения, кроме регулировки на полный вперед, то лопасти должны подвергнуться соответствующей регулировке в сухом доке.

Система управления настраивается до сдачи ВРШ для того, чтобы получить требуемые комбинаторные характеристики, хотя после установки на место понадобится произвести некоторые дополнительные регулировки.

Типичной методикой наладки органов управления на судне является следующая.

Из положения полного вперед шаг должен быть увеличен до максимального комбинаторного шага вперед (положение 100% вперед), как указано на комбинированной диаграмме. Указатель обратной связи на маслораспределительном устройстве используется для определения настройки. Затем электронная (или пневматическая) система управления калибруется так, чтобы этот шаг лопастей

соответствовал положению рукоятки управления "10 Вперед". Обычно это положение комбинированной рукоятки соответствует значению, превышающему 100% мощности двигателя на полном ходу вперед.

Далее, шаг лопастей переводится в положение 100% заднего хода, как указано на комбинированной диаграмме. Система управления проверяется, а калибровка юстируется так, чтобы шаг заднего хода устанавливался при фиксации комбинированной рукоятки в положении "10 Назад".

Затем лопастям задается шаговый угол "Теоретического нулевого упора" (или лопасти поворачиваются на нулевой шаговый угол), а органы управления калибруются при сохранении комбинированной рукоятки в нулевом положении (на нулевой отметке).

Затем представитель изготовителя двигателя должен установить топливную рейку в положение 100% мощности. После этого, установив регулятор предельной нагрузки на 100%, можно выполнять любые необходимые регулировки с тем, чтобы получить требуемое значение (обычно между 15 и 18 мА) сигнала обратной связи при положении топливной рейки на 100% нагрузке. Затем следует передвинуть топливную рейку в нулевое положение (0%) и получить минимальный сигнал обратной связи (обычно 9 мА).

После этого необходимо проверить сигнал обратной связи по частоте вращения вала и отрегулировать его на требуемую минимальную величину. Следует отметить, что регулировку на 100% можно провести при работающих двигателях.

Фактический шаговый угол нулевого упора может быть определен на испытаниях. Испытания должны проводиться в спокойной воде и при слабом ветре, обычно у причала, с использованием режима резервного регулирования шага. Во время испытаний, насколько позволяют условия, следует поддерживать максимально-возможные частоты вращения вала, вперед и назад, задавая разные значения регулируемой величины близкие к нулю. Средний шаговый угол, когда наблюдение за потоком воды, береговыми знаками и швартовыми указывает на нулевой упор, принимается за шаговый угол нулевого упора, что должно быть согласовано с представителем судовладельца и судостроительным заводом. Будучи одобренным, это положение должно быть обозначено по шкале обратной связи по шагу на маслораспределительном устройстве, а система

управления отрегулирована так, чтобы был получен утвержденный шаг на комбинированных рукоятках, установленных в нулевое положение. После остановки вала следует проверить шаг, соответствующий положениям рукоятки "10 Вперед" и "10 Назад".

Следует установить индикаторы шага так, чтобы они правильно показывали положения "100% Вперед", "100% Назад" и "Ноль".

Если шаг и показания обратной связи установлены так, что дают правильные значения, когда вал остановлен, то при работе судна в сигналах будут возникать некоторые погрешности. Почти во всех системах ВРШ обратная связь по шагу определяется снятием показаний о переднем и заднем положении переднего конца маслораспределительного патрубка (патрубков) или тяги осевой рычажной передачи по отношению к валу в этом положении. Здесь следует учитывать два обстоятельства:

- Во время работы температура маслораспределительного патрубка может отличаться от средней температуры вала. Это вызывает небольшие изменения в их относительных длинах, приводя к небольшим погрешностям в обратной связи по шагу.

- Когда гребной винт вращается, вал передает упорное усилие через упорный подшипник на корпус судна. При работе на переднем ходу упорное усилие укорачивает вал, а при работе на заднем ходу упорное усилие увеличивает длину вала.

Это может давать значительную разницу в сигнале обратной связи по шагу, особенно, когда расстояние от гребного винта до упорного подшипника (или до маслораспределительного устройства, если он находится позади упорного подшипника) является большим. Ошибка обратной связи по шагу, вызванная изменениями длины вала, может быть рассчитана для любой конкретной установки и произведена корректировка настройки для компенсации погрешностей. Например, в установках с двойными (спаренными) маслораспределительными патрубками, положение переднего конца одного патрубка было изменено по отношению к другому патрубку, который был аксиально закреплен в ступице. В других установках, в ступицах были установлены электрические датчики обратной связи по шагу.

Вообще, небольшие погрешности, связанные с обратной связью, вызываемые этими двумя обстоятельствами, не создают особых проблем во время эксплуатации судна. Как правило, если требуется

увеличение мощности, то шаг может быть увеличен с помощью ручной подстройки или перемещением комбинированной рукоятки в положение чуть большего значения регулируемого параметра. Там, где есть регулятор нагрузки, он может, в зависимости от применяемого способа регулирования, автоматически выполнять любую настройку. При необходимости настройку максимального шага можно произвести после ходовых испытаний, чтобы гарантировать использование гребным винтом максимальной мощности, развиваемой двигателем.

8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВРШ

Система ВРШ состоит из механических, гидравлических и управляющих элементов; следует выполнять плановые контрольные процедуры, чтобы подтвердить, что вся система в целом работает правильно. Вахтенные помощники капитана и судовые механики должны быть обучены этим стандартным процедурам.

Ниже приводятся общие сведения по правилам эксплуатации ВРШ, хотя имеется ряд особенностей для систем, изготовленных в различное время разными фирмами-изготовителями. В любом случае, всегда следует пользоваться указаниями, которые даются изготовителями в инструкциях по эксплуатации. Обобщенные инструкции приводятся ниже.

8.1 Основные правила использования

Перед пуском главных двигателей

Приняв сигнал "Постоянная готовность", следует запустить насосы и проверить давление масла в системе гидравлики ВРШ, затем произвести общую проверку системы на протечки и любые другие неисправности.

Необходимо проверить правильность работы органов управления на установку шага переднего и заднего хода как в ЦПУ, так и с помощью ручного регулятора изменения шага на маслораспределительной коробке или гидравлическом блоке соответственно.

Следует проверить правильность действия указателя шага. Шаг гребного винта должен быть установлен в положение нулевого упора, а управление - на ЦПУ. Затем управление передается ходовому мостику, где должна быть проверена правильность установки шага как на передний, так и на задний ход, прежде чем возвратит настройку шага в положение нулевого упора.

Перед выходом в море

Мостик должен дать команду "Проверить гребной вал", после проверки, что за кормой "чисто", а гребной винт установлен в положение нулевого упора.

Если масляный насос имеет механический привод, то после того, как гребной вал будет приведен во вращение, следует проверить давление на нагнетании насоса.

Обычной практикой является выход в море при управлении ВРШ с мостика. Однако, перед отдачей швартовых или снятия с якоря рукояткой управления шагом, установленной на мостике, необходимо произвести контрольную установку лопастей на ход вперед и назад, чтобы убедиться, что система реагирует правильно.

Эксплуатация в море

Полная мощность двигателей используется только в открытом море. В установках с регулятором нагрузки комбинированную рукоятку управления можно ставить на максимальную величину - положение "10". Если в системе управления предусмотрена программа прогрева и набора нагрузки двигателя, то она будет обеспечивать набор мощности с приемлемой скоростью. Если такой программы нет, тогда положение рукоятки следует изменять постепенно так, чтобы повышение мощности до максимального значения происходило со скоростью, соответствующей рекомендациям изготовителя. Если в системе управления отсутствует функция регулирования нагрузкой, то рукоятка управления должна передвигаться до тех пор, пока не загорится сигнальная лампочка, означающая перегрузку. Затем рукояткой точной ручной настройки необходимо постепенно уменьшать шаг до тех пор, пока не погаснет сигнальная лампочка перегрузки. Если ручная точная настройка отсутствует, то рукоятку управления следует передвинуть немного назад, уменьшая мощность, пока лампочка не погаснет.

Там, где есть переключатель с комбинированного управления на постоянную частоту вращения, режим работы на постоянных оборотах можно выбирать в тех случаях, когда требуется полная частота вращения для механического привода валогенератора или при работе во льдах.

Маневрирование в стесненных водах

Перед заходом в порт или при плавании в стесненных условиях необходимо произвести достаточно значительные перемещения рукоятки управления, для того чтобы убедиться в правильности реагирования на команды изменения шага винта и частот вращения двигателя. При обнаружении какой-либо неисправности ее следует устранить, пока судно находится в нестесненных условиях плавания. Кроме того, если один насос находился в автоматическом режиме

готовности к работе при плавании в открытом море, то перед входом в стесненные воды этот насос должен быть запущен в действие.

Ручное управление

В случае отказа всех постов дистанционного управления, как шаг винта, так и частоты вращения двигателя могут регулироваться вручную при помощи гидравлического клапана управления шагом или приведением в действие отдельного аварийного клапана ручного регулирования шага. Частота вращения двигателя регулируется посредством всережимного регулятора двигателя. Очень важно обеспечить связь между ходовым мостиком и этими двумя постами ручного управления, которые могут находиться в разных помещениях.

Следует периодически переходить на кратковременное ручное регулирование шага и частоты вращения двигателя. Если этого не делать, то в случае отказа системы управления, вероятнее всего, возникнет ненужная и опасная задержка в восстановлении работоспособности системы управления.

Аварийная фиксация шага

В случае отказа гидравлической системы или выхода из строя системы управления, а также когда не предусмотрено ручное регулирование шага, на всех одновинтовых судах и на некоторых двухвинтовых судах предусмотрена возможность установки шага гребного винта в предварительно определенное положение переднего хода и удержания или фиксации его в этом положении.

В подобных ситуациях гребной винт может использоваться как ВФШ при работе двигателя на соответствующем уровне мощности. Для того, чтобы избежать риска перегрузки двигателя, задаваемый шаг должен быть несколько меньше шага полного переднего хода.

Для установки и сохранения этого шага переднего хода применяются разные средства. Пружины, установленные в сервомоторе, обеспечивают поворот лопастей в положение максимального шага переднего хода при потере давления масла. В настоящее время чаще всего используются механические или гидравлические устройства. Детальные сведения по этому поводу приводятся в инструкциях изготовителей ВРШ.

Влияние винта на маневренные свойства судна

Как правило, суда, оборудованные ВРШ, имеют лучшие маневренные свойства по сравнению с такими же судами с ВФШ. Судно, оборудованное одним или более ВРШ, управляется иначе, нежели судно с ВФШ. Каждая конструкция судна обладает своими собственными характеристиками, и для судоводителей важно хорошо знать, каким образом их судно будет реагировать на различных маневрах.

Рассмотрим некоторые особенности судов, оборудованных ВРШ.

Традиционно, одновинтовые суда с ВРШ оборудуются гребным винтом левого вращения, то есть - это винт, который для движения судна вперед вращается против часовой стрелки, если на него смотреть с кормы. В то же время суда с ВФШ оборудуются, как правило, винтом правого вращения. Поэтому маневренные свойства одного и того же судна, но с разными (ВРШ или ВФШ) винтами при работе на задний ход существенно отличаются. Поток воды, отбрасываемый ВФШ при маневре назад, ударится о корпус судна, вызывая своим вращательным движением повышение давления на одной стороне кормовой части судна и снижение на другой и стремясь корму судна повернуть влево. В то же время при работе на задний ход ВРШ создает меньшее значение поперечной силы, чем ВФШ, поэтому весьма вероятно, что влияние этого эффекта на управляемость судна с ВРШ будет выражено менее явно. Всегда будут наблюдаться различия между судами, а у некоторых судов корма не всегда может поворачиваться в ожидаемом направлении.

ВРШ на двухвинтовых судах могут быть внутреннего или наружного вращения. При малых скоростях гребные винты обычно помогают управлению рулем за счет работы одним винтом вперед, а другим винтом назад, однако это может быть не так в установках с расходящимися в корму гребными валами.

Поперечная сила, создаваемая пером руля, пропорциональна квадрату скорости потока. Если руль установлен в створе и позади гребного винта, то скорость потока воды на руль увеличивается за счет отбрасывания воды гребным винтом. Если ВРШ установлен на нулевой шаговый угол или около этого положения при движении судна вперед, упор (тяга) сохраняется, а поток воды не ускоряется гребным винтом. Поток, вызываемый движением судна вперед, в

значительной степени задерживается гребным винтом, ограничивая его воздействие на руль, что намного снижает величину поперечной силы, развиваемой рулем, при любом его угле перекаладки. Кроме того, как наглядно показали модельные и натурные испытания одновинтового судна с одним рулем, судно, движущееся со скоростью, немного превышающей средний ход, может подвергаться воздействию значительной поперечной силы на его корму, несмотря на то, что ВРШ вращается при нулевом шаговом угле. Причина образования этой поперечной силы в кормовой оконечности судна не совсем ясна, но похоже, что это происходит вследствие особенностей воздействия гребного винта, вращающегося при нулевом шаге, на поток позади корпуса судна. В наибольшей степени этот эффект проявляется тогда, когда судно загружено с посадкой на ровный киль или имеет дифферент на нос. Если эта сила присутствует, то она намного больше сравнительно малой поперечной силы, развиваемой рулем. *Это означает, что способность управлять судном при помощи руля утрачивается и судно начинает разворачиваться.*

При вращении гребного винта по часовой стрелке, если смотреть с кормы, и при отсутствии посторонних сил и моментов, вызванных маневрами и воздействием окружающей среды, судно стремится повернуть влево. При вращении гребного винта против часовой стрелки имеется тенденция разворота судна вправо. На малом ходу судна поперечная сила, воздействующая на корпус судна, очень мала. Однако, поскольку поперечные силы руля незначительны, устойчивость на курсе остается проблематичной, если гребной винт работает при нулевом шаговом угле.

Опыт эксплуатации показывает, что некоторые одновинтовые суда с одним рулем не всегда имеют тенденцию разворота в одном и том же направлении, если ВРШ установлен в положение, соответствующее нулевому положению рукоятки управления, когда судно движется полным ходом. Ряд испытаний судов с полными обводами и в загруженном состоянии показал, что они иногда рыскали влево, а иногда вправо, однако, почти никогда не сохраняли прямой курс. На направление рыскания оказывает влияние не только поперечная сила, создаваемая на корме в результате быстрого поворота лопастей гребного винта на нулевой шаг, но также и ряд других факторов: находится ли судно на прямом курсе в начале маневра, как

судно загружено, а также каково направление и сила ветра и течения. Если поворот начался, то руль не способен изменить курс судна. Общеизвестно также, что маневренность судов с полными обводами лучше, когда они в балласте и имеют дифферент на корму, чем когда они в грузу и посажены на ровный киль.

Следует избегать быстрого уменьшения до очень малых, близких к нулевому, значений шагового угла для снижения скорости судна, за исключением аварийной внезапной остановки с полного хода. При всех обычных снижениях скорости или маневрах торможения следует выполнять постепенное и равномерное снижение шага гребного винта для замедления хода судна с тем, чтобы винт не развивал слишком большую по величине обратную тормозную тягу. Если шаг уменьшается слишком быстро, особенно на больших ходах, то судно может начать поворот. Это можно исправить до того, как уже выполнен поворот, путем резкого изменения шага вперед с одновременной переключкой руля. На малом ходу судна лучше применить попеременную работу на малом вперед и на малом назад, вместо того, чтобы ставить комбинированную рукоятку в нулевое положение.

Система управления может содержать в себе программу изменения шага на сниженных частотах вращения двигателей, работающих при заданных мощностях, или программу ограничения скорости снижения мощности с тем, чтобы предохранить двигатель от перегрузок либо избежать авторотации. Наличие указанной функции или программы может быть достаточно для гарантии того, что судно не потеряет управляемость рулем во время маневра торможения, даже если в начале маневра рукоятка управления будет сразу передвинута в положение нулевого шага. Возможно, также, что может быть предусмотрена программа ограничения скорости уменьшения шагового угла, с единственной целью - обеспечить управляемость судна во время маневров. Тем не менее, в системе должны быть предусмотрены как возможность регулировки программируемых величин во время ходовых испытаний, так и возможность отключения этих программ при аварийной ситуации.

При авариях экстренный стоп может выполняться с целью остановить судно с минимальным выбегом, обусловленным инерцией судна. Обычно это требует развития полной мощности на обратный ход в минимально возможное время в данных условиях, а затем

поддержание этой полной мощности обратного хода в течение снижения инерционного хода судна (см. раздел 2.8).

Следует помнить, что для некоторых одновинтовых судов с полными обводами и одним рулем, особенно когда они полностью загружены, не представляется возможным предотвратить их рысканье во время внезапной остановки с полного переднего хода. На таких судах не следует выполнять маневр внезапной остановки с полного переднего хода, если в этом нет крайней необходимости и отсутствует достаточное место для маневрирования.

На судах с ВРШ, имеющих максимальную скорость более 15 узлов, быстрый переход с полного вперед на полный назад может не дать кратчайшего инерционного выбега и минимального времени остановки судна. В таких случаях более эффективным может быть маневр, когда сначала переходят на шаг малого хода назад и ждут несколько секунд, пока судно замедлит скорость, а затем дают большую мощность заднего хода. Следует получить рекомендации фирмы-изготовителя гребного винта по поводу наилучшего маневра экстренной остановки с полного переднего хода.

Точка нулевого упора должна быть обязательно известна и зафиксирована. Она может не совпадать с нулевым шагом или нулевым положением комбинированной рукоятки. Необходимо проверить отсутствие незначительного движения судна вперед или назад, когда рукоятка установлена на ноль.

8.2 Локализация и устранение неисправностей

Современные системы ВРШ обладают высоким уровнем надежности, однако, даже в самых лучших системах могут возникать проблемы.

У ВРШ с заполняемыми маслом ступицами крайне невелик перечень неисправностей и отказов, для устранения которых требуется докование судна. Большинство внеплановых докований вызываются: столкновениями; повреждениями в результате посадки на мель; проблемами, связанными с линией валопровода и ее подшипниками или уплотнениями дейдвудного устройства.

У некоторых ВРШ есть приспособления, позволяющие произвести замену лопастей под водой водолазом. При этом наличие только повреждений лопастей гребного винта не требует постановки судна в док.

Одной из возможных неисправностей является утечка масла через уплотнения лопастей. Это обнаруживается по падению уровня масла в напорной цистерне или по наличию пятен вытекающего масла в забортной воде во время стоянки судна. Прежде чем сделать вывод о том, что падение уровня масла в напорной цистерне вызвано протечкой через уплотнение лопасти, необходимо проверить установленную внутри судна систему гидравлики на протечки. Если масло содержится в хорошем состоянии, то качество уплотнений лопастей должно обеспечить их работоспособность, по крайней мере, на период между двумя плановыми докованиями судна.

В ступице, на трущихся поверхностях механизма изменения шага, происходит постепенный износ и со временем требуется произвести ревизию этого механизма для устранения увеличенных рабочих зазоров. Однако, эти износы не должны приводить к нарушениям в работе гребного винта, как это может иметь место при чрезмерных зазорах, образованных из-за недопустимого обводнения масла, а затем и загрязнения его продуктами износа.

Там, где ступицы заполняются консистентной смазкой (рис.17 и 18), всегда имеется большой риск (из-за отсутствия контроля) поступления забортной воды внутрь ступицы. Со временем это может привести к повреждениям в результате коррозии деталей и узлов, находящихся в ступице. При использовании ступиц, заполняемых консистентной смазкой, всякий раз, когда предоставляется

возможность, необходимо дозаправлять (запрессовывать) ступицы смазкой.

Наибольшее количество отказов и повреждений приходится на органы управления и системы гидравлики. Используемые системы управления различаются техническими решениями и уровнями надежности, поэтому для получения информации по локализации и устранению неисправностей следует обращаться к инструкциям по эксплуатации и техническому обслуживанию. В период с начала 1989 г. до середины 1992 г. были проведены обследования 143 ВРШ одного типа. Эти обследования показали, что более 70% всех зарегистрированных отказов произошли в системах гидравлики, расположенных внутри судна, а 75% из них были вызваны отказами клапанов.

Неисправности гидравлических систем обычно проявляются в таких нарушениях работы ВРШ как увеличение времени разворота лопастей при изменении шага и, в наиболее тяжелых случаях, потеря управления шагом. Как правило, это происходит в результате срыва подачи масла или значительного снижения давления в системе. Если появляются нарушения в работе гидравлических систем, то следует применять системный метод отыскания неисправностей и начинать следует с масляной цистерны и насосов. При этом необходимо использовать имеющиеся резервные возможности для сохранения управляемости ВРШ, например, пуск в работу резервного насоса или переход на ручное местное управление шагом.

Если изменение шага происходит медленнее нормативного, то следует искать факторы, которые могли повлиять на подачу масла. Если один насос находится в режиме готовности, то необходимо пустить его в работу и вновь измерить время изменения шага. Сравнение с нормативным временем изменения шага должно показать, действительно ли насос не обеспечивает требуемой подачи. Если установлено, что подача насоса недостаточна, то следует проверить насос на наличие повышенного износа или возможных повреждений. При этом обязательно необходимо проверить правильность работы разгрузочного (редукционного) клапана насоса. Кроме того, проверяют состояние фильтров, приемных сеток и трубопроводов и, если возникает необходимость, очищают от скопившихся в них отложений.

Если насос и клапаны работают с повышенным шумом или сильно стучат (дребезжат), то можно предположить, что причиной этого является кавитация. В этих случаях необходимо проверить уровень масла в цистерне, приемную сетку и трубопровод на засоренность или потерю герметичности, могущую вызвать подсос воздуха на стороне всасывания насоса.

На подачу масла к сервомотору может оказывать влияние клапан управления, если он полностью не открывается. В этом случае необходимо проверить сигнал, подаваемый на этот клапан от органов управления, и там где, это возможно, привести клапан в действие вручную. Следует использовать альтернативный клапан ручного управления, если такой имеется, и проверить скорость изменения шага.

Отказы клапанов управления обычно происходят вследствие износов, заеданий из-за отложений на внутренних поверхностях или в результате неисправностей соленоида.

Медленное изменение шага может происходить в результате протечек масла. Большинство протечек масла легко обнаруживаются, однако, внутренние протечки масла в ступице, в валопроводе или маслораспределительном устройстве визуально определить невозможно.

При износе уплотнений в маслораспределительной коробке подача сервомотора уменьшается. Как правило, износ этих уплотнений происходит постепенно, даже если масло загрязнено и, возникающее вследствие этого увеличение времени изменения шага также будет происходить постепенно. Следует отметить, что там, где применяются торцевые уплотнения в качестве уплотнений высокого давления, всякая потеря масляного клина уплотняющей поверхности как, например, в случае перерыва в подаче масла, может вызвать их быстрый износ и разрушение с последующим «схватыванием» торцевых уплотнений. Это может привести к вращению деталей маслораспределительного устройства, которые должны быть неподвижными, и вызвать еще более серьезные повреждения.

Срыв потока при задании изменения шага указывает на потерю перепада давления в сервомоторе, а не на недостаточную подачу. При этом необходимо проверить насосы, фильтры и состояние масла по вышеописанной схеме. Проверить, не срабатывают ли

разгрузочные (редукционные) или перепускные клапана при слишком низком давлении. Выяснить, нет ли в системе неисправного клапана управления. Кроме того, необходимо проверить, чтобы в возвратном трубопроводе сервомотора не создавалось избыточного давления из-за сужения его сечения.

Если все находится в удовлетворительном состоянии, то срыв потока может вызываться неисправностями деталей в узле ступицы.

Полная потеря регулируемости изменения шага свидетельствует либо о потере работоспособности каких-то деталей, либо о полной потере подачи или давления масла, поступающего к сервомотору.

Если работает местное регулирование изменения шага, а дистанционное управление шагом с мостика или из ЦПУ вышло из строя, то причиной неисправности в системе управления может быть нарушение в передаче сигнала обратной связи по шагу. В этом случае необходимо проверить обратную связь.

Если нельзя определить и устранить причину, повлекшую нарушения в системе управления изменения шага, то следует связаться с фирмой-изготовителем и пригласить на судно специалиста по техническому обслуживанию. Не следует продолжать эксплуатацию ВРШ с не вполне исправным оборудованием дольше, чем это необходимо.

Возможной причиной полной потери управляемости шагом ВРШ может быть застревание какого-то крупного предмета в лопастях винта или наматывания чего-то на винт.

Следует помнить, что наличие в масле повышенного количества воды или твердых загрязняющих частиц может привести к накоплению отложений в фильтрах, повышенному износу трущихся поверхностей и, в конечном счете, к отказу (поломкам и повреждениям) деталей, находящихся под воздействием высоких механических нагрузок.

8.3 Техническое обслуживание

Все механизмы требуют проведения регулярного технического обслуживания для обеспечения высокого уровня их работоспособности в процессе эксплуатации. Существует целый ряд превентивных мер и действий, которые следует соблюдать и выполнять при эксплуатации всех типов ВРШ. Если требования к техническому обслуживанию, изложенные в инструкциях фирмы-изготовителя, отличаются от требований, приведенных ниже, тогда следует пользоваться инструкциями изготовителя, которые применимы к конкретному устройству. Вполне вероятно, что имеются различия в рекомендуемой периодичности выполнения описываемых далее действий.

8.3.1 Техническое обслуживание судна в море

Находясь в море, ежедневно: проверяйте уровень масла в цистернах; температуру и давление масла в системе; регистрируйте показания индикатора засоренности фильтров или перепада давления в фильтрах; проверяйте наличие воды в масляных цистернах. При обнаружении отклонений от рекомендуемых значений параметров и показателей следует предпринимать действия по их устранению.

Всегда заменяйте или очищайте фильтрующие элементы (в зависимости от типа используемого элемента) до того как фильтр достигнет состояния, при котором предохранительный (перепускной) клапан фильтра начнет перепускать масло и до того как будет достигнут максимально допустимый перепад давления (обычно 0,20 мПа или 200 кН/м²).

Наличие свободной воды на дне масляной цистерны не допускается и ее следует удалять. При обнаружении воды следует отобрать пробу масла и произвести её анализ. Масло должно быть заменено, если содержание в нем воды превышает 0,5 %. Следует обнаружить и устранить источник поступления воды в масло.

Наиболее вероятно, что это происходит не через узел ступицы винта, а через негерметичный приемный патрубок на палубе (через который масло перекачивается в цистерну постоянного запаса), вентиляционный трубопровод масляной цистерны или негерметично закрытую верхнюю крышку цистерны. В этих случаях можно провести гидравлические испытания на плотность с подачей воздуха

низкого давления ($3,5 \text{ кН/м}^2$) в цистерну, с предварительным омыливанием наиболее вероятных мест нарушения герметичности.

Один раз в месяц рекомендуется: производить тщательную проверку соединений трубопроводов на герметичность, надежность затяжки крепежных болтов и стопорных устройств; проверять правильность функционирования нажимных кнопок на соленоидных клапанах и аварийного клапана регулирования шага (если такой имеется); проверять состояние гибких шлангов и фильтров управления на главных и вспомогательных сервомоторах. Если применяются периодически очищаемые вручную фильтрующие элементы, то их следует промыть. Если в механизме обратной связи по шагу используются ролики, то следует проверить, чтобы они свободно вращались (катались), не были изношенными и загрязненными. Проверять уплотнения низкого давления на торцах маслораспределительной коробки на герметичность.

Если система оборудована маслоохладителем, то его также необходимо *проверять один раз в месяц*. Если контур охлаждения загрязнен, то его следует очистить. Если на маслопроточной стороне обнаружены отложения твердых частиц или шлама, то их обязательно необходимо удалить.

ВРШ ранних конструкций, с механическими или пневматическими системами управления, имеют рычажный механизм и оси поворота, которые необходимо проверять на свободное движение и, при необходимости, смазывать трущиеся поверхности.

Следует регулярно отводить конденсат из воздушных трубопроводов и емкостей для сжатого воздуха.

Следует периодически испытывать механические и электрические индикаторы засоренности фильтров, на правильность действия.

Пробы масла должны отбираться периодически (*не реже одного раза в год*) и направляться на анализ для проверки состояния масла. Следует определять: вязкость и кислотность масла; количество в нем воды; наличие и количество загрязняющих веществ, а также некоторые химические компоненты, входящие в состав масла.

8.3.2 Техническое обслуживание при стоянке судна в порту

Во время стоянки судна в порту рекомендуется продолжать производить регулярные проверки на утечки масла в любых местах системы, наличие воды в масляных цистернах и конденсата в воз-

душных трубопроводах и ёмкостях для сжатого воздуха, ржавчины и грязи на рычажных механизмах и осях поворота. При обнаружении каких-либо неисправностей следует предпринимать действия по их устранению.

Кроме того, в *первый день стоянки судна* в порту, а затем *еженедельно*, необходимо проверять уровень масла в цистернах. Уровень масла в напорной цистерне должен всегда находиться не ниже установленного значения.

8.3.3 Техническое обслуживание судна в доке

Гребной винт должен быть осмотрен и проверен на наличие признаков повреждений. При пескоструйной или дробеструйной очистке корпуса судна следует сначала закрыть прочной защитной лентой просвет (зазор) между фланцами лопастей и окнами (отверстиями) ступицы. Следует защитить гребной винт от попадания на него краски, так как пятна краски могут послужить причиной его последующих кавитационных разрушений.

У небольших, заполняемых консистентной смазкой ступиц следует производить проверку зазоров в окнах ступицы путем раскачивания лопастей. При обнаружении признаков износа ступица должна быть демонтирована и вскрыта, а регламентируемые зазоры восстановлены. На заводах-изготовителях гребных винтов, ремонт обычно производится сваркой или посредством установки переходных втулок с последующей переточкой окон под лопасти. Необходимо помнить, что при вскрытии вертикально разъемной ступицы на судне, прежде всего, следует обеспечить опору лопастям, особенно если судно находится на стапелях.

В любом случае, даже при отсутствии значительных износов, уплотнения лопастей следует регулярно заменять *один раз в четыре года*, а в ступицу добавлять или запрессовывать консистентную смазку при каждой постановке судна в док. На некоторых судах, оборудованных ступицами, которые заполняются консистентной смазкой, предусмотрена возможность запрессовки смазкой ступицы изнутри корпуса судна. В этом случае нет необходимости совмещать дозаправку смазкой ступицы с постановкой судна в док.

Ступицы, заполняемые консистентной смазкой, обслуживаются следующим образом:

- Уплотнительные кольца лопастей должны заменяться в диапазоне каждых 4-6 лет. Однако, предпочтительно (если есть возможность) заменять некоторые из уплотнений лопастей *при каждом плановом доковании*. После замены уплотнений лопастей или, если уплотнения лопастей не подлежат замене, ступица должна быть опрессована в соответствии с инструкциями изготовителя с целью проверки уплотнений лопастей на герметичность.
- Следует отбирать пробы масла из полостей низкого давления ступицы. Эта проба должна проверяться таким же образом, как и пробы масла, отбираемые из систем, расположенных внутри корпуса судна.
- Необходимо проверять тщательность затяжки болтовых соединений и их стопорение.

Во время докования судна оборудование, расположенное внутри корпуса судна, должно быть проверено на герметичность, признаки износов и повреждений. Пробы масла должны быть отобраны и проверены. При обнаружении загрязненности из гидравлической системы и цистерн масло должно быть полностью удалено, а сами системы и цистерны должны быть очищены так, чтобы удовлетворять требованиям инструкций завода-изготовителя или нормам чистоты ASTM 6. После очистки система должна быть заправлена новым, чистым маслом.

8.3.4 Техническое обслуживание лопастей

Гребной винт является устройством, находящимся под воздействием высоких механических нагрузок, работающим в неоднородном поле давлений попутного потока и коррозионно активной среде, вследствие чего он подвергается физическому разрушению. Даже незначительные разрушения или износы поверхностей лопастей могут вызвать снижение к.п.д., ускорение процессов старения и, в конце концов, если не принимать превентивных мер, привести к дорогостоящему восстановительному ремонту. Поэтому следует регулярно производить детальный осмотр лопастей, а их ремонтно-восстановительные работы должны выполняться тщательно и квалифицированно.

Техническое обслуживание лопастей ВРШ и ВФШ во многом идентично.

Повреждения могут быть вызваны: механическими внешними воздействиями (например, разрушения при ударе); кавитационной эрозией; износом поверхностей лопастей. Кроме того, могут быть нанесены повреждения при транспортировке или во время выполнения демонтажных и сборочных работ.

Механические повреждения могут варьироваться от небольших вмятин и зазубрин на кромках и местного изгиба до крупных искривлений, трещин или поломки лопастей. Мелкие повреждения кромок должны быть зашлифованы, небольшие изгибы отрихтованы, а эксплуатация лопастей продолжена. Поломанные, изогнутые или растрескавшиеся лопасти должны быть возвращены изготовителю или его региональным представителям по техническому обслуживанию или направлены авторитетной ремонтной фирме, обладающей эффективными технологиями и опытом в области восстановления лопастей винтов. При наличии у фирмы-изготовителя запасных лопастей целесообразна их поставка и замена вместо поврежденных.

Следует также подвергать дефектации фланцы лопастей, поскольку трещины могут появляться во фланцах между отверстиями для болтов.

Лопастей ВРШ являются сложными деталями, поэтому их ремонт следует поручать только специалистам в этой области, которые имеют необходимые практические навыки и средства для точного измерения и профилирования лопастей. Технологические операции восстановления поврежденных лопастей ВРШ включают: рихтовку; наплавку и сварку; термическую обработку для снятия внутренних напряжений в металле; дефектоскопию и неразрушающий контроль технического состояния и, при необходимости, балансировку винтов.

Санкционировать ремонтные работы и контролировать их должно соответствующее классификационное общество, под надзором которого находится судно. Классификационные общества устанавливают правила для максимального объема восстановительных ремонтных работ различных участков лопастей. Обычно после сварочных работ и восстановления поверхностей лопастей наплавкой для снятия напряжений требуется термическая обработка. Исключение составляют лопасти, изготовленные из никелево-

алюминиево-бронзовых сплавов, для которых термообработка не требуется.

Деформированные кромки должны быть выправлены, а очень мелкие трещины на входных кромках могут быть полностью устранены шлифовкой. Ремонт поверхностей, подвергшихся разрушениям вследствие кавитационной эрозии, производится путем зачистки эродированных участков до чистого металла с последующим восстановлением поверхностей наплавкой и шлифовкой. Проведение наплавки поверхности лопасти может вызвать их деформацию. Поэтому, после наплавки, лопасти должны подвергаться контролю профиля и шага. При разрушениях, вызванных кавитационной эрозией, необходимо установить причины её возникновения и, если это возможно, их устранить. Например, для уменьшения или исключения кавитации на засасывающей поверхности, изменяют профиль лопасти подъёмом входящей кромки. С этой же целью можно менять условия подвода потока воды к гребному винту, внося изменения в конструкцию кронштейнов гребного вала. Одним из действенных способов борьбы с кавитационной эрозией является организация таких режимов эксплуатации пропульсивной установки, при которых исключается длительная работа гребного винта с малыми шагами при высоких частотах вращения. Если не вносить никаких изменений, то кавитационная эрозия будет продолжать своё развитие.

Износ представляет собой постепенную потерю металла с поверхности лопасти, которая становится шероховатой. Размеры повреждений, вызванные износом, зависят от материала лопастей, характеристик потока воды на лопасти и условий, определяющих возникновение коррозионных разрушений.

Абразивная эрозия может происходить, когда в воде содержатся значительные по количеству и размерам твердые частицы, такие как песок. Возникновению и развитию шероховатости способствуют отложения и обрастания поверхностей лопастей и ступиц винтов. Шероховатость поверхности лопастей существенно снижает к.п.д. гребного винта. Шлифовка и полировка являются эффективным средством восстановления к.п.д. гребного винта, при этом расход топлива может снизиться от 3% до 5%. Затраты, связанные с выполнением этих работ, окупаются через 15-30 ходовых суток. Однако, операции по шлифовке и полировке должны выполняться заводами-

изготовителями гребных винтов или фирмами, специализирующимися на подводном производстве таких работ.

С целью сокращения расходов можно ограничиться полировкой поверхностей лопастей на радиусах $>0,7R$, что позволяет выполнять эти работы за счет дифферентовки судна, то есть без постановки его в док.

Применяемые для изготовления гребных винтов 13% хромистая мартенситная и 18% хромистая аустенитная нержавеющие стали имеют тенденцию к интеркристаллитной коррозии, проявляющейся в виде трещин, хотя они имеют достаточную степень сопротивляемости кавитационной эрозии и коррозионной усталости в свободном потоке морской воды. Из-за подверженности образованию трещин ВРШ, выполненные из этих материалов, требуют тщательного осмотра в районе фланцев лопастей на наличие трещин, особенно в районе посадочных площадок в болтовых отверстиях и щеках между болтовыми отверстиями. Также должны тщательно проверяться окна под установку лопастей в корпусе ступицы.

Когда лопасти демонтированы со ступицы винта или когда ступица разобрана, следует принимать меры предосторожности, чтобы предотвратить попадание грязи во внутрь ступицы. Если ступица разбирается на месте в доке, то следует позаботиться о том, чтобы участок вокруг гребного винта был надежно защищен от атмосферных осадков, пыли, других внешних воздействий. Как только лопасти будут демонтированы из своих гнезд, окна в ступице следует закрыть листовыми заглушками или иным надежным изолирующим средством.

Лопастям следует поднимать специальными грузоподъемными устройствами, которые предоставляются или рекомендуются заводом-изготовителем. Обычно используются специальные стропы или захваты. При транспортировке лопастей необходима осторожность, чтобы избежать повреждения подошвы фланцев лопастей, особенно на кольцевом участке, который соприкасается с уплотнением лопасти. Перед тем как поставить лопасти на место, следует очистить все резьбы и болты крепления.

При монтаже новых или старых лопастей в узле ступицы необходимо в точности следовать инструкциям изготовителя относительно затяжки болтов крепления лопастей. Следует применять рекомендованную резьбовую смазку. Если ее нет, то следует про-

консультироваться с заводом-изготовителем по поводу того, следует ли вносить изменения в рекомендованную технологию затяжки при использовании какой-либо другой смазки. Болт, затянутый в соответствии с указанным в спецификации усилием, но обработанный другой консистентной смазкой вместо рекомендуемой дисульфидмолибденовой, имеющей низкий коэффициент трения, окажется недостаточно затянутым. Если значение крутящего момента, указанного для затяжки болтов, смазываемых обычной консистентной смазкой, применить для болтов, обработанных дисульфидмолибденовой смазкой, то они будут сильно перенапряжены.

Рекомендуются два основных способа затяжки болтов лопасти.

В одном из них требуется, чтобы болты затягивались до указанного значения крутящего момента и, в этом случае, важно применять установленную технологию, включая затяжку болтов в указанном порядке, если он дается в инструкции. Если не придерживаться строго рекомендованной технологии, то коэффициент трения будет меняться и это будет влиять на предварительные усилия, действующие на болты.

Другой способ предполагает затяжку болтов, а затем отпусkanie болтов по одному и, наконец, начиная с установленного в инструкции значения крутящего момента, затяжку каждого болта производят повторно, поворотом его на заданное угловое перемещение. Особенности технологий затяжки болтов могут иметь некоторые отличия, однако, во всех случаях следует неукоснительно выполнять инструкции завода-изготовителя. После того, как все лопасти поставлены на свое место, следует проверить уплотнения лопастей на протечки и застопорить болты, следуя рекомендациям завода-изготовителя.

8.4 Проблемы кавитации, вибрации и шума

В последние годы снижены допустимые уровни вибрации и шума на судах. Для многих судов большое значение имеет также снижение генерируемого винтами подводного шума. Кавитация негативно влияет на эксплуатационные качества гребных винтов, являясь главным источником шума и вибрации, а также причиной повреждений поверхностей лопастей в результате разрушения образовавшихся пузырьков, наполненных воздухом и парами воды. Поэтому кавитация является важнейшей проблемой для специалистов по гидродинамике и эксплуатационников.

8.4.1 Кавитация

По мере того как вода обтекает лопасти гребного винта, местные скорости на некоторых участках возрастают, вызывая соответствующие понижения давления. Эта зависимость устанавливается законом Бернулли, согласно которому сумма энергий давления и скорости постоянна. Это можно представить следующим выражением:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const},$$

где:

P - давление,

ρ - плотность воды,

v - скорость воды.

Так как давление снижается, температура вскипания воды падает. Если скорость воды достаточно высока, то давление понижается до такого значения, когда температура насыщенных паров становится равной температуре воды. При этом происходит вскипание воды (кавитация) и в ней образуется область с пузырьками (полостями-кавернами) водяных паров, обычно с некоторым количеством воздуха. В лабораторных условиях, используя чистую воду, можно медленно понижать давление значительно ниже этого значения, не вызывая её вскипания, однако, в реальных условиях работы гребного винта мельчайшие твердые частицы и газы, содержащиеся в воде, являются центрами образования пузырьков и начала кавитации.

Когда давление воды вновь повышается, пузырьки разрушаются. Каждый разрушающийся пузырек создает в воде волны повышенного давления. Если пузырьки разрушаются достаточно близко к твердой поверхности, то об неё происходит удар мельчайших масс воды с высоким давлением (микрогидравлические удары). Если это происходит постоянно, то возможно появление эрозии поверхности. Это явление известно как кавитационная эрозия. Даже если разрушение поверхности не происходит, то кавитация вызывает пульсирующее давление, которое приводит к появлению вибрации и шума.

Эксплуатационники должны знать, как избежать или уменьшить кавитационную эрозию и снизить уровень шума и вибрации. Уровень создаваемого гребными винтами шума и вибрации является одним из определяющих факторов для военных кораблей и некоторых других судов, например, гидрографических.

На стадии проектирования судна важно выбрать оптимальные значения частот вращения гребного винта и его диаметра не только с целью создания эффективной гребной установки, но и исключения кавитации. Проект судна должен уменьшить разброс между максимальным и минимальным коэффициентами попутного потока, исключить внезапные изменения скорости воды в попутном потоке. Обводы корпуса перед гребным винтом должны быть плавными, а наклон оси гребного вала минимальным. Выступающие части корпуса должны быть тщательно рассчитаны, чтобы уменьшить возмущение попутного потока.

Ожидаемый рабочий профиль должен быть найден разработчиком винта по возможности более точно, чтобы учесть его работу в различных условиях эксплуатации.

8.4.1.1 Формы кавитации

На лопастях гребных винтов или в окружающей их воде могут происходить различные виды кавитации, одни из которых более опасны, чем другие.

^{*} В отечественной литературе кавитация традиционно подразделяется на газовую, кавитацию первой стадии и суперкавитацию (Ред.).

Пузырьковая кавитация.

Когда поток обтекает засасывающую сторону профиля, его скорость увеличивается, а давление уменьшается, в результате может возникнуть пузырьковая кавитация на участке лопасти, имеющей наибольшую толщину сечения. На рис. 36 показана пузырьковая кавитация на лопасти модели гребного винта, работающего в кавитационной трубе.



Рис. 36. Пузырьковая кавитация на лопасти
(Движение потока воды слева направо, гребной винт правого вращения)

Пузырьки растут и движутся вместе с потоком воды, а затем быстро уменьшаются в размерах. Чем больше отношение толщины к хорде сечения, тем больше максимальное падение давления и тем более вероятно образование на лопасти пузырьковой кавитации. Одним из способов исключения этого вида кавитации является увеличение длины хорды сечения, что уменьшает отношение толщины к хорде. Кривизна сечения влияет на распределение давления на засасывающей стороне и поэтому влияет на возникновение на лопасти пузырьковой кавитации.

Пленочная кавитация.

Если кривизна сечения уменьшена, то необходимо увеличить угол атаки, что может привести к возникновению на лопасти пузырьковой кавитации, поэтому необходимо найти оптимум между изогнутостью лопасти и углом атаки.

Когда поток за сечением лопасти движется под большим положительным углом атаки, происходит внезапное падение давления сразу позади входной кромки на засасывающей стороне. Если это падение давления больше статического давления воды, то будет возникать пленочная кавитация.

Поток воды отделяется от поверхности лопасти с образованием пароводяных и газовых полостей - каверн. На рис. 37 показана пленочная кавитация на лопасти. Если поток воды будет двигаться при отрицательных углах атаки, то может возникнуть пленочная кавитация на нагнетательной поверхности лопасти.

Облачная кавитация.

Пленочная кавитация, образуемая на лопасти, затем превращается в облачную кавитацию, состоящую из большого количества мельчайших пузырьков, проявляющихся в виде тумана.

Вихревая кавитация на крае лопасти и ступице.

Когда гребной винт работает под нагрузкой, образуется поток, обходящий внешние кромки лопастей с нагнетающей стороны в направлении засасывающей стороны, что ведет к вихреобразованию на краю лопасти. Разрушение этих вихрей приводит к созданию импульсов высокого давления, которые, воздействуя на наружную обшивку корпуса судна, могут вызвать повышенную вибрацию кормовой оконечности судна.

Вихри также сбрасываются с корневых сечений каждой лопасти, перемещаясь вдоль ступицы и, сплетаясь вместе, образуют вихрь на ступице. Как и в случае с вихреобразованиями на краю лопасти, вихрь на ступице будет кавитировать, если он обладает достаточной энергией. На этот вихрь оказывает влияние нагрузка, действующая на лопасти, форма ступицы и ее обтекателя.



Рис. 37. Пленочная кавитация на лопасти
(Течение потока воды слева направо позади модели кормы одновинтового судна с гребным винтом правого вращения. Наряду с пленочной кавитацией, наблюдаемой на верхней лопасти, видны также вихреобразования на краю лопасти)

На высокоскоростных судах конический обтекатель ступицы может не только образовывать мощный вихрь на ступице, но и приводить к пузырьковой кавитации в корневых сечениях лопастей. Эффективным способом уменьшения интенсивности вихря на ступицах гребных винтов высокоскоростных судов и избежания эрозии корневых участков лопастей является применение цилиндрического обтекателя ступицы. На рис. 38 показаны хорошо сформировавшиеся вихреобразования на краях лопастей и ступице.



Рис. 38. Вихревая кавитация на краях лопастей и ступице
(Поток воды слева направо, гребной винт правого вращения)

Вихревая кавитация между гребным винтом и корпусом судна.

Еще одной формой кавитации, несмотря на довольно редкое ее проявление, является вихревая кавитация между гребным винтом и корпусом судна. Она может принимать несколько форм и поэтому трудно дать её общее описание. Обычно она проявляется в виде одиночного вихря в потоке, реже двух или трёх вихрей, исходящих из небольшого локализованного участка в корме судна. Эти вихри простираются по направлению к гребному винту. Их можно обнаружить по кавитационному следу в виде сердечника. Вихрь кажется

неподвижным для наблюдателя, если смотреть на него через подводное окно кавитационной трубы. В то же время водолаз на морском дне видит, что вихрь движется вместе с судном. На самом деле вихрь движется в попутном потоке, создаваемом винтом и движущимся судном.

При стробоскопическом (прерывистом) освещении, когда вращающиеся лопасти гребного винта кажутся неподвижными, можно увидеть, как вихрь проходит через просветы между лопастями или цепляется о заднюю плоскость лопастей. Последний эффект является иллюзорным, поскольку в действительности лопасти прорезают существующий вихрь, но не видимый на другой плоскости лопастей. Чрезвычайно редко можно наблюдать отчетливый вихрь в потоке за гребным винтом. На рис. 39 представлен редкий случай, когда вихрь одновременно присоединён к концу лопасти и корпусу судна над винтом.

Такое соединение оказывается парадоксальным при попытке объяснить его законами, по которым образуются и существуют вихри, потому что вихрь на корпусе судна является стационарным явлением по отношению к судну, в то время как спиральный вихрь на краю лопасти движется по винтовой линии назад относительно корпуса судна.

Это явление требует дополнительных и более тщательных исследований. Основным условием для существования этих винто-корпусных вихрей являются определенные значения вязкости потока жидкости и присутствие в нем турбулентности. Кроме того, они могут вызываться движением самого судна и/или индукционным или засасывающим эффектом, создаваемым гребным винтом.

Появлению винто-корпусных вихрей способствуют также конструктивные особенности: малые значения относительной поступи гребного винта; небольшие зазоры (просветы) между краями лопастей и корпусом судна; наличие над гребным винтом плоской поверхности корпуса судна.

В некоторых случаях кавитационный след вихря в виде сердечника присоединенного к корпусу судна может внезапно разрушаться, создавая мощные воздействия масс воды на обшивку корпуса судна, вызывая вибрацию последнего.



Рис. 39. Кавитационный вихрь между гребным винтом и корпусом судна

Это явление не имеет определенной цикличности и воспринимается как громкие (грохочущие) удары. В отдельных случаях оно может вызывать образование трещин в обшивке корпуса судна. Так как это явление не периодически по отношению к лопастной частоте или её гармоникам, то отличается от других шумов (вибрации), которые генерируются гребными винтами.

На рисунке 39 показано как поток воды обтекает справа налево модель корпуса судна с трехлопастным винтом правого вращения. Лопасты, находящиеся вверху, разрезают вихрь прежде чем он сделает петлю вверх и соединится с кавитационным свободным спиральным вихрем, сбегаящим с движущейся лопасти. На этом стыке видно скопление пузырьков в виде облака, которое является местом, где происходит разрушение вихря.

8.1.1.2 Число кавитации

Развитие и распространение кавитации на гребном винте зависит от окружающей среды, в которой он работает. "Число кавитации" является основным критерием подобия, используемым для соотнесения характеристик кавитации натуральных гребных винтов с характеристиками кавитации моделей гребных винтов, испытываемых в кавитационной трубе. Основным условием сохранения подобия характеристик кавитации должно быть равенство значений числа кавитации испытываемой модели винта и натурального винта. Число кавитации представляет собой отношение гидростатического напора к скоростному напору. Чтобы сделать поправку на то, что испытания моделей гребных винтов производятся при разных температурах, и для возможности прогнозирования характеристик кавитации натуральных гребных винтов, давление насыщенного водяного пара при соответствующей температуре вычитается из статического давления воды. Нормативной является температура 20°C для прогнозирования характеристик кавитации натуральных гребных винтов. Существует несколько вариантов определения числа кавитации. Основным является число кавитации свободного потока σ , которое выглядит следующим образом:

$$\sigma = \frac{2(P - P_v)}{\rho V_A^2},$$

где:

P - статическое давление у оси вращения гребного винта,

P_v - давление насыщенных паров воды,

ρ - плотность воды,

V_A - скорость перемещения гребного винта.

Иногда вместо статического давления у оси вращения гребного винта рекомендуется использовать давление на краю лопасти или на 0,8 радиуса, когда лопасть находится в положении стрелки, указывающей на 12 часов.

Если $V_A=0$, то это значение числа кавитации не может быть применено. Использование значений числа кавитации, основанного на окружной скорости, дает возможность избежать этой неопреде-

ленности, поэтому альтернативной формулой для определения числа кавитации является следующая:

$$\sigma' = \frac{2(P - P_v)}{\rho (\pi D n)^2},$$

где:

D- диаметр гребного винта,

n- частота вращения гребного винта.

В практических расчетах могут использоваться некоторые модификации числа кавитации, например, вместо D может использоваться значение $0,7 D$ или может быть опущено π , в этом случае формула принимает следующий вид:

$$\sigma' = \frac{2(P - P_v)}{\rho D^2 n^2}$$

При определении числа кавитации необходимо использовать согласующиеся единицы измерений, такие как: P и P_v , выраженные в Н/м²; ρ в кг/м³; V_A в м/с; D в м; n в с⁻¹ (1/сек). Чем меньше значение числа кавитации, тем большая вероятность распространения кавитации на винте.

8.1.1.3 Изменения, вызываемые попутным потоком

Гребные винты работают в неоднородном попутном потоке. В неоднородной области попутного потока скорость и направление набегающего потока у каждой лопасти варьируется по мере ее вращения. Это означает, что кавитация не будет постоянной, а будет меняться за один оборот винта, причем величина этих изменений будет зависеть от характеристик попутного потока. Периодические изменения кавитации порождают пульсацию давления в воде с частотой, кратной числу лопастей гребного винта и ее низшим гармоническим составляющим.

8.1.1.4 Испытания на кавитацию

Испытания моделей гребных винтов в кавитационной трубе используются для прогнозирования кавитации на натуральных гребных винтах, устанавливаемых на судах. К сожалению, нет возможности одновременно удовлетворить всем требуемым параметрам для достижения полного динамического подобия испытываемых моделей и реальных гребных винтов. Более того, моделирование области попутного потока не совершенно, даже когда модель гребного винта совмещается с моделью корпуса судна, а на начало кавитации оказывает влияние число ядер макрочастиц и газов, присутствующих в воде опытового бассейна.

В масштабе модели пограничный слой может быть ламинарным на значительных участках поверхностей лопастей, тогда как у натуральных гребных винтов пограничный слой полностью турбулентен, кроме небольшой области, лежащей очень близко к входящей кромке лопасти. Кавитация, присутствующая на модели, не всегда полностью соответствует кавитации, возникающей в реальных условиях. В связи с этим, результаты модельных испытаний должны соответствующим образом интерпретироваться для того, чтобы получить максимально достоверный прогноз кавитации, возникающей в реальных условиях. Различные исследовательские организации накопили достаточный опыт, позволяющий выполнять прогнозирование кавитации натуральных винтов с высокой достоверностью, основываясь на результатах собственных модельных испытаний.

8.1.1.5 Проблемы в процессе эксплуатации

Во время работы судна на полном ходу или на ходовых режимах, близких к нему, на гребных винтах, как правило, возникает кавитация, что считается нормальным явлением, сопутствующим работе практически всех гребных винтов. Во многих случаях она не вызывает эрозионных разрушений. Конструкторы гребных винтов обычно предусматривают достаточную площадь лопастей для того, чтобы избежать негативного действия кавитации на расчетном режиме работы. Однако, проблемы все-таки могут возникнуть, если реальный попутный поток в районе винта отличается от того, который был спрогнозирован и использован в расчетах. Если это имеет место, то могут потребоваться корректирующие действия, характер которых будет зависеть от типа кавитации.

Может оказаться необходимым, например, улучшить неблагоприятные попутные потоки за счет установки одного или более направляющих ребер (килей) на корпусе судна впереди гребного винта. Это может уменьшить резкие локальные изменения скорости попутного потока, но привести к росту сопротивления корпуса судна.

При устойчивой пленочной кавитации эрозия менее вероятна, чем при пузырьковой. Если кавитация происходит на нагнетающей стороне лопастей, то имеется большая вероятность того, что она вызовет прогрессирующее кавитационное эрозионное разрушение в отличие от подобной кавитации на засасывающей стороне лопастей. Вихревая кавитация на краях лопастей и ступице происходит позади гребного винта и не приводит к эрозии гребного винта. Эрозия может возникать на других поверхностях за гребным винтом, а вихревая кавитация ступицы может оказаться опасной для пера руля.

Иногда можно избежать кавитации на определенных участках лопастей за счет изменения профиля входящих кромок лопастей или увеличения радиуса кромки, что делает лопасти менее чувствительными к изменениям угла атаки.

Опасности кавитационной эрозии можно избежать или существенно снизить её путем подачи воздуха в поток воды прямо перед корневыми сечениями лопастей. В этом случае пузырьки разрушаются не столь интенсивно.

Винто-корпусная вихревая кавитация может быть устранена на открытых гребных винтах за счет установки небольшой осевой направляющей полосы на корпусе судна, непосредственно над гребным винтом. Это предотвращает вращение вихрей в потоке. Если гребной винт установлен в насадке, то следует обеспечить увеличение притока воды к верхней части насадки.

8.1.1.6 Эрозия

Эрозионные повреждения могут развиваться с различной скоростью. Начало их развития характеризует обесцвечивание поверхности и появление шероховатости, за которыми следует деформация поверхности, похожая на последствия дробеструйной обработки поверхностей или приобретает вид "апельсиновой корки". Затем следует полное кавитационное изъязвление поверхности.

Эксплуатационникам следует периодически осматривать гребной винт. Если присутствуют эрозионные повреждения, то их необходимо подробно описать, проиллюстрировать фотографиями и эскизами, показав места расположения и размеры повреждений. Необходимо особо выделить максимальную глубину эрозии, обязательно указав номер лопасти и дату проведения детального осмотра винта.

Следует обращать внимание на повреждения или огрубление входных кромок и любые неровности поверхностей лопастей. Деформированные или плохо обработанные лопасти способствуют развитию кавитационных процессов. Необходимо проверить, чтобы перед гребным винтом не было ничего, что способно возмущать поток. Следует сообщать о результатах осмотров заводу-изготовителю и получать у него соответствующие рекомендации.

Когда небольшие эрозионные разрушения обнаружены в первый раз, за ними необходимо установить постоянный контроль с целью определения скоростей, с которыми они прогрессируют. Кавитационная эрозия иногда стабилизируется и в дальнейшем не развивается.

8.2 Вибрация

Рост скоростей судов и мощностей главных двигателей способствует увеличению уровня вибрации судов. Негативное влияние вибрации на ресурс и условия работы корпусных конструкций и судовых технических средств общеизвестно, в связи с чем необходимо сводить её к минимуму.

Главный двигатель и гребной винт являются наиболее виброактивными агрегатами на судне. Существует два основных источника вибрации, которые обусловлены работой гребного винта: генерация импульсов давления, воздействующих на корпус судна в районе гребного винта; периодически меняющиеся силы, которые

через валопровод и его подшипники передаются на корпус судна. Импульсы давления порождаются некавитирующими лопастями, так как вращающиеся лопасти создают вокруг себя область переменного давления - повышенное давление на одной стороне и пониженное давление на другой стороне. Вследствие этого поле давлений на лопастях постоянно меняется из-за неоднородности попутного потока.

Кавитация присутствует у большинства гребных винтов, работающих при нагрузках, близких к расчетной (номинальной). Когда каждая лопасть проходит через «гребни» в попутном потоке, то область пленочной кавитации на засасывающей стороне быстро меняется - эти изменения и вызывают импульсы переменного воздействия масс воды. Вихревая кавитация на концах лопастей также способствует образованию импульсов давления. Эти импульсы кавитационного давления обычно более мощные, чем некавитационные импульсы давления, и на судах с «острыми гребнями» попутного потока они могут вызывать недопустимо высокий уровень вибрации, который приводит к появлению трещин в обшивке корпуса.

У значительно нагруженных гребных винтов, работающих в сильно возмущенном попутном потоке, при определенных условиях кавитационные вихри на краях лопастей могут стать неустойчивыми и разрушаться за гребным винтом. Если это происходит, то возникают высокочастотные импульсы давления.

Когда ВРШ, предназначенный и спроектированный для нормальной эксплуатационной скорости судна, используется на малом шаге и при полной частоте вращения (обеспечивая малые скорости хода судна), то может возникнуть обширная кавитация. В свою очередь это вызовет чрезмерные пульсации давления и эрозию лопастей, что приводит к росту уровня вибрации.

Прогнозирование импульсов давления на корпусе судна может осуществляться для простой пленочной кавитации на ранних стадиях проектирования. Для этой цели разработаны соответствующие расчетные методики, основанные на данных модельных испытаний в кавитационной трубе, результаты которых используют для прогнозирования импульсов давления в реальных условиях. Могут быть также предприняты полномасштабные измерения с применением датчиков, устанавливаемых на корпусе судна.

Лопастни вращающегося гребного винта работают в неравномерном попутном потоке, что приводит к колебаниям за время одного оборота величин крутящего момента и упора, которые могут составлять большие отклонения от средних значений. Сумма значений крутящего момента и упора каждой лопасти в любой момент дает значения крутящего момента и упора для гребного винта в целом. Результирующие колебания крутящего момента и упора передаются через валопровод и его подшипники на корпусные конструкции внутри судна и, таким образом, также генерируют вибрацию. Воздействуя на корпус судна, они могут возбуждать осевую составляющую вибрации и крутильные колебания линии валопровода. Отклик системы валопровода на эти силы возбуждения будет зависеть от частот собственных колебаний системы.

8.3 Шум

Как правило, все суда обладают довольно значительным уровнем шума внутри корпуса. На многих судах уровень шума в румпельном помещении может достигать 100-110 дБ. Гидравлические насосы, входящие в состав рулевого устройства, во время работы могут генерировать достаточно высокий уровень шума, однако основной уровень шума производится гребными винтами. Уровень шума быстро падает по мере удаления от гребного винта. Для военных кораблей генерируемый ими подводный шум также имеет большое значение, так как он дает возможность другим военным кораблям обнаружить и узнать корабль на значительном расстоянии. Кроме того, подводный шум может являться помехой эффективности действия подводных электронных устройств самого корабля. Некоторые невоенные суда, такие, например, как исследовательские, также требуют низких значений создаваемого ими подводного шума.

Шум представляет собой волны давления с широким частотным спектром, из которого только диапазон частот от 20 до 20000 Гц воспринимается человеком на слух. Многие из импульсов давления низкой частоты, рассмотренные в предыдущих разделах, не находятся в диапазоне слышимости, но все-таки имеют большое значение для военных кораблей, поскольку они подвержены слабому поглощению водой и могут быть обнаружены на большом расстоя-

нии с помощью электронных приборов. Поглощение звуковых волн водой быстро увеличивается по мере роста частоты.

Спектр шумов гребного винта состоит как из волн давления с низкой частотой, так и из широкого спектра шумов более высокой частоты в диапазоне от 400 до 30000 Гц. Высокочастотный шум вызывается турбулентным потоком на лопастях и кавитацией. Разрушение кавитационных пузырьков и вихрей, будь то на поверхности или в воде, порождает шум в широком диапазоне частот. Именно наличие кавитации является доминирующим источником шума.

Ряд сильных ударов, различаемых на лопастной частоте, свидетельствует о кавитации засасывающей поверхности лопастей, а непрерывный потрескивающий шум говорит о кавитации нагнетающей поверхности.

Меры по снижению кавитации и шума должны быть предприняты уже при проектировании судна и гребного винта. Там, где это важно, лопасти могут быть специально сконструированы для малошумной работы, но это может отрицательно повлиять на к.п.д винта. Поскольку военные корабли проводят большую часть времени в море, работая на относительно малых мощностях, желательно, чтобы кавитация начиналась при высоких скоростях хода корабля.

При скоростях, превышающих скорость начала кавитации, шум производимый гребным винтом, может быть уменьшен на 10-15 дБ за счет подачи воздуха из входящей кромки лопастей, так чтобы он «смягчал» разрушение кавитационных пузырей. Такой подвод воздуха широко применяется для гребных винтов военных кораблей и обычно называется "воздух Преари" или "воздух Агути". В воздушной системе Преари имеются маленькие отверстия для подачи воздуха как на засасывающей стороне, так и на нагнетающей стороне по всей длине входящей кромки лопасти. В системе Агути отверстия имеются только на засасывающей стороне. Устройство такой воздушной системы является довольно сложным.

На акустические характеристики оказывает влияние число лопастей гребного винта. Генерируемый шум низкой частоты на лопастной частоте и ее ближайших кратных гармониках уменьшается при увеличении числа лопастей. Ниже скоростей хода судна, при которых начинается кавитация, различия в генерируемом шуме высокой частоты практически нет, но при скоростях хода судна

выше скорости начала кавитации применение любого количества лопастей, превышающего пять, ведет к увеличению высокочастотного шума.

На транспортных судах обычно применяются четырехлопастные гребные винты. Пятилопастные гребные винты используются преимущественно на крупных военных кораблях.

Некоторые ВФШ и ВРШ подвержены «пению», которое представляет собой пронзительный «писк» на одной частоте или на нескольких дискретных частотах. Когда жидкость обтекает какой-то предмет, она часто отделяется от поверхности этого предмета вместо того, чтобы плавно протекать по всей его поверхности. Это отделение потока обычно происходит позади максимальной толщины сечения или там, где есть крутой изгиб его поверхности. В точке отделения потока образуются завихрения, затем они отрываются от поверхности и уносятся потоком. Из-за циркуляции в вихре на лопасть воздействует поперечная сила всякий раз при образовании завихрения. Когда отделение потока происходит с обеих сторон сечения, завихрения образуются и срываются попеременно с каждой стороны, вызывая переменные поперечные силы. Эти завихрения известны как вихри Кáрмана, а их путь по потоку известен как «дорожка вихря Кáрмана». Вихри Кáрмана обычно возникают на тросах такелажа, телефонных проводах, флагштоках и дымовых трубах, но они также могут появляться на выходящей кромке лопастей гребных винтов, создавая переменные поперечные силы на лопастях. Если частота сбрасывания вихрей с лопастей совпадает с частотой собственных колебаний лопасти или участка лопасти, то возникает резонанс, который и проявляется в эффекте «пения». Возбуждение собственной частоты колебания какой-либо лопасти силами, вызываемыми сбрасыванием вихрей Кáрмана, является наиболее частой причиной «пения», но его также приписывают другим эффектам, таким как неустойчивость попутного потока или кавитация.

Обычно «пение» появляется только при определенных условиях работы и либо на одной частоте вращения гребного винта либо на ограниченных частотах.

Известны случаи, когда один гребной винт из серии винтов одной конструкции «поет», в то время как другие винты этой же конструкции не «поют», а в некоторых случаях «поет» только одна

лопасть на гребном винте. Хотя «пение» трудно прогнозировать, его почти всегда можно устранить при помощи заострения выходящих кромок лопастей, что стабилизирует отделение потока в этой точке и устраняет, таким образом, условия, которые формируют вихри Кáрмана. Для некоторых лопастей с большим скосом целесообразно незначительно продлить заострённую кромку за край лопасти с выводом её на входящую кромку.

Существует много примеров, когда гребные винты проявляют признаки, подобные «пению». При этом создаваемый шум модулируется на частотах, кратных частоте вращения гребного вала, а не на одной или нескольких фиксированных частотах. Эти шумы гребного винта еще не до конца изучены, однако считается, что они имеют гидродинамическую и механическую природу, являясь сложной формой колебаний лопастей или их участков.

8.4 Лопастей с большим скосом (несимметрией)

Лопастей с большим скосом впервые были упомянуты в 1880 г., но широко применяться они начали только в 60-х годах с целью преодоления проблем, которые появились в эксплуатации гребных винтов при высоких единичных агрегатных мощностях пропульсивных установок. Лопастей с большим скосом требуют более сложных и детальных методов гидродинамических исследований и проектирования, чем лопастей без скоса, а их изготовление обходится намного дороже. Тем не менее, они обладают рядом значительных преимуществ, связанных с меньшими уровнями кавитации, шума и вибрации. Они имеют такой же к.п.д. за корпусом судна (η_v), что и винты с лопастями без скоса того же диаметра, несмотря на то, что их к.п.д. в свободной воде (η_0) обычно немного ниже. Следует отметить, что лопастей с большим скосом при работе на швартовых создают меньший на 15% упор, однако при работе судна на задний ход создаваемый ими упор увеличивается на 15-20%.

Некоторые преимущества лопастей с большим скосом обусловлены тем, что входящие кромки постепенно входят в «гребень» попутного потока, а выходящие кромки так же постепенно выходят из него. Это определяет более плавные процессы образования и разрушения кавитации на каждой лопасти, чем на лопастях без скоса. Если скос выбран правильно, то кавитация на одной лопасти разрушается, когда она выходит из «гребня» потока, в то время как

следующая лопасть входит в «гребень» потока и постепенно создает свою кавитацию. Это значит, что общее изменение уровня кавитации гребного винта и флуктуации упора и крутящего момента гребного винта уменьшаются.

Потоки на лопастях с большим скосом и лопастях без скоса не идентичны. Развертка входящей кромки играет важную роль в формировании потока на лопасти, а поток вокруг одного сечения на определенном радиусе не может рассматриваться в изоляции от остальной части лопасти. На гребных винтах с большим скосом, работающих в мягком попутном потоке с положительными углами атаки, локализованный кавитационный пузырь образуется вдоль входящей кромки. При увеличении радиуса этот пузырь может превратиться в оторвавшийся вихрь с кавитирующим сердечником. Считается, что винтообразно вращающаяся вокруг входной кромки с большим скосом (сильно изогнутой) с нагнетательной стороны на сторону низкого давления жидкость на пузыре или в вихре испаряется в процессе кавитации. Поэтому через лопасть не течет вращающаяся жидкость в виде кавитирующей пузырящейся смеси и не вызываются возмущения флуктуирующего давления. Когда лопасти проходят через неоднородный попутный поток, то уровень основной массы кавитации изменяется. Если не возникнут области отделившейся кавитации, уровни создающихся импульсов давления и шума будут ниже, чем на лопастях без скоса. При этом вибрация корпуса судна, вызванная действием импульсов давления, может быть уменьшена на 70%.

Переменные силы, возникающие на лопастях гребных винтов, передаются на корпус судна через линию валопровода и подшипники, что генерирует определенный уровень вибрации гребного вала и корпуса. При условии, что соотношение скоса и радиального шага выбраны правильно с точки зрения их взаимодействия с попутным потоком, гребные винты с большим скосом имеют значительно меньшие значения этих переменных сил и, соответственно, возбуждают меньший уровень вибрации. Там, где лопасти без скоса или с небольшим скосом имеют допустимые импульсы давления, воздействующие на корпус судна, и, следовательно, приемлемый уровень вибрации, выбор лопастей с большим скосом позволит уменьшить зазор между краями лопастей и корпусом судна, не приводя к повышению уровня вибрации. Это означает, что можно применить

гребной винт бóльшего диаметра. Если это сопровождается соответствующим уменьшением частоты вращения, то пропульсивный к.п.д. может быть увеличен. На транспортных судах диаметр гребного винта может быть увеличен на 10%, при этом пропульсивный к.п.д. увеличится примерно на 5%.

Вызванное этим снижение расходов на топливо и экономия эксплуатационных расходов обеспечивает быструю окупаемость дополнительных затрат на применение винта с большим скосом.

На военных кораблях и некоторых типах судов, где большое значение имеет генерируемый винтами подводный шум, применение лопастей с большим скосом также может дать значительное уменьшение низкочастотных составляющих акустического спектра шумов. За счет задержки наступления пленочной кавитации может быть увеличена скорость судна, при которой начинается кавитация (пороговая скорость кавитации). Кроме того, нарастание кавитационного шума, по мере увеличения скорости движения судна, у винтов с большим скосом происходит медленнее, чем у других винтов.

9. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

В настоящее время применение ВРШ имеет широкое распространение на судах и кораблях различного назначения. Системы ВРШ значительно упростились и стали более надежными. Гидравлика системы почти всегда размещается в корпусе судна и поставляется в виде стандартных модулей, а использование цифровых электронных систем управления стало обычным явлением. Все это привело к тому, что установка ВРШ на суда стала менее трудоёмкой и более доступной, а их ввод в эксплуатацию более быстрым. Эта тенденция, в сочетании с оптимизацией методов проектирования, установилась надолго.

В гидравлических системах прогнозируется применение нетоксичных, способных к биологическому разложению жидкостей вместо минеральных масел. Они не вредны для окружающей среды, однако чувствительны к обводнению, и это может помешать их использованию в системах ВРШ. Применение пресной воды в качестве гидравлической жидкости является привлекательной идеей. Однако, необходимо преодолеть ряд сопутствующих проблем, связанных с плохими смазочными свойствами воды, коррозией и повышенным износом металлических деталей гидравлических систем и исполнительных механизмов гребных винтов.

Могут измениться конструкционные материалы, например, прогнозируется изготовление лопастей ВРШ и ВФШ из различных композитов. В этом кроются значительные потенциальные преимущества, и уже ведутся разработки удовлетворительных конструкций винтов из композитных материалов.

Предпочтительное использование в настоящее время более экономичных среднеоборотных дизелей, а не малооборотных безредукторных дизелей, вероятно, будет иметь место и в будущем. ВРШ предоставляют возможность обеспечить пусковые и эксплуатационные режимы работы среднеоборотных дизелей на малых нагрузках и имеют преимущества в тех случаях, когда несколько двигателей приводят в действие один гребной винт. Поэтому возрастающее использование среднеоборотных дизелей в качестве пропульсивных способствует и широкому применению ВРШ.

У ВРШ имеется целый ряд конкурирующих систем. Для многих типов судов, таких как паромы и круизные лайнеры, гребные элек-

трические установки с ВФШ в настоящее время являются привлекательными, хотя можно доказать применимость ВРШ и в гребных электрических установках. Применение бесступенчатых электроприводов, вероятно, будет расширяться, а водометы уже сейчас заменяют гребные винты на многих быстроходных судах. В конечном итоге могут появиться другие пропульсивные технологии, которым не требуется гребной винт, тем не менее, в обозримом будущем многие новые суда и различные плавсредства будут по-прежнему оборудоваться винтами регулируемого шага.

Список литературы

Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. – М.:Транспорт, 1987.-223 с.

Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/ Под редакцией Я.И. Войткунского, Л.: Судостроение, 1985.-768 с.

Brownlie K. Conrollable Pitch Propellers. Published by Institute of Marine Engineers. London, 1998.-104 p.

Propellers Versus Waterjets. Marine Engineers Review. March 1998, 38-39 pp.

The Potential of Super-Cavitating and Surface-Piercing Propellers. Marine Engineers Review. March 1998, p.41.

Underwater Repair Solutions Widen. Marine Engineers Review. April 1999, 56-58 pp.

Controlling Propeller and Thruster Noise. Marine Engineers Review. August 1999, p.34.

Mission Impossible. Marine Engineers Review. October 1999, 22–24 pp.

Редактор: В. Калугин
Рецензент: М.Колегаев
Технический редактор: К.Горская

ОДЕССКИЙ МОРСКОЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ ЦЕНТР

✉ Украина, 65027, Одесса, ул. Пастера, 16

☎ Телефон/Факс (0482) 23-52-20

Технический редактор Коломийченко Т.Л.
Корректор Попов С.М.

Подписано в печать 17.04.2002

Формат 60*84/16. Заказ 1704.

Гарнитура Times New Roman

Бумага офсет.

Усл.печ. листов 9 . Тираж 1000 экз.

Издательство и типография "ТЭС" (Свидетельство ДК № 771)
Одесса, Канатная 81/2. Тел 429098