

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Орлов Евгений Иванович — заместитель директора.
Центральный научно-исследовательский
дизельный институт
diesel@cnidi.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_seu@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Orlov Evgenij Ivanovich —
Deputy Director.
Central Research Diesel Institute
diesel@cnidi.ru
Petrov Aleksandr Pavlovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
app.polab@inbox.ru
Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_seu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 года

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-156-176
УДК 629.5.03.-8

**А. А. Иванченко,
В. А. Шишкин,
В. Н. Окунев**

ОБЗОР ОПЫТА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СОВРЕМЕННОМ СУДОСТРОЕНИИ

В статье выполнен анализ современных предпосылок совершенствования конструкции пропульсивных комплексов судов, резервов традиционных конструктивных схем, конструкций и опыта применения винторулевых колонок с электрическим и механическим приводом, выполнено обобщение опыта проектирования, монтажа и технической эксплуатации. Показано, что в совершенствовании гидродинамического комплекса судна кроются значительные резервы повышения его энергоэффективности. Отмечается, что традиционные пропульсивные системы двигатель – передача – валопровод – движитель с винтами фиксированного и регулируемого шага, претерпев усовершенствования, сохраняют свои позиции преимущественно на крупнотоннажных океанских судах с главными двухтактными двигателями, где их КПД остается самым высоким. Выполнен обзор рынка применяемых в отечественном и зарубежном судостроении ВРК компаний «ABB Marine», «Rolls-Royce OY Ab», «Schottel», «Steerprop» и др. Сформулированы выводы и рекомендации по дальнейшему совершенствованию движительных систем.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, пропульсивный комплекс, корпус судна, движитель, винт регулируемого шага, винт фиксированного шага, винторулевые колонки.

Предпосылки для поиска новых технических решений

История технических разработок, направленных на обеспечение эффективности энергетических установок судов, уходит в глубь времен — к моменту создания первого судна с тепловым двигателем. Новый импульс активности специалистов в поиске ее решения придала Резолюция 8 по выбросам углекислого газа с судов. Взвешенно следуя указаниям Резолюции 8, Международная морская организация (*International maritime organization* — ИМО, далее ИМО) приняла в декабре 2003 г. Резолюцию А.963(23) «Политика и практика ИМО, относящаяся к сокращению

выбросов парниковых газов с судов», в которой определены пути сокращения этих выбросов посредством технических и эксплуатационных мер. Впоследствии, после углубленной доработки и обсуждения, рассматриваемые принципы были включены в новую редакцию Приложения 6 к МАРПОЛ 73/78 и вступили в силу в 2013 г. [1]. Это привело к коренному пересмотру подходов к рассмотрению эффективности судовых энергетических установок (СЭУ) и судна в целом. В результате в современном судостроении не только декларируется, но и происходит переход от рассмотрения частных случаев повышения КПД агрегата к комплексной интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели судна. Целью технических решений в современной трактовке стало улучшение энергетической эффективности строящихся судов путем внедрения требований по конструктивному индексу CO_2 , выраженному в $г \cdot CO_2/т \cdot милю$.

В качестве научной основы для решения задачи такого рода может быть положено представление о судовом гидромеханическом (пропульсивном) комплексе как о системном объекте. Оно впервые четко сформулировано в 60 – 70-е годы XX в. в работах М. А. Брука [2], К. Л. Ржепецкого [3] и далее развивалось в работах Н. В. Голубева [4], Ф. М. Кацмана [5], Ю. М. Кулибанова [6], С. В. Камкина [7], В. К. Румба [8], Л. С. Артюшкова [9] и др. На основе обобщения исследований указанных авторов Г. А. Артемонов в работе [10] предложил системную модель судового пропульсивного комплекса, наглядно демонстрирующую динамическое взаимодействие его элементов при движении судна в схематическом виде:

$$N_e^{ГД}(n_{ГД}) \leftrightarrow [N_e^{ГД}(n_{ГД}) n_n n_{вн} = -N_{в}(n_{в})];$$

$$\left[N_{в}(n_{в}) = P(v_p n_{в}) \frac{v_p}{\eta_p} \right] \leftrightarrow \left[P_e(v n_{в}) \frac{v}{\eta} = \frac{R(v)v}{z\eta} \right],$$

где $N_e^{ГД}$ — мощность двигателя; $n_{ГД}$ — частота вращения его вала; $N_{в}$ — мощность, подведенная к винту; $n_{в}$ — частота вращения гребного вала; η — пропульсивный коэффициент; z — число гребных винтов; v — скорость судна; v_p — скорость воды в диске гребного винта; η_p — КПД гребного винта; P — упор винта; P_e — полезная тяга гребного винта.

Из приведенной зависимости следует, что наиболее важной характеристикой пропульсивного комплекса является зависимость $R = f(v)$, которая является достаточно сложной многофакторной зависимостью от формы обводов корпуса, его полноты и состояний поверхности, осадки судна, глубины и ширины фарватера, продолжительности плавания, состояния моря и погоды. Взаимодействие сопротивления корпуса R и гребных винтов $N_{в}(n_{в})$ для вала гребного винта характеризует *винтовая характеристика судна* [3], форма которой зависит, в первую очередь, от характера изменения сопротивления корпуса судна $R = f(v)$ от скорости движения судна. В результате взаимодействия характеристик корпуса $R = f(v)$ с характеристиками гребных винтов: $P = f(n, v)$ и $N_{в} = f(v, n, \eta)$, образуется винтовая характеристика, определяющая режим работы главного двигателя (ГД) — винтовой характеристики двигателя $N_{д} = f(n_{д})$, которая характеризует эксплуатационные показатели ГД и расход топлива. *Собственные характеристики* ГД определяют возможную область режимов использования и параметры их работы, в том числе допустимые при этом нагрузки. Собственными характеристиками дизеля являются: внешние, частичные внешние, ограничительные, нагрузочные, регуляторные и др.

В общем случае эффективность пропульсивного комплекса с дизельной установкой может быть охарактеризован его КПД:

$$\eta_e^{ПК} = \eta_e^{ГД} \eta_n \eta_{вв} \eta = \eta_e^{ГД} \eta_n \eta_{вв} \eta_p \eta_k,$$

где $\eta_e^{ГД}$ — эффективный КПД главного двигателя; η_n — КПД передачи; $\eta_{вв}$ — КПД валопровода; η_p — КПД винта; $\eta_k = (1 - t)/(1 - \omega)$ — коэффициент влияния корпуса; t и ω — коэффициенты засасывания и попутного потока для винта, которые в совокупности отражают влияние корпуса судна на работу гребного винта в виде коэффициента η_k .

Изучение всех технических аспектов проблемы на фоне необходимости удовлетворения требований ИМО показало, что потенциал для экономии энергии велик и может достигать величини

ны 50 %. При этом возможности ГД, характеризующие его КПД, по мнению экспертов, достигли своего предельного значения. Дальнейшее его повышение внедрением утилизации тепла с целью получения электроэнергии и привода вспомогательных механизмов существенно усложняет энергетическую установку, ведет к повышению ее стоимости и снижению надежности.

Наиболее перспективным является направление оптимизации характеристик корпуса и гребного винта. При этом винт по отношению к корпусу и ГД судна является вторым по значимости элементом пропульсивного комплекса (ПК) и во многом определяет надежность, экономичность и безопасность плавания судна. Соответственно следующими по значимости после корпуса для ПК являются характеристики гребных винтов. Наиболее распространенные из них – *кривые действия гребного винта в свободной воде* — представляют собой изменение безразмерных коэффициентов упора K_1 момента K_2 и КПД винта η_p в зависимости от относительной поступи винта λ_p . Эти характеристики в абсолютном или относительном виде используются для отображения как собственных характеристик двигателя, так и винтовых характеристик двигателя и судна и используются на этапе разработки технического задания на проектирования судна.

Выбор типа ПК и ограничительных параметров, в значительной мере определяющих компоновочную схему ПК, выполняет конструктор с учетом требований, являющихся следствием предварительного анализа конструкции корпуса, как элемента системы более высокого уровня. Чаще всего это требования повышенной экономичности, надежности, ресурса и скорости судна по сравнению с существующими вариантами конструкции судна-прототипа. Кроме того, в последнее время выдвигаются требования высокой энергетической эффективности его главной энергетической установки. В этих случаях, как правило, не возникает необходимости в принципиально новых разработках основных элементов и узлов ПК, и прототип выбирают из множества вариантов, имеющихся на рынке при наличии ряда ограничений (по грузоподъемности судна, его скорости, габаритным размерам машинного отделения, весу оборудования и др.).

В этом плане движительные системы (винты регулируемого и фиксированного шага (ВРШ и ВФШ), винторулевые колонки и водометные движители) в настоящее время в мире предлагают многие производители. Только в России серийное производство винтов началось в 1954 г. и в настоящее время по документации НПО «Винт» изготовлено более 4500 ВРШ диаметром 1,0 – 7,5 м и мощностью от 200 до 40000 л. с. Среди зарубежных производителей винтов и рулевых колонок авторами работ отмечаются фирмы «Wartsila», «Finnoy», «HRP», «Schottel», «Steerprop», «Rolls-Royce» и др. [11] – [14].

В качестве наиболее важных требований при выборе движительной системы при проектировании пропульсивного комплекса специалистами [13] – [16], [17] принимается ее соответствие высоким требованиям в отношении надежности эксплуатации и экономичности. Пополнение мирового флота специализированными судами с высоким уровнем энергоемкости и автоматизации обостряет проблему экономических потерь, связанных с неэффективной эксплуатацией и вынужденными незапланированными простоями судна. В этих условиях принятие мер по предотвращению, восстановлению или поддержанию работоспособности движителей при нахождении судна в море основывается на системном анализе выполненных разработок, освещающих развитие конструкций современных движителей, особенностей их проектирования и использования.

Анализ резервов развития традиционных гидродинамических комплексов

Выполненный подобного рода анализ предложений ведущих производителей показывает, что благодаря своей простоте в судостроении по-прежнему находят применение при строительстве новых судов ВФШ (рис. 1). Современные гребные винты этого типа имеют большую степень отработки своей геометрии, которые при ее соответствующей форме прилегающего корпуса по-прежнему обеспечивают высокие значения пропульсивного КПД. Несмотря на это интерес к ним в последние годы несколько снизился в связи с появлением на рынке более эффективных пропульсивных систем, которым в определенном диапазоне водоизмещений морских и речных судов установки с ВФШ уступают по целому ряду показателей [18], [19]. В то же время интерес к ним

сохраняется, когда требуется оптимальная эффективность, надежность и устойчивость в работе. Как правило, это крупнотоннажные суда океанского плавания: контейнеровозы, танкеры, балкеры и сухогрузные суда. Эти суда, как правило, оснащены очень мощными двухтактными двигателями, которые по своим удельным показателям превосходят современные среднеоборотные и высокооборотные двигатели и имеют частоту вращения, оптимальную для рассматриваемого винта. Поэтому основные мероприятия по улучшению этих характеристик проводятся в направлении разработки специальных энергосберегающих устройств, которые позволяют использовать ГД судна с наибольшим эффектом в соответствии с его функциональным назначением.



Рис. 1. Винт фиксированного шага фирмы «Wärtsilä»

Производители ВФШ гарантируют максимальную эффективность и минимальные уровни шума и вибрации для всех типов судов благодаря специально разработанным конструкциями с последующей доводкой технологии обработки с учетом усталостных свойств материала. Дополнительным преимуществом является хорошая ремонтпригодность винтов и технологичность. Они могут быть изготовлены так, чтобы удовлетворить всем предъявляемым жестким требованиям к количеству и размеру лопастей. Кроме того, их изготовители, как правило, кроме проектирования и изготовления винта, берут на себя проектирование, изготовление и поставку полного набора элементов конструкции валопровода: гребного и промежуточных валов, дейдвудного устройства, упорного и опорного подшипников и других элементов [20] – [24].

В настоящее время наибольшее распространение имеют гребные винты с оребренным обтекателем ступицы гребного винта (ГВ) или обтекателем с крыльевыми элементами — ОКЭ (рис. 2) [25] – [27]. Он обеспечивает увеличение эффективности ГВ на 4 – 5 % при увеличении скорости хода судна на 1 – 2 % и частоты вращения ГВ на 1 – 1,5 об/мин при сохранении мощности ГД, снижение вибрации и шума от работы движителя. Простота конструкции ОКЭ позволяет совмещать его установку с модернизационными работами.

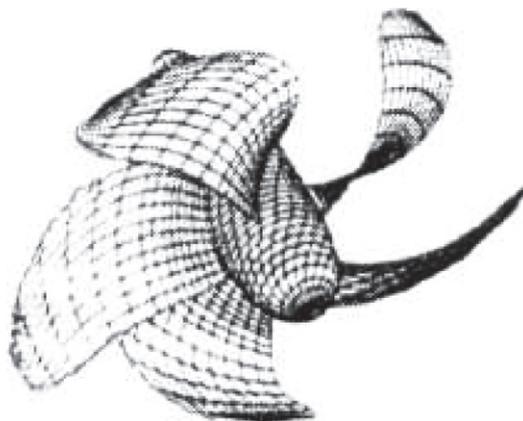


Рис. 2. Гребной винт с обтекателем с крыльевыми элементами

Не менее значимую позицию на рынке пропульсивных систем занимают ВРШ. Гребные винты этого типа обеспечивают отличную производительность и маневренность. Для судов с частыми заходами в порт, ВРШ являются идеальным выбором для пропульсивных комплексов, в сочетании, как со среднеоборотными, так и с малооборотными дизельными двигателями. В установках рассматриваемого типа полная мощность двигателя обеспечивается в тяжелых и легких условиях плавания благодаря автоматической регулировке шага. ВРШ позволяют избежать перегрузки двигателя при любых условиях плавания, позволяют оптимизировать косые углы, чтобы минимизировать шум и вибрацию, а использование в комплексе с этими винтами комбинаторной системы управления позволяет избегать резонансных явлений [17], [28], [29].

Благодаря указанным преимуществам ВРШ хорошо зарекомендовали себя в работе, обеспечивая оптимальное функционирование пропульсивной системы. Они компактны, имеют мало комплектующих компонентов, малый вес, отработанные сильные конструкции ступиц, точное бесступенчатое гидравлическое регулирование шага. Общий вид такого винта, производимого фирмой «Wärtsilä» [30], показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид винта регулируемого шага фирмы «Wärtsilä» в сборе

При выборе типа движителя на раннем этапе проектирования обращают внимание на корпус, который для каждого движителя имеет свои особенности. Для того чтобы достичь максимально возможной общей эффективности судна, винт должен идеально сочетаться с двигателем и корпусом.

Для определенного класса судов совместно с ВФШ и ВРШ их производители предлагают также двигательные системы *винт – насадка*. Насадки и преднасадки [11], [27], [30], установка которых совместно с обводами корпуса судна и компоновкой движителя обеспечивает повышение КПД комплекса ГВ (насадка на 20 – 30 %), имеют меньшую зависимость режима его работы от скорости хода и практически полное использование мощности ГД на всех режимах работы ГВ. Расчетный диаметр гребного винта в насадке уменьшается. Соответственно для одних и тех же судов фирмы предлагают винты в насадке с размерами меньшими, чем производители открытых винтов. Например, фирма «Wärtsilä» предлагает такие гидродинамические системы с винтами диаметром 1000 – 3500 мм. Для ликвидации возможного явления щелевой кавитации на теле насадки и концах лопастей ГВ при скорости выше 18 – 20 уз концы лопастей выносят за пределы насадки в корму, формируя комплекс *ГВ – преднасадка*. Такая конструкция, обеспечивая достаточную эффективность работы двигательного комплекса, исключает появление кавитационной эрозии.

Комплексные двигательные системы с ВФШ для диаметров винта до 3500 мм получили применение на следующих наиболее распространенных типах судов: моторные яхты, принадлежащие государству суда, суда, предназначенных для внутренних водных путей, другие специальные суда с дизельным приводом движения.

Специальные крыльевые системы перед ГВ и за ним, включающие их применение совместно с направляющими насадками [11], [27], представлены на рис. 4. В качестве таких систем применяются как дополнительные устройства и устройства направляющего или спрямляющего аппарата для потока воды, так и различного рода контрпропеллеры и пропульсивные насадки, обеспечивающие выигрыш на тяжелонагруженных судах до 5–9 % или повышающие КПД винта до 10–15 % для одновальных судов. При установке за ГВ гидродинамические стабилизаторы обеспечивают экономию энергии 3–6 %. Однако контрпропеллеры очень чувствительны к режиму работы ГВ и при отклонении его от расчетного могут привести к уменьшению КПД. Эффективность работы ГВ в насадке может быть еще более повышена применением ОКЭ за счет экономии потребляемой мощности на 4–5 % при нагрузке и свободном движении судна на 7–8 %.

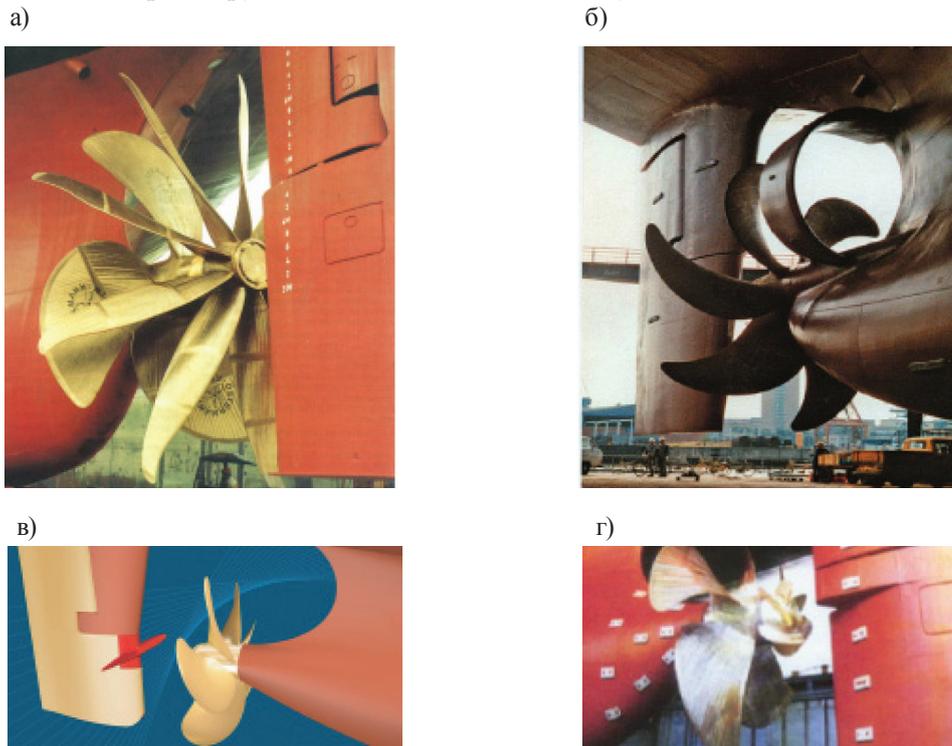


Рис. 4. Современные конструктивные решения для повышения эффективности пропульсивной системы:
а — соосно с винтом крыльчатки; *б* — перед винтом асимметричных насадок;
в — установка специальных крыльчаток; *г* — установка специальных винтов для выравнивания потока

Специализированными фирмами проводятся исследования по совершенствованию конструкции винтов и применению новых материалов. Так установлено, что применение в элементах конструкции ГВ композитных материалов способствует значительному снижению шума (по сравнению с бронзовыми), уменьшению кавитации, снижению веса и увеличению эффективности (КПД) винта, что является полезным и перспективным для движителя. Использование композитных материалов для изготовления лопастей, естественно, приводит к сборности конструкции, применение которой само по себе обеспечивает значительное снижение виброактивности конструкции ГВ по сравнению с цельнолитой конструкцией.

Дополнительным существенным преимуществом композитного материала является снижение электрического и магнитного поля, а также отсутствие коррозионных повреждений лопастей в процессе эксплуатации. Основным недостатком внедрения композитных материалов для ГВ заключается в сложности оптимального подбора материалов при формировании конструкции лопасти, которые обеспечивают точность изготовления ГВ высшего класса, ударостойкость и устойчивость от эрозии, и положительную динамику в организации технологии необходимого производства.

Опыт разработки ГВ для различных типов судов гражданского судостроения позволил выявить основные их геометрические параметры и прочие условия, оказывающие влияние на пропульсивные качества их работы. Основными геометрическими элементами ГВ, которые определяют пропульсивные качества и эффективность работы винтов, являются следующие: число лопастей, дисковое отношение, форма контура лопасти, форма профиля лопасти, шаговое отношение, диаметр ГВ и его ступицы. При этом задача проектирования движителя трактует выбор таких его характеристик, которые наиболее эффективно используют мощность ГД и потребляют минимальную мощность ГД для получения заданной скорости хода или наибольшей тяги. Кроме того, принимается во внимание обеспечение соответствия характеристик ГД (мощности, частоты вращения) работе движителя не только на основном режиме, но и во всем диапазоне изменения сопротивления судна и возможных скоростей хода, состояния корпуса условий плавания (волнения) и т. д. Полный учет особенностей эксплуатации судна приводит к необходимости проектирования движителя, потребляемая мощность и частота вращения которого на некоторых режимах будут отличаться от номинальных характеристик ГД.

Анализ рынка современных пропульсивных систем

В последнее время для повышения эксплуатационных и маневренных характеристик судов широкое распространение нашли так называемые *пропульсивные системы*, которые представляют собой объединение движительного и рулевого комплекса в одном агрегате. Такие пропульсивные системы кроме функций ГВ выполняют роль активных средств управления судном, вплоть до разворота на месте, отличных от пассивных средств рулевого комплекса, не работающих при отсутствии хода судна и в качестве вспомогательных и подруливающих устройств. Иногда их называют винторулевыми колонками (ВРК) [13], [27], [31], [32]. ВРК по типу силового привода гребного винта разделяются на колонки с электрическим и механическим приводом.

В настоящее время накоплен большой мировой опыт применения пропульсивных систем, разнообразных по конструкции и типам применяемых движителей, а также по схеме приводной мощности на вал ГВ, компоновке и типу применяемого ГД. Достаточно широк и диапазон применения ВРК по типам судов. Они устанавливаются на круизных лайнерах, контейнеровозах, танкерах арктического типа, ледоколах, паромах, десантных вертолетоносцах, гидрографических и рыбодобывающих судах, а также судах технического флота, буксирах, плавкранах, вспомогательных плавсредствах и самоходных буровых платформах.

Следует заметить, что производством ВРК за рубежом в основном занимаются крупные многопрофильные компании, у которых собственно ВРК являются лишь одним из видов машиностроительной продукции. Имеется также ряд развивающихся молодых фирм, выпускающих ВРК. Среди них в России объявили о намерении строить ВРК ОАО ЦС «Звездочка» и ОАО «Пролетарский завод» [13]. Филиал ОАО ЦС «Звездочка» — НПО «Винт» — в рамках федеральной целевой программы развития гражданской морской техники разработал и в ближайшем будущем должен приступить к серийному производству аналога колонки «Rolls-Royce» «Aquamaster» ВРК марки ДРК-3500 мощностью 3,5 МВт. ОАО «Пролетарский завод» намерен специализироваться на ВРК с передаваемой мощностью до 1 МВт, ОАО ЦС «Звездочка» — на машинах с передаваемой мощностью в пределах 1 – 10 МВт, а затем и большей. Присущие ВРК особенности можно наглядно рассмотреть на примере винторулевых колонок, широко представленных на мировом рынке: «Azipull», «Contaz», «Aquamaster» и др. [31].

Анализ конструкций и опыта применения электроприводных ВРК

Электроприводные ВРК с электродвигателями, размещенными в гондоле и непосредственно вращающими гребной винт, выпускают фирмы ABB Group (ВРК типа «Азипод» Azimuthing Electric Propulsion Drive) и Schottel (ВРК «Siemens Schottel Propulsor»). На их применении подробно останавливаются авторы работ [9], [33] – [37]. В зарубежных публикациях подобные ГВРК носят название «Азипод» (от Azimuthing Electric Propulsion Drive) [19], [35], [37], [29], [38], [39].

Типовая схема главной винторулевой колонки (ГВРК) с электродвигателем в гондоле представлена на рис. 5. Она используется крупнейшими зарубежными фирмами — «ABB Marine» и «Roll-Royce Oy Ab» [9], [36], [40]. Мощность серийных ГВРК этого типа колеблется в диапазоне 5 – 35 МВт. Они выпускаются в одновинтовой и двухвинтовой компоновке. Фирмы предлагают поставку по специальному заказу ГВРК еще большей мощности. Колонки с электроприводом одного или двух гребных винтов, способные разворачиваться на 360°, обеспечивают движение судов на всех ходовых режимах и в любом направлении, в том числе с разворотом на месте вокруг своей оси. Двухвинтовые ГВРК с электроприводом выпускаются, в частности, компанией «Siemens».

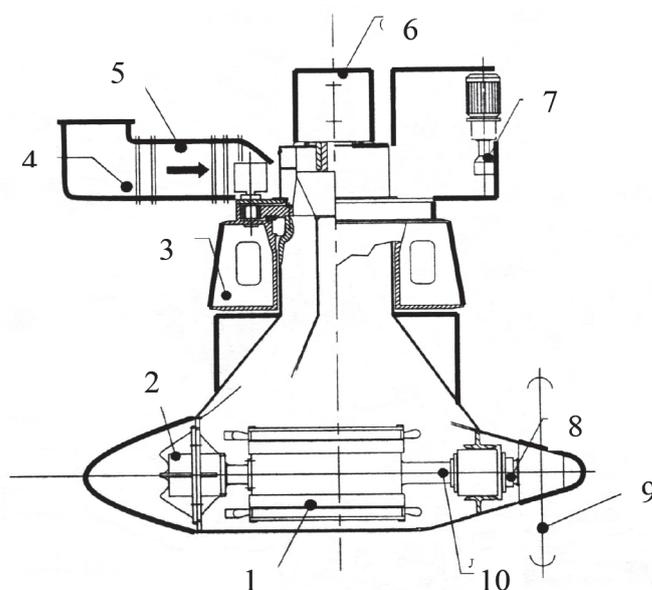


Рис. 5. Типовая схема ГВРК с электродвигателем в гондоле: 1 — электродвигатель; 2 — упорный подшипник; 3 — установочный блок; 4 — вентиляционная установка; 5 — воздухоохладитель; 6 — токосъемник; 7 — гидравлическая система поворота колонки; 8 — подшипник и уплотнения гребного вала; 9 — винт фиксированного шага; 10 — гребной вал

Однако чаще чем двухвинтовая схема «Азипод», применяется компоновка, когда на поворотной колонке установлен только кормовой винт. При этом носовой винт имеет традиционное расположение и приводится во вращение гребным валом. Особенностью такой схемы является возможность обеспечения противоположного направления вращения гребных винтов, что способствует улучшению эффективности пропульсивного комплекса.

Винторулевые колонки «Azipull» зарекомендовали себя в качестве очень эффективных движительных комплексов, подходящих для судов мощностью от 900 – 5 000 кВт. Винторулевая колонка «Azipull» комбинирует преимущества гребного винта с гибкостью механического двигателя и может быть связана с любым первичным двигателем: дизелем, газовой турбиной или электродвигателем. Такая разработка выполнена, чтобы предложить эффективный упор и маневренность на более высоких (обычно 20 – 25 уз) скоростях. Обтекаемая колонка и закрылки возвращают энергию закручивания из зоны пониженного давления потока, повышая эффективность движения. У колонки имеется широкая хорда, что оптимизирует и улучшает управляемость и обеспечивает стабильность курса. «Azipod» может поставляться с винтами, как регулируемого, так и фиксированного шага [38], [41] – [47].

Пропульсивная система компании «Azipod» с погружным электродвигателем представляет собой движительно-двигательный комплекс с погружным электродвигателем и регулировкой частоты вращения от 0 до номинальных, который обеспечивает мощность до 14 мВт (рис. 6). Общее расположение при использовании системы может быть оптимизировано. Применяется на судах разного водоизмещения: от круизных до судов технического и исследовательского флота и ледо-

колов. Высокая маневренность обеспечивается поворотом колонки на 180° . Колонка также позволяет экономить место установки, обеспечивает хорошую маневренность и стабильность курса, может быть соединен фактически с любым первичным двигателем, имеет уменьшенный диаметр винтов, низкий шум и вибрация [48] – [51].

В отличие от обычных рулей, ГВРК обеспечивают хорошую управляемость на заднем ходу. Это особенно важно на судах двойного действия DAS (double action ship), под которыми понимаются суда ледового плавания (танкеры, навалочники), движущиеся в ледовых условиях задним ходом. При движении кормой вперед ГВРК, работая как носовой движитель, снижает ледовое сопротивление, повышает ледопробиваемость и эффективность судна в эксплуатации.

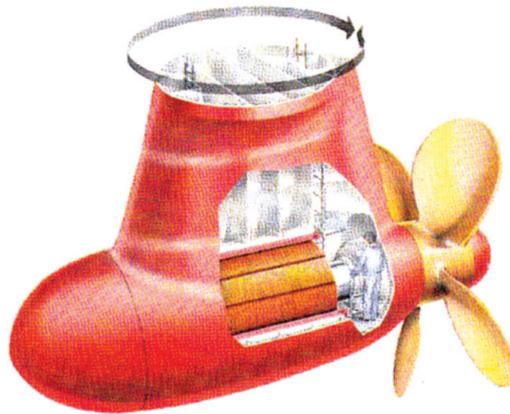


Рис. 6. Пропульсивная система фирмы «Azipod» с погружным электродвигателем

По оценкам компании «ABB Marine», применение ГВРК обеспечивает снижение эксплуатационных затрат до 8 %, причем более высокие показатели относятся к судам большего водоизмещения [9], [34], [36]. Наряду со стандартной конструкцией «Azipod» компанией «Roll-Royce OY Ab» применяются компоновки типа «компакт», предназначенные для относительно небольших судов с ограниченной осадкой и яхт.

Большой объем работ по исследованию гидродинамических характеристик ГВРК, одной из целей которых является выбор оптимальной компоновки, выполнен в Крыловском государственном научном центре [13], [20], [27].

Анализ конструкций и опыта применения ВРК с механическим приводом

Крупнейшими производителями ВРК (ВРК «Aquamaster» по названию первой фирмы-производителя с механическим приводом и угловой зубчатой передачей, так называемые «Z-peller», «Z-drive» и «L-drive», являются фирмы «Steerprop Ltd», «Schottel Gmbh», «Rolls-Royce», «Wartsila», «Niigata» [13], [30], [40]. Максимальная мощность ГВРК такого типа составляет 10 МВт. Компании выпускают ряд типоразмеров ГВРК, включающий ГВРК с одиночными и соосными винтами противоположного вращения и гребными винтами в направляющих насадках.

Принципиальная схема ГВРК с механической передачей мощности на винт приведена на рис. 7. Обычно мощность размещенного в корпусе судна двигателя передается от ведущего вала с помощью одноступенчатого редуктора, сформированного из пары зубчатых колес, на промежуточный вертикальный вал. На нижнем конце этого вала смонтирован понижающий конический редуктор с передаточным отношением, находящимся в пределах $1:3,3 - 1:6,1$. Редуктор соединяет промежуточный вал с гребным валом.

В верхней части ГВРК установлена разобщительная муфта, соединяющая ведущий и вертикальный вал. При включении этой муфты начинается вращение гребного вала. Вертикальный и гребной вал находятся внутри корпуса стойки и гондолы, заполненной смазочным маслом. Гондола служит охладителем масла.

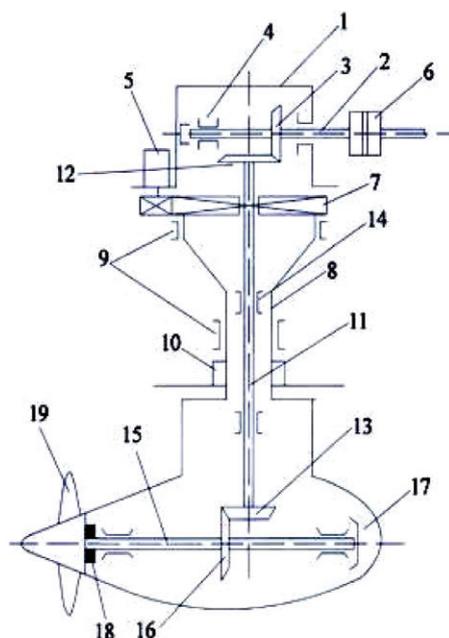


Рис. 7. Принципиальная схема ГВРК с механической передачей мощности на винт:
 1 — сварной корпус; 2 — ведущий вал; 3 — ведущая угловая шестерня;
 4 — радиально-упорные подшипники вала; 5 — гидравлический привод поворота кольца;
 6 — разобщительная муфта; 7 — зубчатое колесо румпельного механизма;
 8 — труба (стойка) колонки; 9 — подшипники, обеспечивающие поворот трубы;
 10 — уплотнение входа трубы в корпус; 11 — промежуточный вертикальный вал;
 12 — верхняя угловая ведомая шестерня; 13 — нижняя ведущая угловая шестерня;
 14 — подшипники вертикального вала; 15 — гребной вал;
 16 — нижняя ведомая угловая шестерня; 17 — радиально-упорные подшипники гребного вала;
 18 — уплотнение гребного вала; 19 — гребной винт

В отличие от установок «Azipod», двигатель ГВРК этого типа (дизель или электродвигатель) расположен внутри корпуса судна и передача мощности на гребной винт осуществляется с помощью углового редуктора. Системы «Aquamaster» выпускаются как в стационарном исполнении, так и в исполнении, предусматривающем частичную уборку нижней части в корпус путем втягивания либо заваливания в специальный кожух. Ряд типоразмеров, выпускаемых компанией, предусматривает мощность до 3 МВт при различных диаметрах винтов в зависимости от номинальных оборотов. При минимальных номинальных оборотах диаметр достигает 5 м. В обобщенном виде основные характеристики ВРК с механическим приводом и угловой зубчатой передачей приведены в табл. 1 [13].

Таблица 1

Основные характеристики винторулевых колонок

Мощность ВРК, МВт	Упор гребного винта, кН	Диаметр гребного вала, мм	Диаметр гребного винта, мм	Производитель ВРК	Габарит осевой и вертикальный, м	Масса ВРК, т
1,0 – 1,5 (ВФШ с насадкой или без)	10	200	2100	«Schottel», «Rolls-Royce»	5 × 7	17 – 19
4,0 – 5,5 (ВФШ без насадки)	40 – 50	340	4500	«Schottel», «Rolls-Royce»	5,5 × 8	90 – 110
7,5 – 8,5 (ВФШ без насадки)	80 – 90	500	5600	«Steerprop»	6 × 9	140 – 160
3,5 – 4,5 (ВРШ в насадке)	40	460	4200	«Ulstein»	5 × 8	95 – 105

Вертикальный габарит ВРК зависит от наличия или отсутствия двойного дна у судна. Размерность ВРК по ширине примерно соответствует диаметру гребного винта. Поставка ВРК предлагается со всеми системами и трансмиссией от первичного двигателя либо по желанию заказчика с первичным двигателем-дизелем или электродвигателем соответствующей мощности. Также обеспечивается шефмонтаж поставленной продукции.

ВРК «Aquamaster» (рис. 8) с ВФШ в насадке мощностью до 24000 кВт обеспечивают высокую экономичность режимов работы, компактный монтаж и простое техническое обслуживание. Колонки могут использовать полную мощность при маневрировании с управлением на 360° и позиционировании, могут применяться на всех типах судов в тропических и арктических условиях, а также могут служить альтернативой для использования ВРШ [9], [13], [27].

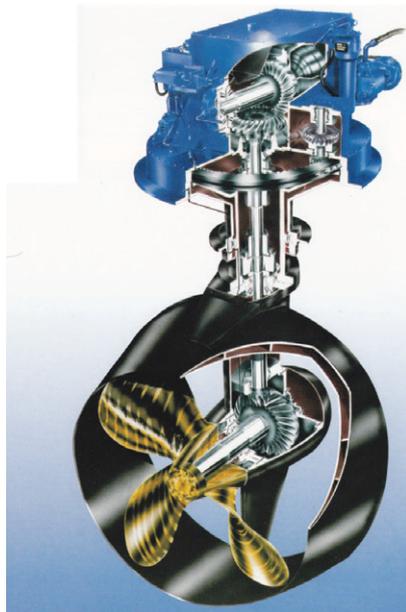


Рис. 8. Винторулевые колонки фирмы «Aquamaster» с одним винтом фиксированного шага

ВРК фирмы «Aquamaster» с винтами противоположного вращения представлена на рис. 9. Пропульсивная система хорошо зарекомендовала себя в установках мощностью до 10000 кВт, где она достигает эффекта благодаря модульному проектированию и легкости монтажа, а также благодаря увеличению КПД до 15 % за счет установки винтов с контрвращением. Колонка обеспечивает высокие пропульсивные качества, улучшенную устойчивость на курсе, уменьшение шума и вибрации. Увеличенная стоимость ВРК быстро окупается за счет экономии топлива при эксплуатации. Такая колонка имеет идеальное применение на судах с ограничением диаметра ГВ [27], [52].



Рис. 9. Винторулевые колонки фирмы «Aquamaster» с винтами противоположного вращения

На ГВРК типа «Aquamaster», в отличие от ГВРК «Azipod», двигатель непосредственно не связан с гребным винтом, а передача мощности осуществляется через две прямоугольные угловые передачи (или так называемую Z-образную передачу) [13], [27], [42], [43]. Кроме этой передачи в состав такой ГВРК входят разобщительная муфта и механизм разворота колонки на 360°. Основная область применения ГВРК типа «Aquamaster» — буксиры, суда обслуживания технических средств освоения океана, а также паромы. Колонки «Aquamaster» могут также включаться в системы позиционирования. В настоящее время в классе Российского морского регистра судоходства (РМРС) эксплуатируется более 90 судов, оборудованных установками типа «Aquamaster», причем в их числе находятся суда ледового плавания.

ВРК «Contaz» представляют собой винторулевые колонки с винтами противоположного вращения и специально предназначены для торговых судов. Они обладают повышенным КПД, приблизительно на 10 – 15 % больше по сравнению с обычными винторулевыми колонками «Azimuth» за счет возврата некоторых из потерь в потоке. ВРК «Contaz» также обеспечивают низкий шум и вибрацию, хорошую маневренность на малых скоростях, характеризуются меньшими диаметрами винтов (на 20 % меньше, чем в традиционном пропульсивном комплексе), а также экономят место установки.

Значительных успехов в развитии модельного ряда азимутальных винторулевых колонок достигла компания «Steerprop». Диапазон мощностей колонок, изготавливаемых этой компанией, составляет от 500 до 6500 кВт. Колонки более высокой мощности изготавливаются по специальному заказу в соответствии с особыми требованиями проекта. Диапазон мощностей «Steerprop» оптимизирован в соответствии с требованиями рынка и подходит для использования на различных судах, в том числе на ледоколах арктического применения [13]. Одним из основных преимуществ ГВРК компании «Steerprop» является возможность проведения ремонта колонок без постановки судна в док.

ВРК «Steerprop» оснащены современной системой управления, регулируемой при помощи частотного преобразователя и включающей электрические или гидравлические приводы. Использование электродвигателей связано со следующими преимуществами: постоянная скорость управления, меньшая потребляемая мощность, меньшие потери мощности (выше КПД), меньшее количество конвекционного тепла (требуется меньше охлаждения), меньше трубопроводов, меньше шума, меньше обслуживания. Рулевая колонка уплотнена с использованием трехслойного манжетного уплотнения с вкладышами из нержавеющей стали для минимизации износа. Наиболее удаленная прокладка повернута вниз, чтобы сократить до минимума сбор загрязнений, изнашивающих прокладку. Тройная уплотняющая прокладка позволяет использовать устройство для промывки уплотняющей камеры в прокладках вала гребного винта. Вал гребного винта уплотнен с использованием тройного или четвертного кольцеобразного уплотнения. Пространство между уплотнениями заполняется уплотнительной жидкостью, находящейся под давлением по отношению к морской воде или смазочному маслу. Давление создается при помощи расширительного или герметичного бака. Уплотняющую жидкость можно контролировать визуально и спускать при необходимости.

Компания «Steerprop» использует высокоэффективные насадки собственной конструкции — ННЗ. Насадка спроектирована для увеличения тяги на 8 – 10 %, а также для увеличения максимального КПД на 10 – 15 % по сравнению со стандартными насадками. Винт находится в диффузорной части насадки и сдвинут дальше в корму, что позволяет установить насадку вплотную к поворотной оси колонки, а значит, минимизировать крутящий момент при управлении. Движители «Steerprop» оснащены мультидисковой муфтой с устройством проскальзывания. Дополнительно это устройство может также использоваться при электронном управлении и усиленном охлаждении, чтобы обеспечить управление скоростью винта от нуля до холостого хода движителя. Все соединения в механической передаче представляют собой либо конические, либо цилиндрические соединения посадки с запрессовкой. Отсутствуют шпоночные канавки, ухудшающие целостность вала, также нет шпонок, которые могут изнашиваться и ломаться.

Инженерам-конструкторам компании «Steerprop» удалось минимизировать количество деталей при создании винторулевых колонок. Эта компактная, простая и надежная конструкция делает техническое обслуживание более легким и требует меньше запасных частей.

Кроме того, в конструкции ВРК «Steerprop» используется принцип интегрированной безопасности как в корпусе, так и в механической передаче. Он включает в себя принцип последовательной прочности, при котором самые слабые детали либо дешевы, либо легко заменяемы, что важно в случае повреждения. В механической передаче самый слабый компонент — это лопасть винта, которая таким образом защищает ценные и труднодоступные части передачи. Что касается общей прочности конструкции корпуса, то тут внимание уделяется также безопасности: скрепленный болтами фланец в шахте рулевой колонки над винтом сконструирован так, чтобы в случае неожиданного удара при посадке на мель произошел контролируемый перелом.

ВРК фирмы «Schottel» (рис. 10) с ВРШ выпускаются для установок с входной мощностью от 150 кВт (Shottel SRP 0320) до 6500 кВт (Steerprop SP 80) [13], [27], [53]. Колонки данного типа бывают с винтами фиксированного и регулируемого шага. В комплектации с ВФШ они установлены на некоторых танкерах компании «Лукойл», однако диапазон мощностей на этом не заканчивается, так как фирмы могут изготовить практически любую винторулевую колонку по желанию заказчика. Этот тип ВРК может быть установлен непосредственно в корпусе или в контейнере. Контейнер может быть или подъемного, или выдвигающегося типа. По аналогии с колонками других производителей ВРК фирмы «Schottel» позволяют экономить место установки, обеспечивают хорошее управление на 360° и позиционирование, уменьшение шума и вибрации, имеют относительно уменьшенный диаметр винтов, что позволяет применять их на судах всех типов. Использование в ВРК винта регулируемого шага позволяет использовать неререверсивные ГД. Повышение экономичности пропульсивного комплекса обеспечивает их быструю окупаемость за счет экономии топлива.

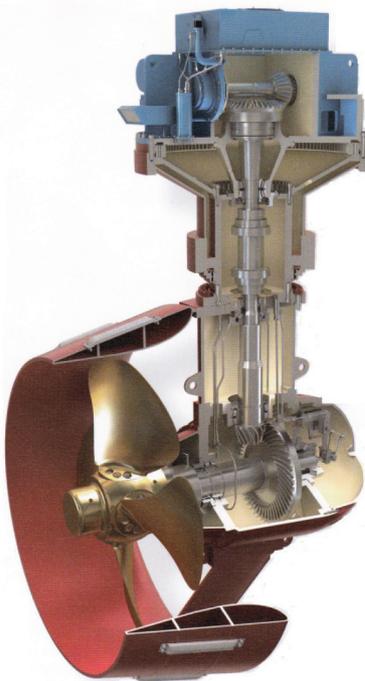


Рис. 10. Винторулевая колонка фирмы «Schottel» с ВРШ

Выполненный анализ показывает, что общей причиной широкого применению ВРК является целый ряд преимуществ ВРК перед традиционными движительными комплексами. Они обеспечивают высокий пропульсивный КПД, низкую виброактивность, упрощение компоновки и монтажа механической установки за счет отказа от длинного валопровода, позволяют значительно сократить размеры машинного отделения, в результате чего при одной и той же длине судна гру-

зовое пространство возрастает на 2 – 8 %. Кроме того, сборка колонок полностью (механические) или частично (электрические) может быть выполнена в береговых условиях на заводе или верфи, в результате чего монтаж, демонтаж и ремонт ВРК можно выполнять в более сжатые сроки, так как ВРК представляет собой сборочно-монтажную единицу. ВРК является более функциональным, чем в обычных движительных системах: улучшены маневренные качества судна, возможен реверс за счет разворота колонок без изменения направления вращения гребных валов, а в определенных случаях — движение судна лагом. Имеются и сугубо специфические предпосылки к преимущественному применению ВРК. Так, например, для крупных круизных судов это улучшение комфорта пассажиров благодаря устранению низкочастотной вибрации от главных двигателей, для судов ледового плавания — повышенная ледопроемкость, для паромов и буксиров — высокая маневренность, для вспомогательных плавсредств и самоходных буровых платформ — удобство при эпизодичности использования [13].

Обобщение опыта проектирования, монтажа и технической эксплуатации ВРК

Особенностью проектирования ПК судна с модульной пропульсивной системой является необходимость приспособления обводов корпуса, с помощью которых обеспечиваются максимально оптимизированные условия работы комплекса для достижения требуемого эффекта. Большие преимущества дают пропульсивным системам агрегатность их изготовления вплоть до поставки к ним систем управления, что является экономически целесообразным. Важным является также то обстоятельство, что ВРК применяются в паре с главными высокооборотными четырехтактными дизелями или электродвигателями с частотой вращения 1000 – 1500 об/мин и более, что позволяет исключить передачу и существенно уменьшить размеры машинного отделения. Указанная особенность предопределила границу широкого использования ВРК с двигателями мощностью до 4300 кВт [13]. Это примерно соответствует верхней границе мощностей имеющихся на рынке высокооборотных дизелей и нижней границе мощностей двухтактных дизелей, с которыми эффективнее оказывается классическая схема ПК. Соответственно ВРК получили наиболее широкое использование на судах, требующих высокой маневренности, паромах, буксирах, речных судах, на которых практически всегда используются четырехтактные дизели с вышеуказанной частотой вращения.

Кроме очевидного преимущества применения ГВРК на транспортных судах, в процессе их эксплуатации определился и круг недостатков [18], [19], [21], [22], к которым необходимо отнести следующие:

- повышенную конструктивную и технологическую сложность их изготовления и технического обслуживания;
- ограничение агрегатной мощности по сравнению с традиционными пропульсивными комплексами;
- тяжелые условия работы гребных электродвигателей и угловых редукторов и т. д.

В качестве иллюстрации последнего утверждения можно привести примеры характерного повреждения ВРК, зависящего как от их конструкции, так и от условий эксплуатации. Для ГВРК с механической передачей мощности на гребной винт, кроме повреждений лопастей винтов, можно выделить повреждения в зубчатых зацеплениях редукторов, которые работают в очень напряженных условиях эксплуатации, особенно в компьютеризованных системах динамического позиционирования, при резких изменениях нагрузки или при воздействии на лопасти винта льдин или других массивных и твердых объектов. Так, например, при ремонте и обслуживании шести ВРК системы динамического позиционирования японского бурового судна «Chiku» с винтами диаметром 3,8 м в 2008 г. после почти трех лет эксплуатации были обнаружены выкрашивание и растрескивание зубьев нескольких редукторов.

Характер повреждений был тщательно проанализирован и было выявлено следующее:

- зубья малой шестерни вертикального вала, контактируя с зубчатым колесом гребного вала, могли вызвать растрескивание его зубьев;

– недостаточный запас прочности по внутренним касательным напряжениям или наличие посторонних включений в металле зубьев редуктора могли привести к их растрескиванию.

В качестве причин рассмотренных повреждений в результате исследований отмечаются конструктивные, технологические, материаловедческие и монтажные. Для предотвращения подобных повреждений было рекомендовано обратить внимание на необходимость более тщательной конструктивной проработки и в особенности на технологию изготовления и монтажа зубчатых зацеплений. В частности, было рекомендовано доработать форму и скруглить углы зубьев малой шестерни во избежание контакта с колесом редуктора, повысить точность сборки и отладки редуктора, доработать конструкцию для уменьшения касательных напряжений в редукторе и увеличения запасов прочности, предложить методы увеличения глубины цементации, повысить качество материала редуктора во избежание посторонних включений. Следует отметить, что оперативным решением проблемы стала замена на новые всех шести редукторов бурового судна «Chikyū».

На основании выполненного анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом совершенствования пропульсивных качеств движительных систем является совмещение различных конструктивных и гидромеханических решений с оптимальными для проектируемого судна показателями.

В связи с наличием на рынке большого количества технических решений по привязке винтов к главному двигателю сформировались вполне определенные предпочтения. Классические винты фиксированного и регулируемого шага в комплексе с классическим валопроводом практически находятся вне конкуренции в мощностном диапазоне от 4300 кВт и выше, характерном для нижней границы применения двухтактных высокоэкономичных двигателей. Ниже указанного предела ВФШ и ВРШ конкурируют с ВРК, часто уступая им в эффективности по целому комплексу показателей: массогабаритным, шуму и вибрации, простоте компоновки, монтажа, демонтажа и ремонта. ВРК при одинаковых диаметрах винтов обеспечивают более высокую эффективность пропульсивного комплекса и его высокую маневренность.

Выводы и рекомендации

по дальнейшему совершенствованию движительных систем

Дальнейшее совершенствование движителей идет путем совершенствования пропульсивных качеств движительных систем. Оно достигается, как правило, совмещением различных конструктивных и гидромеханических решений в едином комплексе. Одним из предложений по повышению эффективности движительной системы является предложение о разработке вариантов двигательного-движительного комплекса, совмещающего в себе погружной электродвигатель и ГВ [13], [27], [32]. Статор такой системы расположен в насадке и является конструктивной основой всего устройства. Диапазон мощностей комплекса гребной электродвигатель в насадке (ГЭДН) не ограничивается. Особенности ГЭДН, которые определяют его преимущества по сравнению с традиционной схемой электродвижения и приводом ГВ непосредственно от ГД являются: сравнительно малый вес и габариты, независимость положения ГЭДН по отношению к источнику электрического тока, возможность размещения в любой части судна или создание выдвижных устройств (отсутствие гребного вала, проходящего через корпус), не требующая охлаждающей системы, возможность использования соосных ГВ, возможность достижения низких уровней вибрации и шума в помещениях судна, хорошая ремонтпригодность и простота обслуживания.

Некоторыми из приведенных преимуществ обладает наиболее близкая к ГЭДН пропульсивная система «Azipod» или «Shottel & Simens», но большинство достоинств являются уникальными. По первичным оценкам эффект использования ГЭДН может заключаться в следующем: снижение массы оборудования и объемов, занимаемых средствами электродвижения на 20 – 40 %, увеличение пропульсивных характеристик судна на 15 – 20 %, снижение уровней шума в помещениях судна и в окружающей воде.

В процессе проектирования судна основные принципиальные критерии, определяющие выбор типа движителя или пропульсивной системы, должны обеспечивать следующее:

- максимальную эффективность использования движителя для функционального назначения судна на установившихся и переменных режимах работы при оптимальном размещении ГД;
- высокую степень гидродинамической отработки геометрических параметров движителя для достижения необходимых пропульсивных характеристик с учетом взаимодействия его с корпусом;
- простоту конструкции движителя и надежность его эксплуатации, уровень технологичности производства с учетом стоимости материала и комплектующих, ремонтпригодность;
- возможную эффективность совместной работы движителя с комплектом пассивных и активных средств управления;
- конструктивную простоту и надежность управления работой движителя и связанных с ним устройств и систем (валопровода, ГУП, механизма поворота лопастей и т.д.) во всем диапазоне режимов;
- быстроту окупаемости первичных затрат на производство движительного комплекса в период эксплуатации судна.

Главенствующими из всех задач разработки движителя являются условия конкретного проектирования для выбора его геометрических характеристик с одновременной отработкой обводов прилегающего корпуса с выступающими частями, поскольку ГВ и корпус представляют собой единую движительную систему [15].

Существует два подхода при выборе и проектировании движительного комплекса: проектирование движителя с учетом его приспособления к сформированному корпусу или выбор модульной пропульсивной системы, требующей отработки обводов корпуса в районах установки системы из условия обеспечения эффективной ее работы, а также оптимизации пропульсивных и маневренных характеристик.

Пути дальнейшего повышения эффективности движителей должны быть направлены на поиск новых конструктивных решений на основе анализа гидродинамических процессов, сопровождающих работу движителя. Значительную роль в этом может оказать использование в конструкции движителей или их элементов новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приложение 6 к МАРПОЛ 73/78 (пересмотренное). — Российский морской регистр судоходства, 2011. — 52 с.
2. Брук М. А. Режимы работы судовых дизелей / М. А. Брук. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 482 с.
3. Ржепецкий К. Л. Дизель в судовом пропульсивном комплексе / К. Л. Ржепецкий, А. А. Рихтер. — Л.: Судостроение, 1978. — 253 с.
4. Голубев Н. В. Проектирование энергетических установок морских судов / Н. В. Голубев. — Л.: Судостроение, 1980. — 311 с.
5. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 222 с.
6. Кулибанов Ю. М. Экономичные режимы работы судовых энергетических установок / Ю. М. Кулибанов, П. А. Малый, В. В. Сахаров. — М.: Транспорт, 1987. — 208 с.
7. Камкин С. В. Эксплуатация судовых дизелей / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1990. — 343 с.
8. Румб В. К. Судовые энергетические установки. Ч. I. Судовые дизельные энергетические установки / В. К. Румб, Г. В. Яковлев, Г. И. Шаров [и др.]. — СПб.: МГТУ, 2006. — 588 с.
9. Артюшков Л. С. Судовые движители: учебник для вузов / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. — Л.: Судостроение, 1988. — 296 с.
10. Артемонов Г. А. Судовые энергетические установки / Г. А. Артемонов, В. П. Волошин, Ю. В. Захаров, А. Я. Шквар. — Л.: Судостроение, 1988. — 313 с.
11. Иванченко А. А. Охрана воздушного бассейна при проектировании и эксплуатации судовых энергетических установок: монография / А. А. Иванченко, А. А. Иванченко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 327 с.

12. *Егоров Г. В.* Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река-море» плавания / Г. В. Егоров // Судостроение. — 2004. — № 6. — С. 10–16.
13. *Стешенков А. Л.* Перспектива развития отечественного рынка винторулевых колонок / А. Л. Стешенков // Судостроение. — 2014. — № 4. — С. 54–55.
14. *Даниловский А. Г.* Оптимизация судового пропульсивного комплекса: монография / А. Г. Даниловский, М. А. Орлов, И. А. Боровикова. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2007. — 175 с.
15. *Китаев М. В.* Некоторые аспекты проектирования движительных комплексов судов с несколькими режимами движения / М. В. Китаев, С. В. Антоненко // Мореходство и морские науки-2008: избранные доклады Первой Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф. / под ред. В. Н. Храмушина. — Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. — С. 52–62.
16. *Китаев М. В.* Общие положения и подход к решению задачи выбора пропульсивного комплекса для судов с несколькими режимами движения / М. В. Китаев, С. В. Антоненко // Материалы VII Международной науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока», Академия транспорта РФ. — Владивосток, 2007. — С. 12–14.
17. *Wilkman G.* Experience of Azipod Vessels in Ice / G. Wilkman, M. Arpiainen, M. Niini, T. Mattsson, F. Bercha, S. Bercha // Proceedings of the 7th International Conference on Performance of Ships and Structures in Ice. — ICETECH06-134-RF, 2006.
18. *Башуров Б. П.* Контроль вибрации винторулевых колонок морских судов / Б. П. Башуров, И. Н. Николаев, М. В. Гриценко, А. В. Брежнев // Судостроение. — 2011. — № 5. — С. 36–38.
19. *Николаев Н. И.* Винторулевые колонки современных морских буксиров / Н. И. Николаев, А. В. Брежнев, М. В. Гриценко // Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта: материалы четвертой региональной науч.-техн. конф. — Новоросийск: Морская государственная академия им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2005. — С. 172–174.
20. *Пашин В. М.* Оптимизация судов / В. М. Пашин. — Л.: Судостроение, 1984. — 296 с.
21. *Николаев Н. И.* Контроль вибрации винторулевых колонок речных и морских судов / Н. И. Николаев, А. В. Брежнев, И. Н. Николаев, М. В. Гриценко // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 1 (37). — С. 78–80.
22. *Решетов Н. А.* Обеспечение безопасности главных винторулевых колонок в нормативной и надзорной деятельности Регистра / Н. А. Решетов // Судостроение. — 2002. — № 1. — С. 12–17.
23. *Иванченко А. А.* Выбросы парниковых газов как индикатор энергоэффективности судна / А. А. Иванченко, А. П. Петров, В. Н. Окунев // Тр. МНТК «Водный транспорт России: Инновационный путь развития», 6–7 октября 2010 г. Т. 2. — СПб.: СПГУВК, 2011. — С. 369–374.
24. Временное Руководство по добровольному подтверждению конструктивного индекса энергетической эффективности. МЕРС.1/Circ.682. — 2009.
25. ZF Marine Krimpens b.v. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hrp.nl/> (дата обращения – 20.06.16).
26. АВВ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://new.abb.com/> (дата обращения – 20.06.16).
27. *Векслер В. Я.* Поиск путей совершенствования конструкции движителей и пропульсивных систем боевых кораблей и судов / В. Я. Векслер // Материалы 3-й международной конференции по морским интеллектуальным технологиям. Моринтех. — СПб., 1999. — С. 31–38.
28. *Даниловский А. Г.* Автоматизированное проектирование судовых энергетических установок: учебное пособие / А. Г. Даниловский. — СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2006. — 206 с.
29. *Kim S.-E.* Model Tests on Propulsion Systems for Ultra Large Container Vessel / S.-E. Kim, S.-H. Choi, T. Veikonheimo // The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.
30. Wärtsilä [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.Wartsila.com> (дата обращения — 20.06.16).
31. Excellence in propulsion: news from the Kamewa Group. — Kristinehamn: Kamewa Group, 1997 – 1998. — No. 1 – no. 4. — 25 p.
32. Demonstration and spin-off the Integral Motor Propeller Propulsion System // Proceedings, 1994, Technical Innovation Symposium, 7 – 9 September. — 1994. — Pp. 109–124.
33. *Pustoshny A. V.* Azipod propeller blade cavitation observations during ship manoeuvring / A. V. Pustoshny, S. V. Kaprantsev // 4th Int. Symposium on Cavitation (CAV'2001), Pasadena, USA. — 2001. — Pp. 1–8.

34. *Ghassemi H.* Comparison of hydrodynamic characteristics on two ship propulsors (PRS And Azipod) / H. Ghassemi, M. Iranmanesh // *Iranian Journal of Science and Technology*. — 2008. — Vol. 32. — No. B4. — Pp. 401–413.
35. *Strand J. P.* Compact azipod propulsion on DP supply vessels / J. P. Strand, T. Lauvdal, A. K. Ådnanes, A. AS // DP Conference, Houston, TX. — 2001. — Pp. 1–8.
36. *Tiainen L.* Simplifying Energy Efficiency [Электронный ресурс] / L. Tiainen, T. Jehkonen, J. F. Hansen. — Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/196daded74689feac1257a8a003ca642/ABB%20Generations_27%20Simplifying%20energy%20efficiency.pdf (дата обращения – 20.06.16).
37. *Nowicki J.* Stopping of Ships Equipped with Azipods / J. Nowicki // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2014. — Vol. 8. — nr 3. — Pp. 373–376. DOI: 10.12716/1001.08.03.07.
38. *Hanninen S.* Development of Azipod Propulsion for High Power Arctic Offshore Vessels / S. Hanninen, T. Heideman, E. Tenhunen // OTC Arctic Technology Conference, 3-5 December, Houston, Texas, USA. — Offshore Technology Conference, 2012. DOI: 10.4043/23775-MS.
39. *Andryushin A. V.* “Azipod” Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions / A. V. Andryushin, S. Hanninen, T. Heideman // *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. — Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013.
40. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rolls-royce.com> (дата обращения – 20.06.16).
41. *Ghassemi H.* Computational hydrodynamic analysis of the propeller–rudder and the AZIPOD systems / H. Ghassemi, P. Ghadimi // *Ocean Engineering*. — 2008. — Vol. 35. — Is. 1. — Pp. 117–130. DOI:10.1016/j.oceaneng.2007.07.008.
42. *Frongillo D. L.* Propulsion solutions for the cruise industry: A comparison between conventional shaftline propulsion and Azipod® propulsion: Master thesis / D. L. Frongillo. — Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011. — 36 p.
43. *Bolvashenkov I.* Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas / I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, A. Rubinraut, V. V. Romanovskiy // *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014 Ninth International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.
44. *Pereira N. N.* A Diagnostic of Diesel-Electric Propulsion for Ships / N. N. Pereira // *Ship Science & Technology*. — 2007. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–42.
45. *Kateliava E.* Measures for improvement of energy efficiency of ships / E. Kateliava // *Journal of Marine Technology & Environment*. — 2012. — Vol. 1. — Pp. 59–66.
46. *Juurmaa K.* The development of the double acting tanker for ice operation / K. Juurmaa, T. Mattsson, N. Sasaki, G. Wilkman // *Proceedings of the 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*. — 2002. — C. 24–28.
47. *Bolvashenkov I.* Possible Ways to Improve the Efficiency and Competitiveness of Modern Ships with Electric Propulsion Systems / I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, A. Rubinraut, V. V. Romanovskiy // 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). — IEEE, 2014. — C. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.
48. *Baniela S. I., Varela P. L., Rodríguez E. M.* Concept and operation mode of the advanced electronic control system of the azimuth propellers in tugs / S. I. Baniela, P. L. Varela, E. M. Rodríguez // *Journal of Maritime Research*. — 2005. — Vol. 2. — No. 3. — Pp. 3–20.
49. *Keinonen A.* Azimuth and multi purpose icebreaker technology for arctic and non-arctic offshore / A. Keinonen, P. Lohi // *The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.
50. *Dordea S.* Electric drives for azimuth propulsors / S. Dordea, E. Zburlea // *Analele Universitatii Maritime Constanta*. — 2011. — Vol. 11. — Is. 14. — Pp. 177–184.
51. *Ye G.* Application of Azipod Electrical Propulsion System [J] / G. Ye, L. Shen // *Shanghai Shipbuilding*. — 2007. — Vol. 1. — Pp. 19–21.
52. *Яковлев А. Ю.* Метод расчета и исследование движителей с гребными винтами противоположного вращения / А. Ю. Яковлев // *Судостроение*. — 2008. — № 2. — С. 32–35.
53. SCHOTTEL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.Schottel.de> (дата обращения – 20.06.16).

REVIEW OF EXPERIENCE IMPROVEMENT DESIGNS AND PROPULSION SYSTEMS IN MODERN SHIPBUILDING

This article gives an analysis of the prerequisites for improving the design of modern propulsive complexes ships reserves of traditional design concepts, designs and experience of steering columns with electrical and mechanical drive, performed a generalization of experience in designing, installation and technical operation. It is shown that the improvement in the complex hydrodynamic vessel lie considerable reserves to enhance its energy efficiency. The attention that the traditional propulsion system engine-transmission-shafting-propulsor with fixed and controllable pitch propellers, having undergone improvements, store-by its position mainly on large-capacity ocean-going ships with the main two-stroke engines, where their efficiency It remains high. A review of the market used in the domestic and foreign shipbuilding companies RMC ABB Marine, Roll-Royce OY Ab, Schottel, Steerprop et al. Formulated conclusions and recommendations for further improvement of propulsion systems.

Keywords: ship power plants (SPP), the propulsion system, propeller, controllable pitch propeller (CPP), fixed pitch propeller (FPP), azimuth column.

REFERENCES

1. Prilozhenie 6 k MARPOL 73/78. Morskoj registr sudohodstva, 2011.
2. Bruk, M. A. *Rezhimy raboty sudovyh dizelej*. L.: Sudpromgiz, 1963.
3. Rzhhepeckij, K. L., and A. A. Rihter. *Dizel v sudovom propulsivnom komplekse*. L.: Sudostroenie, 1978.
4. Golubev, N. V. *Proektirovanie jenergeticheskikh ustanovok morskikh sudov*. L.: Sudostroenie, 1980.
5. Kacman, F. M. *Jekspluatacija propulsivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.
6. Kulibanov, Ju. M., P. A. Malyj, and V. V. Saharov. *Jekonomichnye rezhimy raboty sudovyh jenergeticheskikh ustanovok*. M.: Transport, 1987.
7. Kamkin, S. V., I. V. Voznickij, and V. P. Shmelev. *Jekspluatacija sudovyh dizelej*. M.: Transport, 1990.
8. Rumb, V. K., G. V. Jakovlev, G. I. Sharov, V. V. Medvedev, and M. A. Minasjan. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki. Chast I. sudovye dizelnye jenergeticheskie ustanovki*. SPb.: MGTU, 2006.
9. Artjushkov, L. S., A. Sh. Achkinadze, and A. A. Ruseckij. *Sudovye dvizhiteli. Uchebnik dlja vuzov*. L.: Sudostroenie, 1988.
10. Artemonov, G. A., V. P. Voloshin, Ju. V. Zaharov, and A. Ja. Shkvar. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki*. L.: Sudostroenie, 1988.
11. Ivanchenko, A. A., and A. A. Ivanchenko. *Ohrana vozdushnogo bassejna pri proektirovanii i jekspluacii sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: monografija*. SPb.: Izd-vo Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2014.
12. Egorov, G. V. "Selection of main components of «river-sea» sailing dry cargo ships and oil tankers." *Shipbuilding* 6 (2004): 10–16.
13. Steshenkov, A. L. "Development trends for domestic market of rudder propellers." *Shipbuilding* 4 (2014): 54–55.
14. Danilovskij, A. G., M. A. Orlov, and I. A. Borovikova. *Optimizacija sudovogo propulsivnogo kompleksa: monografija*. SPb.: Izd. centr SPbGMTU, 2007.
15. Kitaev, M. V., and S. V. Antonenko. "Nekotorye aspekty proektirovanija dvizhitelnyh kompleksov sudov s neskol'kimi rezhimami dvizhenija." *Morehodstvo i morskije nauki-2008: izbrannye doklady Pervoj Sahalinskoj regionalnoj morskoi nauch. tehn. konf. Juzhno-Sahalinsk: SahGU, 2008: 52–62.*
16. Kitaev, M. V., and S. V. Antonenko. "Obshhie polozhenija i podhod k resheniju zadachi vybora propulsivnogo kompleksa dlja sudov s neskol'kimi rezhimami dvizhenija." *Materialy VII mezhdunarodnoj nauch. prakt. konf. «Problemy transporta Dal'nego Vostoka», Akademija transporta RF. Vladivostok, 2007: 12–14.*
17. Wilkman, G., M. Arpiainen, M. Niini, T. Mattsson, F. Bercha, and S. Bercha. "Experience of Azipod Vessels in Ice." *Proceedings of the 7th International Conference on Performance of Ships and Structures in Ice. ICETECH06-134-RF, 2006.*
18. Bashurov, B. P., I. N. Nikolaev, M. V. Gritsenko, and A. V. Brezhnev. "Seagoing ships rudder propellers vibration monitoring." *Shipbuilding* 5 (2011): 36–38.
19. Nikolaev, N. I., A. B. Brezhnev, and M. V. Gricenko. "Vintorulevyje kolonki sovremennyh morskikh buksirov." *Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tehniceskoi i kommercheskoj jekspluacii morskogo*

transporta: materialy chetvertoj regionalnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Novorossijsk: Morskaja gosudarstvennaja akademija im. adm. F.F. Ushakova, 2005: 172–174.

20. Pashin, V. M. *Optimizacija sudov*. L.: Sudostroenie, 1984.

21. Nikolaev, N. I., A. V. Brezhnev, I. N. Nikolaev, and M. V. Gricenko. “Kontrol vibracii vintorulevyh kolonok rechnyh i morskikh sudov.” *River transport (XXIst century)* 1(37) (2009): 78–80.

22. Reshetov, N. A. “Provision of main rudder-propellers safety in normative and supervision activities of Register.” *Shipbuilding* 1 (2002): 12–17.

23. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and V. N. Okunev. “Vybrosoy parnikovyh gazov kak indikator jenergojektivnosti sudna.” *Tr. MNTK «Vodnyj transport Rossii: Innovacionnyj put’ razvitija», 6 – 7 oktjabrja 2010 g. Tom 2*. SPb.: SPGUVK, 2011: 369–374.

24. Vremennoe Rukovodstvo po dobrovolnomu podtverzhdeniju konstruktivnogo indeksa jenergeticheskoy jeffektivnosti. MEPC.1/Circ.682. 2009.

25. ZF Marine Krimpen b.v. Web. 20 June 2016 <<http://www.hrp.nl/>>.

26. ABB. Web. 20 June 2016 <<http://new.abb.com/>>.

27. Veksljar, V. Ja. “Poisk putej sovershenstvovaniya konstrukcii dvizhitelej i pro-pulsivnyh sistem boevyh korablej i sudov.” *Materialy 3-ej mezhdunarodnoj konferencii po morskim intellektual’nym tehnologijam. Morinteh*. SPb., 1999: 31–38.

28. Danilovskij, A. G. *Avtomatizirovannoe proektirovanie sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd. SPbGMTU, 2006.

29. Kim, Se-Eun, Soon-Ho Choi, and Tomi Veikonheimo. “Model Tests on Propulsion Systems for Ultra Large Container Vessel.” *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.

30. Wärtsilä. Web. 20 June 2016 <<http://www.Wartsila.com>>.

31. *Excellence in propulsion: news from the Kamewa Group*. Kristinehamn: Kamewa Group, 1997–1998. No. 1–no. 4.

32. “Demonstration and spin-off the Integral Motor Propeller Propulsion System.” *Proceedings, 1994, Technical Innovation Symposium, 7-9 September*. 1994: 109–124.

33. Pustoshny, A. V., and S. V. Kaprantsev. “Azipod propeller blade cavitation observations during ship manoeuvring.” *4th Int. Symposium on Cavitation (CAV’2001), Pasadena, USA*. 2001: 1–8.

34. Ghassemi, H., and M. Iranmanesh. “Comparison of hydrodynamic characteristics on two ship propulsors (PRS And Azipod).” *Iranian Journal of Science and Technology* 32.B4 (2008): 401–413.

35. Strand, Jann Peter, T. Lauvdal, A. K. Ådnanes, and A. AS. “Compact azipod propulsion on DP supply vessels.” *DP Conference, Houston, TX*. 2001: 1–8.

36. Tiainen, L., T. Jehkonen, and J. F. Hansen. *Simplifying Energy Efficiency*. Web. 20 June 2016 <https://library.e.abb.com/public/196daded74689feac1257a8a003ca642/ABB%20Generations_27%20Simplifying%20energy%20efficiency.pdf>.

37. Nowicki, J. “Stopping of Ships Equipped with Azipods.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.3 (2014): 373–376. DOI: 10.12716/1001.08.03.07.

38. Hanninen, Samuli, Torsten Heideman, and Erno Tenhunen. “Development of Azipod Propulsion for High Power Arctic Offshore Vessels.” *OTC Arctic Technology Conference, 3-5 December, Houston, Texas, USA*. Offshore Technology Conference, 2012.

39. Andryushin, A. V., S. Hänninen, and T. Heideman. ““Azipod” Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions.” *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013.

40. ROLLS-ROYSE. Web. 20 June 2016 <<http://www.rolls-royce.com>>.

41. Ghassemi, Hassan, and Parviz Ghadimi. “Computational hydrodynamic analysis of the propeller–rudder and the AZIPOD systems.” *Ocean Engineering* 35.1 (2008): 117–130. DOI:10.1016/j.oceaneng.2007.07.008

42. Frongillo, D. L. Propulsion solutions for the cruise industry: A comparison between conventional shaftline propulsion and Azipod® propulsion. Master thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.

43. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor V. Romanovskiy. “Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas.” *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on*. IEEE, 2014: 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

44. Pereira, Newton Narciso. "A Diagnostic of Diesel-Electric Propulsion for Ships." *Ship Science & Technology* 1.2 (2007): 27–42.
45. Katielieva, Elena. "Measures for improvement of energy efficiency of ships." *Journal of Marine Technology & Environment* 1 (2012): 59–66.
46. Juurmaa, Kimmo, Tom Mattsson, Noriyuki Sasaki, and Göran Wilkman. "The development of the double acting tanker for ice operation." *Proceedings of the 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*. 2002: 24–28.
47. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor V. Romanovskiy. "Possible Ways to Improve the Efficiency and Competitiveness of Modern Ships with Electric Propulsion Systems." *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2014: 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.
48. Baniela, Santiago Iglesias, Pablo López Varela, and Enrique Melón Rodríguez. "Concept and operation mode of the advanced electronic control system of the azimuth propellers in tugs." *Journal of Maritime Research* 2.3 (2005): 3–20.
49. Keinonen, Arno, and Paavo Lohi. "Azimuth and multi purpose icebreaker technology for arctic and non-arctic offshore." *The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.
50. Dordea, Stefan, and Elena Zburlea. "Electric drives for azimuth propulsors." *Analele Universitatii Maritime Constanta* 11.14 (2011): 177–184.
51. Ye, Guo-quan, and Lin-tao Shen. "Application of Azipod Electrical Propulsion System [J]." *Shanghai Shipbuilding* 1 (2007): 19–21.
52. Yakovlev, A. Yu. "Method of analysis and investigation of propulsive devices with counter-rotating propellers." *Shipbuilding* 2 (2008): 32–35.
53. SCHOTTEL. Web. 20 June 2016 < <http://www.Schottel.de> >.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванченко Александр Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
prof_ivanchenko@mail.ru, IvanchenkoAA@gumrf.ru
Шишкин Валерий Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
valshish2007@gmail.com, kaf_seu@gumrf.ru
Окунев Василий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okunew@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanchenko Alexander Andreevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
prof_ivanchenko@mail.ru, IvanchenkoAA@gumrf.ru
Shishkin Valery Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
valshish2007@gmail.com, kaf_seu@gumrf.ru
Okunev Vasily Nikolaevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okunew@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-176-183
УДК 621.43:629.5

В. Н. Кучеров

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ДВУХТАКТНОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОРШНЕМ

По результатам эксплуатации дизелей ZH40/48 выявлены преобладающие скорости изнашивания цилиндровых втулок в районе продувочных окон, которые определяют их ресурс. Проведены термоме-