

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬНОЙ КОРАБЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С СИСТЕМОЙ НАДДУВА «ГИПЕРБАР»

*Н.Н. Патрахальцев, д.т.н., проф.; Российский университет дружбы народов
Луис Ластра Эспиноса, к.т.н., проф.; Национальный инженерный университет Перу
Хосе Гонсалес Хихан, м.с.; Техническое управление ВМФ Перу*

Рассмотрены варианты модернизации корабельной силовой установки с высокофорсированными дизелями, оснащенными системой наддува «Гипербар». На основании анализа винтовых и универсальных характеристик совместной работы дизелей и двигателей при реализации режимов пуска, малых частот вращения на установившихся и неустановившихся режимах показаны неоптимальные условия для работы системы «Гипербар». Приведены варианты технических решений, способных заменить систему «Гипербар» частично или полностью.

Анализ вариантов модернизации силовой судовой установки с системой наддува «Гипербар» выполнялся по заказу военно-морского флота Перу Национальным инженерным университетом Перу (г. Лима) при участии Российского университета дружбы народов, который имел с университетами Перу соответствующий договор о научно-техническом сотрудничестве. Возможность выполнения такой работы появилась благодаря указу тогдашнего президента Перу А. Фухимори, который, используя опыт СССР, обязал все проекты, выполняемые на бюджетные средства, реализовывать с участием одного из университетов страны. Цель указа — повышение научного уровня университетов, стимулирование развития науки в них и повышение качества образовательного процесса.

Анализ проведен с использованием результатов экспериментальных исследований фирм — строителей корабля и дизеля, результатов моделирования фирмой-проектировщиком корабля совместных режимов работы дизелей—двигателей—корпуса корабля, а также собственных расчетных исследований исполнителей заказа.

Объектом анализа является силовая установка корабля класса корвет водоизмещением около 600 т французского производства. Схема силовой установки показана на рис. 1.

Силовая установка состоит из четырех V-образных 16-цилиндровых дизелей с $D/S = 240/220$

SACM 240V16EDS с двухступенчатым газотурбинным наддувом постоянного давления, с промежуточным охлаждением воздуха после каждой ступени: суммарная степень повышения давления $\pi_k = 4,8$, а по ступеням турбокомпрессоров (ТК) $\pi_{k1}, \pi_{k2} = 2,0-2,5$. Длительная мощность $N_{e \text{ ном}} = 4154$ кВт при $n = 1350$ об/мин, кратковременная $N_e = 4570$ кВт при $n = 1395$ об/мин, максимально допустимая $N_{e \text{ max}} = 4985$ кВт при $n = 1440$ об/мин (при температуре морской воды до $+30$ °С и температуре воздуха до $+35$ °С). Для уменьшения максимальных давлений и температур в цилиндрах при работе на полных нагрузках степень сжатия (ϵ) дизеля снижена до 10.

Каждый дизель связан с гребным валом и винтом фиксированного шага (ВФШ) через понижающий ($i = 2,25$) реверс-редуктор и электромагнитную разобщительную муфту. Гребные валы снабжены тормозными устройствами (для сокращения времени выбега корабля). Винтовые характеристики дизеля приведены на рис. 2.

В первоначальном проекте силовой установки корвета система «Гипербар» не предусматривалась. (Принципы устройства и работы системы наддува «Гипербар» изложены, например, в работе [1].)

Основное требование к кораблю заключалось в обеспечении высокой полной скорости $V_k = 38$ узлов. В связи с высокой форсировкой по p_e предполагались проблемы с обеспечением надежной работы на минимальных скоростных режи-

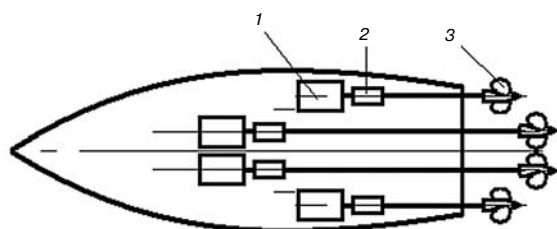


Рис. 1. Схема силовой установки корабля класса корвет с четырьмя дизелями типа SACM 240 V16 EDS (Франция): 1 — дизель; 2 — реверс-редуктор с электромагнитной разобщительной муфтой; 3 — винт фиксированного шага (ВФШ)

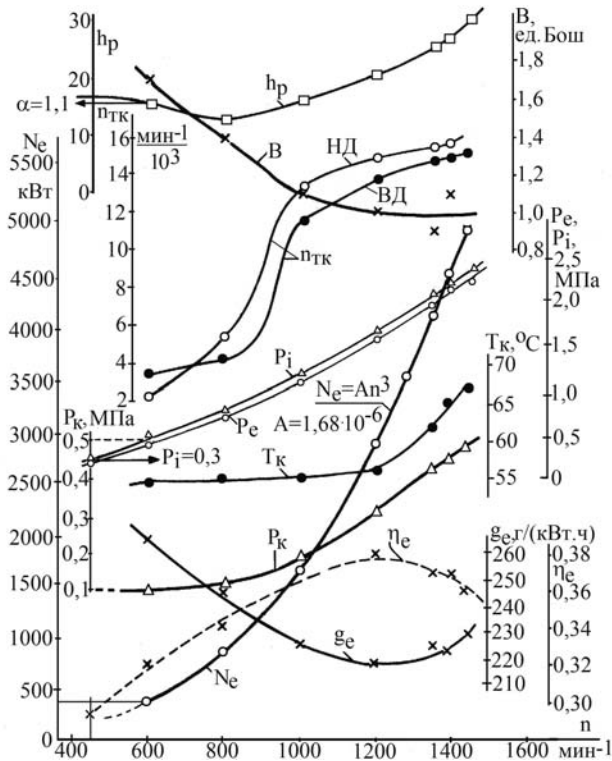


Рис. 2. Винтовые характеристики дизеля SACM 240V16EDS (результаты испытаний на стенде):

N_e, n — эффективная мощность и частота вращения вала дизеля; g_e, η_e — удельный эффективный расход топлива и эффективный КПД; p_k, T_k — давление и температура наддувочного воздуха; p_i, p_e — средние индикаторное и эффективное давления; n_{TK} — частота вращения вала турбокомпрессора низкого давления (НД) и высокого давления (ВД); B — дымность отработавших газов; h_p — положение рейки ТНВД; α — коэффициент избытка воздуха

мах, режимах маневрирования при низких частотах вращения.

По результатам математического моделирования в процессе проектирования было показано, что силовая установка корабля с трудом обеспечивает установившиеся режимы работы (УР) при низкой частоте вращения вала дизеля и практически не обеспечивает режимы начала работы по швартовой характеристике, а тем более — по винтовым характеристикам на режимах реверсирования, т. е. на неустановившихся режимах работы (НУР). Существо этой проблемы разъясняется на рис. 3.

При пуске дизеля разобщительная муфта выключена, дизель пускается и разгоняется до устойчивой частоты вращения холостого хода $n = 450$ об/мин. Вблизи этой частоты возможно подключение редуктора электромагнитной разобщительной муфтой к валу дизеля.

Точкой A обозначен установившийся режим (УР) работы одного дизеля, с одним работающим винтом, обеспечивающий постоянную скорость корабля $V_k = 8$ узлов. При подключении редуктора

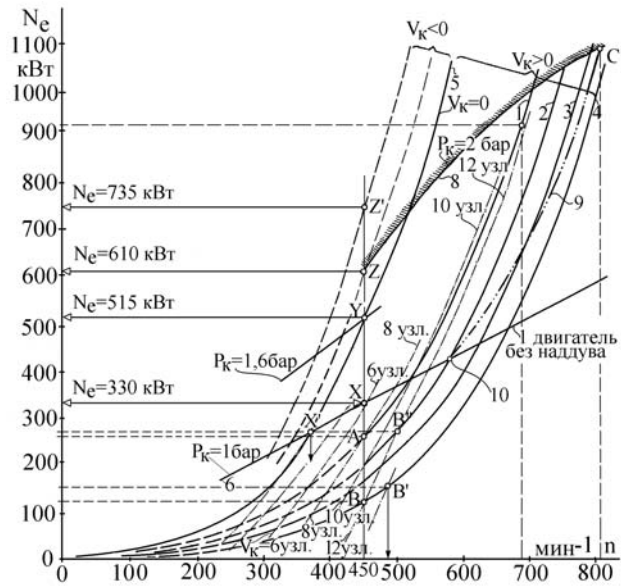


Рис. 3. Винтовые и универсальные характеристики работы пропульсивного комплекса дизели-винты-корпус корабля в области низких частот вращения:

1–4 — винтовые характеристики при движении корабля с одним, двумя, тремя или четырьмя работающими винтами; 5 — винтовая швартовая характеристика; 6 — характеристика предельной мощности дизеля при работе без наддува; 7 — мощность дизеля, необходимая для работы по швартовой характеристике, для обеспечения которой необходим наддув до $p_k = 1,6$ бар; 8 — достижимая мощность дизеля при $p_k = 2,0$ бар при работе системы «Гипербар»; 9 — мощность дизеля, достижимая при газотурбинном наддуве; 10 — режим, при котором начинается работа турбокомпрессоров; 11 — винтовые характеристики, получаемые при реверсе винтов, когда корабль продолжает двигаться вперед, а винты вращаются назад и наоборот; $V_k = 6$ узл., $V_k = 8$ узл. ... $V_k = 12$ узл. — характеристики постоянных скоростей (в узлах) движения корабля

корабль находится в неподвижном состоянии, его скорость $V_k = 0$, а следовательно, мощность, потребная для проворачивания винта, составляет $N_e = 515$ кВт, точка Y . Однако располагаемая мощность дизеля на этом скоростном установившемся режиме не превышает 330 кВт (точка X), так как в области низких частот вращения дизеля турбокомпрессоры еще не работают. Дизель без наддува при такой частоте вращения может обеспечить скорость корабля $V_k = 8$ узлов установившегося движения. А вот работа дизеля с нагрузкой 515 кВт не возможна. Поэтому при включении муфты дизель реализует неустановившийся режим (НУР) наброса нагрузки, соответствующей точке Y . Ввиду высокого сопротивления вращению винта частота вала дизеля начинает снижаться. При этом система регулирования дизеля допускает установку рейки ТНВД в положение, превышающее номинальную цикловую подачу дизеля без наддува. Происходит переобогащение горючей смеси (α снижается до 1,1), дизель интенсивно дымит, но его мощность

недостаточна для разгона. Частота вращения продолжает снижаться по характеристике $Y-X''$ до 350 об/мин (точка X'); мощность, потребная для вращения винта, снижается. Начиная от момента страгивания винта скорость корабля растет, характеристика сопротивления винта смещается от характеристики 5 к характеристике 1, режим работы дизеля изменяется по характеристике $X'-X-A$. Дизель выходит на УР работы в точке A при постоянной скорости корабля, равной 8 узлов

Очевидно, что чем короче будет переходный процесс разгона корабля от $V_k = 0$ до $V_k = 8$ узлов, тем меньше будет «провал» частоты вращения вала дизеля, меньше вероятность остановки дизеля из-за чрезмерного снижения n , а также короче период времени работы с интенсивным дымлением. Длительность переходного процесса ($Y-X'-X$) может быть сокращена, если при работе на холостом ходу всех четырех дизелей дополнительно включить одного, двух или трех редукторов.

Точка B соответствует установившемуся режиму работы всех четырех дизелей и винтов при скорости корабля $V_k = 10-12$ узлов. Дальнейшее повышение скорости корабля осуществляется по винтовой характеристике (точка B' и далее). Поддержание скорости 12 узлов возможно, например, отключением двух винтов из четырех при одновременном повышении частоты вращения валов работающих дизелей (точка B''). И так далее.

При достижении частоты вращения 600 об/мин по внешней скоростной характеристике (ВСХ) начинается работа турбокомпрессоров, а при $n = 800-1000$ об/мин давление наддува достигает $p_k = 2,0$ бар.

Итак, проведенный анализ показал принципиальную возможность работы силовой установки в области пониженных частот вращения на УР и одновременно выявил проблемы реализации неустановившихся режимов работы при включении редукторов.

Проблемы с реализацией режимов набросов нагрузки возникают также при реверсировании винтов в условиях продолжающегося выбега корабля с положительной скоростью, когда мощность, необходимая для проворачивания винта, может достигать значений, соответствующих режимным точкам Z и даже Z' . Попытки реализовать такие режимы часто заканчиваются остановкой дизеля. Поэтому такие режимы нельзя допускать, т. е. реверсировать винты следует лишь при $V_k = 0$, либо необходимо форсировать дизель по мощности в области низких частот вращения, причем предпочтительно без превышения характеристики, соответствующей порогу интенсивного дымления.

Ходовые испытания корабля выявили еще ряд проблем. Например, проблема надежного пуска при низкой степени сжатия.

Другие проблемы возникают из-за конструктивных особенностей гребных винтов, которые были созданы для обеспечения скорости корабля, равной 38 узлов при полной мощности дизелей. Для работы этих винтов требуется на минимальной частоте вращения значительная мощность (около 600 кВт). Проблема, таким образом, состояла в том, что дизель не развивал достаточную мощность для проворачивания винта на минимальных частотах вращения по швартовной характеристике, а тем более при реверсе.

Решение этой проблемы достигается либо заменой винтов, либо модернизацией дизелей с целью повышения их мощности (крутящих моментов) при минимальной частоте вращения.

В то время замена винтов считалась неприемлемой, так как корабль терял скорость полного хода, поэтому было принято решение о модернизации дизеля. Из множества возможных вариантов предпочтение было отдано применению системы «Гипербар». В этом случае не происходило потери максимальной скорости, не требовались изменения размерений корабля. Затраты несли фирма-исполнитель проекта, в обязанности которой входили исправления ошибок проекта.

Включение системы «Гипербар» происходит перед пуском дизеля для повышения надежности запуска. Диапазон повышения давления наддува показан на рис. 3 и достигает $p_k = 2$ бар вплоть до режима $n = 800$ об/мин, когда «Гипербар» отключается и дизель работает только с собственной системой наддува, благодаря которой обеспечивается дальнейший разгон корабля с выходом на режимы максимальной скорости. Связь скоростей движения корабля (V_k), частот вращения валов дизеля (n) и винтов (n_b), а также соответствующих показателей по мощности, давлениям наддува и т. д. показаны на рис. 4.

Ось ординат на рис. 4 представляет собой по существу швартовную характеристику ($V_k = 0$), работа по которой дизеля без наддува возможна, если дизель будет развивать мощность $N_e = 260$ кВт при $n = 350$ об/мин. По мере увеличения V_k , т. е. разгона от точки A вблизи ВСХ 6, происходит смещение винтовых характеристик от швартовной к характеристике 1 и т. д. В точке C дизель устойчиво работает при $n = 515$ об/мин, а корабль имеет постоянную скорость УР³ (т. е. 8,5 узла). Минимально возможную скорость УР¹ = 7,5 узла корабль развивает в точке D при $n_{\min} = 450$ об/мин и при уменьшенных, по сравнению с ВСХ, подачах топлива. Дальнейший разгон до $V_k = 12,8$ узла на одном винте (примерно по участку $C-C'$ характеристики 1) происходит

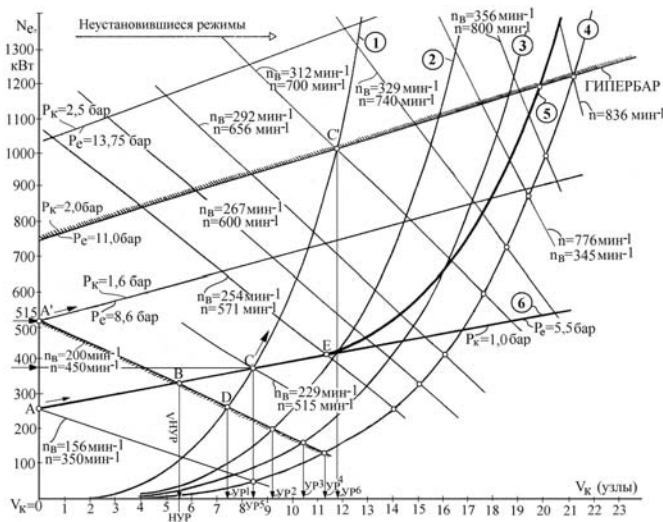


Рис. 4. Винтовые и универсальные характеристики работы силовой установки корвета в области низких частот вращения:

V_k — скорость установившегося движения корабля; 1–4 — винтовые характеристики при работе соответственно с одним, двумя, тремя и четырьмя работающими винтами; 5 — характеристика развиваемой дизелем мощности при работе с газотурбинным наддувом; 6 — характеристика дизеля без наддува; ГИПЕРБАР — характеристика давления наддува, форсировки дизеля благодаря работе системы «Гипербар»

с возрастанием давления наддува до $p_k = 2,0$ бар, ростом частоты вращения вала дизеля до $n = 700$ об/мин, а также ростом p_e до 11,0 бар.

Применение системы «Гипербар» привело к возникновению ряда проблем с самого начала. Прежние проблемы решались производителем дизелей в рамках гарантийного обслуживания. Был выполнен ряд улучшений. После установки системы «Гипербар» проблемы возросли, а затраты на их решение легли на перуанский ВМФ. Основные проблемы, связанные с установкой системы «Гипербар», состоят в следующем.

- Ненадежность пуска, связанная с нестабильностью самовоспламенения ($\epsilon = 10$), закоксовывание распылителей форсунок, неполадки в системе управления, зависания клапанов воздушного пуска, запаздывания срабатывания регулятора (в результате утечек масла в серводвигателе).
- Возникновение пожаров в выпускной системе в результате проявления проблем пуска.
- Выход из строя секций выпускных коллекторов и связывающих их соединений и защиты.
- Эрозия сопловых аппаратов турбин частицами разрушающихся коллекторов.
- Повышение расхода пускового воздуха как через камеру сгорания, так и от приводимого при пуске электродвигателем турбокомпрессора, по сравнению с базовой конструкцией.
- Термические разрушения турбокомпрессоров.

После десяти лет эксплуатации Перуанским ВМФ была накоплена представительная статистика о реальных режимах работы силовых установок, достаточная для выбора рациональных условий использования корабля, а также выявлены проблемы длительного использования системы «Гипербар».

Рассматриваемый корвет является ракетным быстроходным кораблем. В начальный период эксплуатации преимущественным было требование высокой быстроходности. Требования к режимам малых скоростей хода практически отсутствовали. Опыт эксплуатации показал, что благодаря дальности действия вооружения необходимость в быстроходности возникает редко. Базовые требования к скоростным режимам определяются необходимостью длительного патрулирования в прибрежных водах и переходах в зону патрулирования на средних скоростях. Новые требования Перуанского ВМФ к режимам работы корабля заключаются в следующем: 30 % времени эксплуатации занимает патрулирование со скоростями порядка 6–8 узлов, 60 % времени — режимы перехода из базы и обратно со скоростями порядка 12–16 узлов и мене 10 % времени корабль использует высокие скорости, но, как правило, не выше 28–30 узлов.

Прибрежное патрулирование с малыми скоростями приводит к необходимости работы системы «Гипербар» непрерывно в течение нескольких часов, в то время как ранее предполагалась лишь кратковременная работа системы для ускорений при выходе на высокие скорости. Новая концепция рациональных режимов работы корабля внесла существенные изменения в режимы работы системы «Гипербар», которые стали более тяжелыми. Поскольку требования к необходимым режимам работы корабля существенно изменились, была поставлена задача изучить возможность удаления системы «Гипербар». Перуанский ВМФ также предполагает, что модернизация дизелей заменой «Гипербара» приведет к снижению стоимости эксплуатации и технического обслуживания, поскольку не потребуются расходовать топливо на камеру сгорания «Гипербара» на низких скоростях. Проектный расход топлива составлял 160 кг/ч на одну камеру сгорания, т. е. 640 кг/ч на корабль). Стоимость модернизации также важна, так как она осуществляется из бюджета ВМФ.

(Примечание. Известно, что фирма SACM продолжила разработку системы «Гипербар» на дизеле типа 240. Успешные испытания были проведены Французским ВМФ. Положительные результаты, полученные с дизелем 240V16EDS, были применены на дизеле UD45V16M9, который развил мощность 5145 кВт при 1350 об/мин плюс 10 % перегрузки).

Первоначально предполагалось усовершенствование дизеля 240 с системой «Гипербар». Было

предложено применение дополнительной ступени турбонаддува для повышения расхода воздуха при низкой частоте вращения; применение улучшенной электронной системы регулирования в области низких частот вращения. Этот вариант модернизации предполагал достижение следующих преимуществ:

- вспомогательный турбокомпрессор снижает продолжительность применения системы «Гипербар» и повышает надежность ее работы;
- применение новой системы управления снизит проблемы управления установкой, будет достигнуто дальнейшее повышение ее надежности.

Установка дополнительного турбокомпрессора, предназначенного для режимов малых частот вращения, оказалась проблематичной из-за условий ограниченности объема машинного отделения. Длительное использование автономного электропривода ТК также проблематично из-за ограниченности источников электропитания. Другие варианты решения поставленной задачи изображены на рис. 5.

Как было показано ранее (см. рис. 3), проворачивание винта во время стоянки корабля, т. е. включение муфты при $n = 450$ об/мин, дизелем без наддува невозможно или затруднено, так как его мощность не превышает 330 кВт, в то время как потребная мощность составляет 515 кВт.

Для развития необходимой мощности требуется наддув порядка 1,6 бар, что может быть обеспечено либо системой «Гипербар», либо дополни-

тельным компрессором с приводом от постороннего источника энергии ($N_{eк}$) (см. рис. 5), либо дополнительным компрессором с приводом от вала дизеля ($N_{eк-Nк}$), но с давлением наддува, равным уже 2,2–2,3 бар. При реверсировании дизеля во время движения корабля потребная мощность может составить 610–735 кВт, что может быть обеспечено либо системой «Гипербар», либо от постороннего источника (при $p_k = 2,1-2,35$). Использование привода компрессора от вала дизеля в данном случае нецелесообразно (p_k должно быть 4,1 бар) или невозможно (p_k должно превышать 4,5 бар).

По условиям ограниченности размеров машинного отделения можно было бы предложить систему, например, с гидроприводом компрессора. Однако из-за повышенных потерь в приводе такая система может быть применена только для облегчения работы системы «Гипербар», снижения напряженности ее работы, т. е. все же при совместной работе. Применение электропривода дополнительного компрессора ограничено располагаемой мощностью корабельной электростанции.

В качестве вариантов модернизации импульсивного комплекса предлагалось также заменить винты фиксированного шага винтами с регулируемым шаговым отношением (ВРШ), сохранив существующие дизели, но удалив систему «Гипербар». В данной статье достоинства и недостатки такого предложения не рассматриваются.

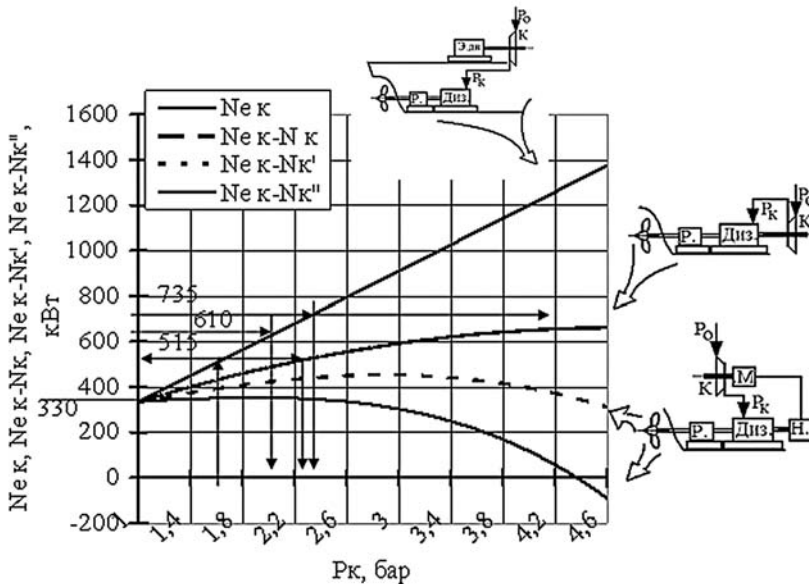


Рис. 5. Изменение мощности дизеля в зависимости от давления наддува при $n = 450$ об/мин при разных системах организации наддува:

Диз. — дизель; Р. — редуктор; Эдв. — электродвигатель; К. — компрессор; Н. — гидронасос; М. — гидромотор; $N_{eк}$ — мощность дизеля с разной степенью наддува, N_k , N_k' , N_k'' — затраты мощности дизеля на привод системы наддува при КПД передачи на компрессор 100%, 75% и 50% соответственно

Рассматривались предложения по повышению эффективности пусков применением легко воспламеняющихся жидкостей, впрыскиваемых непосредственно в цилиндры по принципу внутреннего смешения [2]. Анализировались предложения по форсированию дизеля по составу горючей смеси в области низких частот вращения без превышения допустимого предела дымления [3, 4]. На режимах пусков и приемов нагрузки предлагалось использование дополнительного воздуха от баллонов пускового воздуха [5, 6]. Также было проанализировано предложение о повышении водоизмещения при уменьшении осадки (т. е. использование дополнительного легкого корпуса).

В конечном итоге проблема отказа от системы «Гипербар» была решена заменой существующих дизелей, у которых были повышены степени сжатия, заменены поршни и крыш-

ки цилиндров на более термостойкие, снижена степень наддува на номинальном режиме работы. Это решение незначительно снизило максимальную скорость корабля, но было обеспечено решение проблемы работы на УР и НУР в области низких частот вращения, устранена проблема надежности пуска, снизились трудоемкость и стоимость технического обслуживания и т. д.

Таким образом, выполненный анализ возможных направлений модернизации судовых дизелей и реализация окончательно выбранного варианта характеризуется следующими результатами.

➤ Обеспечение высокой скорости полного хода корабля требует форсирования дизелей двухступенчатым наддувом ($\pi_k=4,8$) с промежуточным охлаждением воздуха. При этом частота вращения начала работы турбокомпрессоров составляет около $0,5 n_{ном}$.

➤ Высокая форсировка по p_e потребовала снижения термических и механических нагрузок цилиндропоршневой группы дизеля путем снижения степени сжатия в дизеле до 10.

➤ При проектной степени форсировки по p_e работа на малых частотах вращения сопровождается недопустимым снижением цикловой подачи топлива, что приводит к нестабильности и неустойчивости работы дизеля на этих режимах. В результате возникает необходимость повышения минимально устойчивой частоты вращения до значения $0,33 n_{ном}$.

➤ Недостаточный запас крутящего момента на низких частотах вращения ограничивает возможности реализации неустановившихся режимов наброса нагрузок на дизели при включении винтов фиксированного шага (по швартовной характеристике), а также режимов реверсирования.

➤ Низкая степень сжатия снижает надежность пусковых режимов.

➤ Применение системы «Гипербар» решает все перечисленные проблемы. Однако фактическое распределение эксплуатационных режимов приводит к чрезмерной длительности работы системы «Гипербар», снижает надежность и долговеч-

ность силовой установки, требует дополнительных трудоемких операций по техническому обслуживанию и ремонту.

➤ Исключение из пропульсивного комплекса системы «Гипербар» предлагалось за счет применения дополнительного компрессора с автономным приводом, однако это решение не заменяет «Гипербар», а лишь снижает нагрузки на него. Дополнительный турбокомпрессор для режимов низких частот вращения не улучшает ситуацию с неустановившимися режимами набросов нагрузки и не вписывается в габариты машинного отделения.

➤ Окончательно принятым решением является замена дизелей на менее форсированные по наддуву, но с достаточно высокой степенью сжатия (что также связано с потерей максимальной скорости корабля, но решает проблемы пусков, малых скоростей движения, маневрирования на малых скоростях, приемов нагрузки, реверсов).

Литература

1. Патрахальцев Н.Н. Наддув двигателей внутреннего сгорания. — М. : Изд. РУДН, 2003. — 319 с.
2. Патрахальцев Н.Н., Соболев И.А., Казаков С.А. Совершенствование пусковых и динамических характеристик дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 32–37.
3. Патрахальцев Н.Н., Бадеев А.А., Русинов А.Р. Возможности форсажа дизеля при ограничении дымности выбросов // Строительные и дорожные машины. — 2006. — № 3. — С. 40–42.
4. Патрахальцев Н.Н., Гильермо Лири Качо, Соболев И.А. Использование СУГ для форсирования мощности дизеля // Автогазозаправочный комплекс и альтернативное топливо. — 2007. — № 3. — С. 28–29.
5. Цыркин М.И., Худин В.П. Особенности работы дизелей с высоким наддувом на переменных режимах. // Двигателестроение. — 1998. — № 1. — С. 20–22.
6. Патрахальцев Н. Н. Неустановившиеся режимы работы ДВС. — М. : РУДН. — 2009. — 330 с.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ Ориентировочные тарифы на 2 полугодие 2010 г.

Первая страница обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	32 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	34 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	32 000 руб.
	Черно-белая	28 000 руб.