

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074

REDUCING THE INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THERMOMECHANICAL LOADING OF THE ENGINE BY THE JET OF WATER ON THE SCREW

A. S. Sharatov

Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation

The article assesses the possibility to influence the parameters of thermal and mechanical stress of the main engine running on the propeller of a fixed pitch. The operation of the main engine in changing operating conditions of the vessel, subject to maintaining the nominal speed, is characterized by the presence of overload in terms of thermal and mechanical stress. This leads to the need to reduce engine speed, reduce fuel efficiency. Under these conditions, the parameters of the main engine in each mode are dependent on the external operating conditions. The scientific and technical literature and ship documentation do not show the dependence of the engine parameters on the external operating conditions of the vessel, causing a change in the screw characteristics, which reduces the efficiency of the technical operation of the vessel. In order to assess the influence of external factors on the parameters of the main engine, the data presented in the electronic ship documentation was processed, which allowed to form graphical dependences of the parameters of thermal and mechanical stress in relative form for each parameter under consideration when external conditions change. Verification of the obtained dependences is performed using universal characteristics. To generalize the results obtained, the parameter relative step of the propeller is used as an element characterizing the total external impact of operating conditions on the engine. The use of a water supply system affects the hydrodynamic drag moment of the propeller, which leads to different weighting of the screw characteristics of the main engine, reducing the influence of external conditions on the parameters of thermal and mechanical stress. Explore the option of supplying additional water to the blades of the propeller with the deterioration of external conditions corresponding 10% increase in the power consumed for achieving the rated speed movement, allowing to reduce the decrease in the frequency of rotation of a drive motor with 75 to 95% of nominal. According to the results, the main advantages of the propeller equipped with a slit nozzle for supplying additional water to the blades are formulated.

Keywords: marine engine, propeller, propeller characteristics, thermal tension, mechanical tension, external conditions (factors), speed, relative stride, jet impact.

For citation:

Sharatov, Alexsei S. "Reducing the influence of operating conditions on thermomechanical loading of the engine by the jet of water on the screw." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1063–1074. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074.

УДК 629.123

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ СТРУЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ НА ВИНТ

А. С. Шаратов

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Республика Крым, Российская федерация

В статье выполнена оценка возможности воздействия на параметры тепловой и механической напряженности главного двигателя, работающего на гребной винт фиксированного шага. Работа главного двигателя в изменяющихся условиях эксплуатации судна при условии поддержания заданной частоты вращения характеризуется возможной его перегрузкой по показателям тепловой и механической напряженности. Это приводит к необходимости снижения частоты вращения двигателя. При этом параметры главного двигателя в каждом конкретном режиме являются зависимыми от внешних условий эксплуата-

ции. В научно-технической литературе и судовой документации не приводятся зависимости параметров двигателя от внешних условий эксплуатации судна, вызывающих утяжеление или облегчение винтовой характеристики. В результате под влиянием внешних условий эффективность технической эксплуатации судна изменяется. С целью оценки влияния внешних факторов на параметры главного двигателя выполнена обработка данных, приведенных в судовой документации, расчетных данных и отчетной документации машинной команды. Это позволило сформировать графические зависимости параметров тепловой и механической напряженности в относительном виде для каждого рассматриваемого параметра при изменении внешних условий. Верификация полученных зависимостей выполнена с помощью универсальных характеристик. Для обобщения полученных результатов использован параметр «относительная поступь гребного винта». Этот параметр характеризует суммарное внешнее воздействие условий эксплуатации на двигатель. Применение системы дополнительной струйной подачи воды на поверхность лопасти гребного винта оказывает влияние на гидродинамический момент сопротивления гребного винта, что приводит к изменению винтовой характеристики главного двигателя. За счет этого ограничивается суммарное влияние внешних условий на параметры тепловой и механической напряженности. Рассмотрен вариант подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта при ухудшении внешних условий, соответствующих 10 %-му возрастанию мощности, потребляемой для достижения проектной скорости движения. Это позволяет ограничить снижение частоты вращения двигателя с 75 % до 95 % номинальной. По результатам исследований сформулированы основные преимущества гребного винта, оборудованного целевой насадкой подачи дополнительной воды на лопасти.

Ключевые слова: судовой двигатель, гребной винт, винтовая характеристика, тепловая напряженность, механическая напряженность, внешние условия эксплуатации, частота вращения, относительная поступь винта, струйное воздействие.

Для цитирования:

Шаратов А. С. Снижение влияния условий эксплуатации на тепломеханическую нагруженность двигателя путем струйного воздействия воды на винт / А. С. Шаратов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1063–1074. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074.

Введение (Introduction)

К основным задачам технической эксплуатации главной энергетической установки (ГЭУ) судна относятся: предотвращение перегрузки главного двигателя (ГД) в изменяющихся условиях плавания, сохранение экономичности работы судовой энергетической установки судна [1], обеспечение достижения конструктивного коэффициента энергетической эффективности [2], [3]. В условиях эксплуатации судна двигатель является зависимым элементом (мощность, вырабатываемая двигателем, зависит от мощности, потребляемой гребным винтом) [4]. Для оценки изменений условий плавания и теплонапряженности ГД в эксплуатации может использоваться винтовая характеристика [5]. В технической литературе [6] и документации [7] приводятся характеристики двигателя в зависимости от частоты вращения при работе двигателя по номинальной винтовой характеристике. При этом не акцентируется внимание на утяжелении или облегчении винтовой характеристики при изменении внешних условий, что может привести к перегрузке ГД по теплонапряженности и механической напряженности, а также снижению эффективности его эксплуатации [8]. Струйное воздействие дополнительной жидкости, подаваемой через целевую насадку на лопасти гребного винта [9], позволяет воздействовать на момент сопротивления гребного винта, т. е. изменять поступь гребного винта (ГВ), вне зависимости от внешних факторов. Это позволит снизить влияние внешних условий на тепловую и механическую напряженность ГД, обеспечив возможность предотвращения его перегрузки, без изменения цикловой подачи топлива.

Проанализируем влияние «утяжеления» [10] или «облегчения» [11] винтовой характеристики в условиях эксплуатации на теплонапряженность ГД. Цель работы заключается в оценке возможности воздействия на параметры тепловой и механической напряженности ГД, работающего по ненормальной винтовой характеристике, путем струйной подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Оценить зависимость тепловой и механической напряженности ГД от условий эксплуатации (изменения относительной поступи ГВ) судна на примере малооборотного двигателя фирмы «MAN B&W» [7].

2. Произвести верификацию полученных зависимостей с помощью универсальных характеристик двигателя 6ЧН18/22 (судно «Катран»).

3. Провести анализ качественного изменения параметров двигателя при работе по ненормальной винтовой характеристике.

4. Оценить эффект от применения струйного воздействия дополнительно подаваемой воды на лопасти гребного винта при ухудшении внешних условий, соответствующих 10 %-му «утяжелению» винтовой характеристики (потребляемая мощность для достижения той же скорости движения судна возросла на 10 %).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассматривается работа ГД с традиционным управлением на ГВ фиксированного шага. При анализе параметров двигателя работа систем VIT и VTT не учитывается. В процессе эксплуатации судна ГД в любой промежуток времени может быть перегружен по тепловой и механической напряженности, что приводит к необходимости управления параметрами, обеспечивая их снижение до допустимых значений.

Для оценки механической напряженности двигателя используются следующие параметры:

– p_z — максимальное давление сгорания;

– M_k — крутящий момент двигателя, затрачиваемый на преодоление гидродинамического момента сопротивления на ГВ;

– p_e — среднее эффективное давление.

Тепловая напряженность оценивается по температуре отработавших газов двигателя t_g .

Экономичность двигателя оценивается по расходу топлива на миль пройденного пути B_m .

Предпочтительным вариантом оценки показателей тепловой и механической напряженности ГД, работающего по винтовой характеристике, является рассмотрение универсальных характеристик. Относительная поступь гребного винта в пределах одной винтовой характеристики не изменяется, и этот параметр используется как показатель воздействия внешних условий на ГД.

Результаты (Results)

1. *Зависимость тепловой и механической напряженности ГД от условий эксплуатации (изменения относительной поступи ГВ) судна на примере двигателя марки MAN B&W 7S70MC.*

Для малооборотных ДВС универсальные характеристики недоступны, поэтому для оценки тепловой и механической напряженности воспользуемся технической литературой [7], а также данными ходовых испытаний [12]. На рис. 1 показана типовая зависимость параметров судового двигателя 7S70MC MAN B&W при изменении частоты вращения ГВ фиксированного шага. Эти параметры соответствуют номинальной винтовой характеристике ГД в эталонных условиях эксплуатации. Используя рекомендации фирмы «MAN B&W» [13] по подбору двигателя и результаты расчетов в программе CEAS Engine Calculations [14], сформируем исходные данные для анализа отчетной документации машинной команды.

Обработка данных, приведенных в судовой и отчетной документации машинной команды, позволила сформировать графические характеристики, построенные в относительном виде (относительно номинального значения). Графики изменения каждого параметра тепловой и механической напряженности двигателя при утяжелении или облегчении винтовой характеристики показаны на рис. 2–4 (на рис. 2 — относительное максимальное давление сгорания, на рис. 3 — относительный момент сопротивления ГВ).

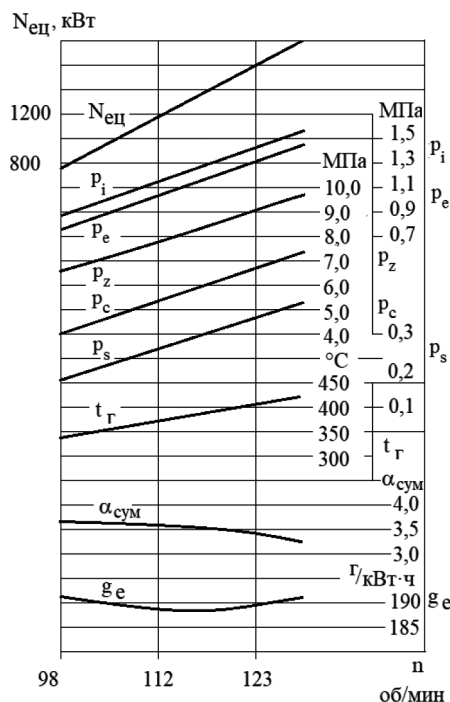


Рис. 1. Зависимость основных параметров главного двигателя 7S70MC от частоты вращения:
 $N_{\text{ец}}$ — эффективная цилиндровая мощность; p_i — среднее индикаторное давление;
 p_e — среднее эффективное давление; p_z — максимальное давление сгорания;
 p_c — давление в конце сжатия; p_s — давление наддува; $t_{\text{г}}$ — температура отработавших газов;
 $\alpha_{\text{сум}}$ — суммарный коэффициент избытка воздуха; g_e — удельный эффективный расход топлива

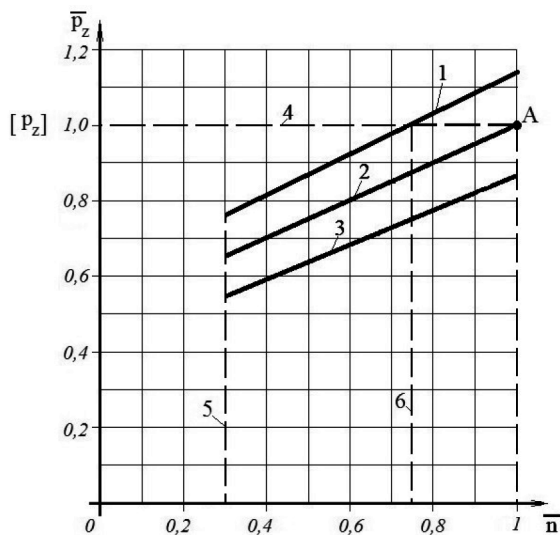


Рис. 2. Относительное максимальное давление сгорания $\bar{p}_z$ при работе ДВС по винтовой характеристике: 1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ; 4 — ограничение по максимальному давлению сгорания; 5 — ограничение по минимальной частоте вращения; 6 — ограничение по частоте вращения при работе двигателя по утяжеленной ВХ; А — точка номинального режима работы

Максимальное давление сгорания p_z растет пропорционально частоте вращения. При работе по утяжеленной винтовой характеристике (ВХ), характеризующейся большей потребляемой мощностью при неизменной частоте вращения, p_z раньше достигнет своего предельно допустимого

значения (см. рис. 2), ограничивая диапазон работы ДВС. Утяжеление ВХ приводит к увеличению потребляемой мощности, что допустимо в пределах ограничительной характеристики. Однако при выходе за ограничительные характеристики для предотвращения перегрузки ГД принудительно снижается цикловая подача топлива, что приводит к необходимости принудительно снижать частоту вращения двигателя для обеспечения допустимого давления сгорания.

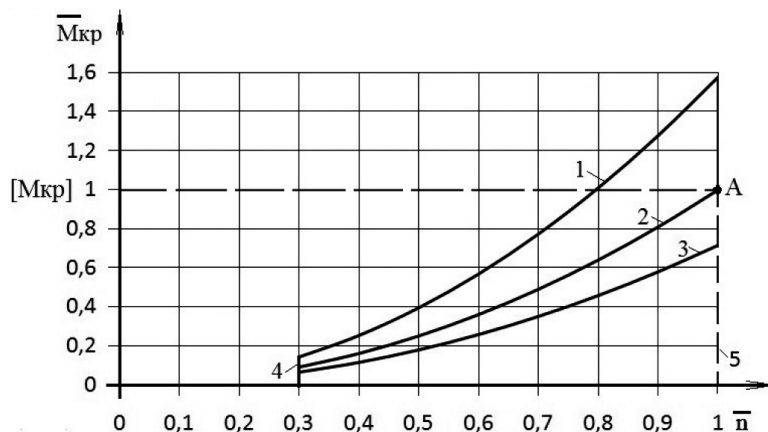


Рис. 3. Относительный момент сопротивления гребного винта $\bar{M}_{кр}$ при работе ДВС по винтовой характеристике:

1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;
4 — ограничение по минимальной частоте вращения;

5 — ограничение по номинальной частоте вращения; A — точка номинального режима

Анализ рис. 3 показывает, что в условиях утяжеления ВХ, предотвращение перегрузки двигателя по крутящему моменту требует значительного понижения частоты вращения (до 80 % от номинальной). При дальнейшем снижении частоты вращения необходимо дополнительно уменьшить нагрузку так, чтобы значение среднего эффективного давления не превышало линию предельного момента. Обобщенно ограничения по параметрам механической напряженности показаны на рис. 4.

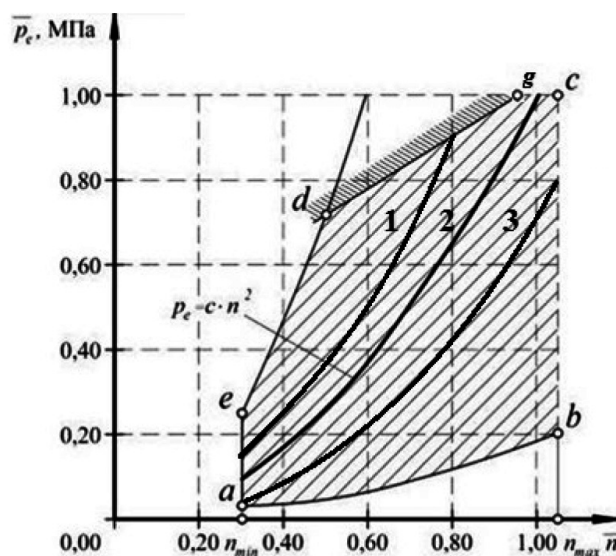


Рис. 4. Относительное среднее эффективное давление двигателя $\bar{p}_e$ при работе по ВХ:

1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;

ed — ограничение по тепловой напряженности; ab — ограничение по минимальной температуре;

cb — ограничение по максимальной частоте вращения;

ea — ограничение по минимальной частоте вращения; dg — ограничение по крутящему моменту;

gc — ограничение по мощности для длительной работы

На рис. 5 показана относительная температура отработавших газов ГД. Особенностью эксплуатации современных ДВС морского флота является наличие аварийно-предупредительной сигнализации. Конструктивно в эксплуатации для ГД замеряется и контролируется значительное

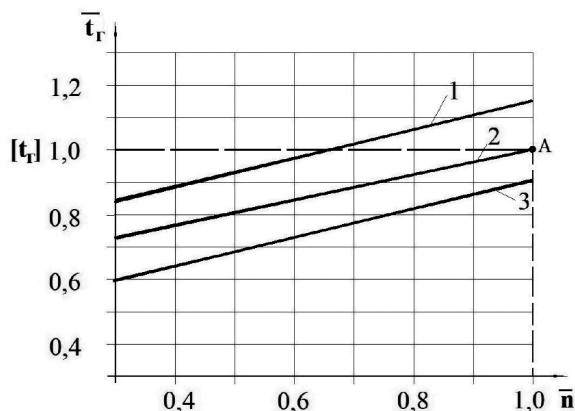


Рис. 5. Относительная температура отработавших газов t_r двигателя при работе по ВХ:
1 — утяжеленная ВХ;
2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;
А — точка номинального режима

количество параметров, часть которых является актуальными для контроля теплонапряженности ГД. Наиболее распространенным параметром, который контролируется в эксплуатации, является температура отработавших газов (см. рис. 5), выход которой за допустимые пределы может свидетельствовать о перегрузке двигателя. Сложность анализа теплонапряженности двигателя по температуре отработавших газов связана со значительным количеством следующих факторов, оказывающих влияние на этот параметр:

- внутреннее состояние конструкции двигателя и ГЭУ;
- качество охлаждения двигателя [15];
- внешние условия эксплуатации.

Если проанализировать внутренние факторы [16], оказывающие влияние на температуру отработавших газов, и принять их влияние постоянным, то можно получить следующие допущения, позволяющие выполнить анализ влияния внешних факторов на тепловую напряженность двигателя:

- температура отработавших газов двигателя прямо пропорциональна мощности двигателя и цикловой подаче топлива;
- при постоянной мощности, потребляемой ГВ, при утяжелении ВХ температура повышается, при облегчении ВХ — снижается.

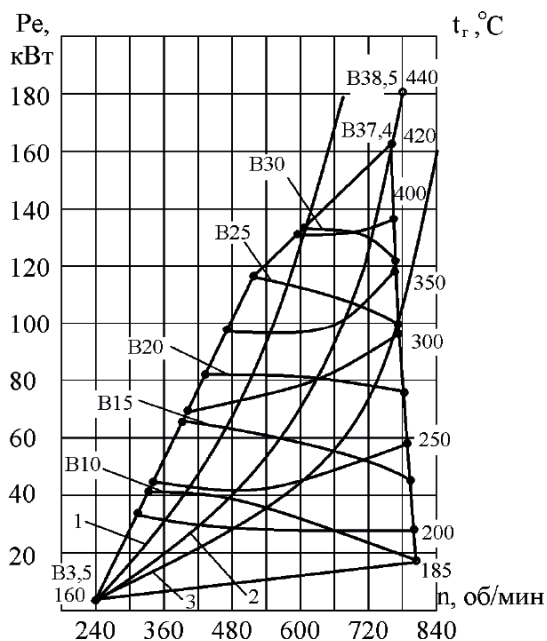


Рис. 6. Поле температур отработавших газов двигателя при работе по ВХ:
 P_e — мощность эффективная, кВт;
 n — частота вращения, об/мин;
 t_r — температура отработавших газов по цилиндрам, °C; В — часовой расход топлива, кг/ч

2. Качественное подтверждение зависимостей, полученных с помощью универсальных характеристик двигателя 6ЧН18/22.

Для качественного дополнительного подтверждения правильности полученных данных (верификации) воспользуемся известными данными для высокооборотных ДВС на примере справочных данных двигателя 6ЧНСП18/22, установленного на рейдово-портовом нефтеналивном бункеровщике «Катран» с мощностью ГД 165 кВт [17]. Поле температур отработавших газов двигателя при работе по ВХ показано на рис. 6.

Качественное совпадение процессов, протекающих при изменении ВХ (рис. 6), с данными, полученными из справочной литературы [6], свидетельствует об успешной верификации приведенных результатов, характеризующих работу малооборотных двигателей.

3. Анализ качественного изменения параметров двигателя при работе по ненормальной винтовой характеристике.

Проанализировав графики на рис. 2–5, выполним качественную оценку изменения показателей тепловой и механической напряженности ГД при изменении вида ВХ (таблица).

**Оценка изменения показателей тепловой и механической напряженности
главного двигателя при изменении вида винтовой характеристики**

Параметр	Изменение винтовой характеристики	
	«утяжеление»	«облегчение»
Размер недоиспользованной мощности	Уменьшается	Увеличивается
Запас по частоте вращения	»	»
Расход мощности (цикловой подачи топлива) на поддержание заданной частоты вращения ГВ [5]	Увеличивается	Уменьшается
Частота вращения, при которой достигается номинальное значение среднего эффективного давления	Уменьшается	Увеличивается
Максимальное давление сгорания при заданной частоте вращения [6]	Увеличивается	Уменьшается
Гидродинамический момент сопротивления ГВ	»	»
Температура отработавших газов [6]	»	»
Механический КПД двигателя [5]	Уменьшается	Увеличивается
Удельный эффективный расход топлива [18]	Увеличивается	»
Скорость судна [5]	Уменьшается	»
Относительная поступь гребного винта (эквивалентное шаговое отношение) [5]	Увеличивается	Уменьшается
Среднее индикаторное давление [19]	»	»
Загрязнение атмосферы окислами азота [20]	»	»
Температура неохлаждаемых деталей двигателя [20]	»	»
КПД гребного винта [21]	Уменьшается	Увеличивается
Неравномерность работы двигателя [21]	Увеличивается	Уменьшается
Износ цилиндровых втулок [6]	»	»

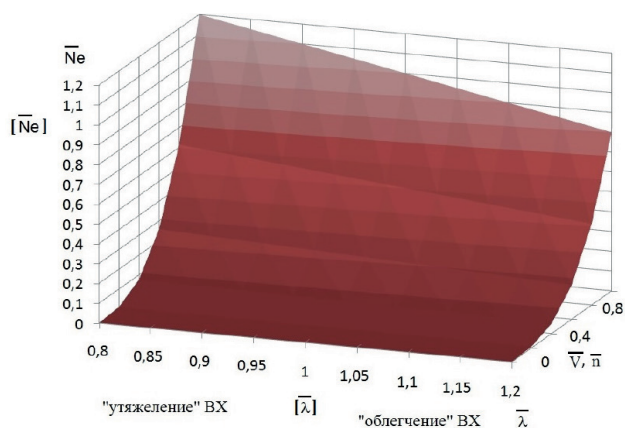
На основе данных, приведенных в таблице, можно сделать следующий вывод: *изменение взаимного расположения ВХ и ограничительных характеристик оказывает значительное влияние на тепловую и механическую напряженность двигателя*, что свидетельствует о возможности использования целенаправленного изменения взаиморасположения характеристик с целью управления теплонагруженностью двигателя. Это позволит изменить диапазон работы ГД, повысить ресурс деталей и приведет к повышению топливной экономичности.

Для обобщения полученных результатов используем параметр «относительная поступь гребного винта» λ как величину, характеризующую суммарное внешнее воздействие. Для наглядности результаты выполненного численного анализа представлены на рис. 7 в виде трехмерных графиков в относительных величинах.

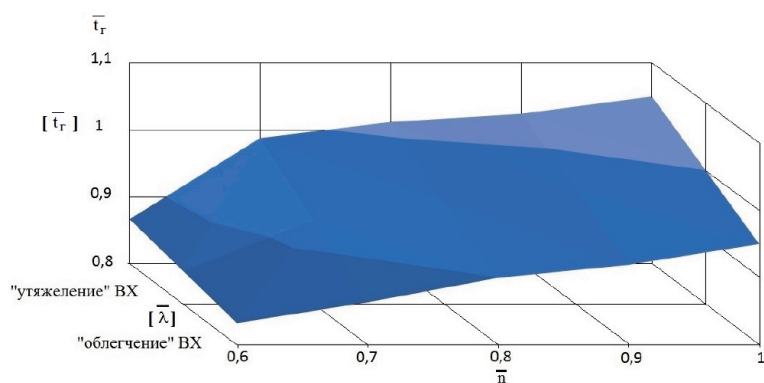
Анализ графиков, приведенных на рис. 7, позволяет утверждать, что тепломеханическая нагруженность ГД может быть снижена двумя способами: изменением частоты вращения двигателя и / или изменением относительной поступи ГВ. В современных условиях эксплуатации снижение тепломеханической нагруженности двигателя достигается на следующих этапах:

- на этапе проектирования за счет доработки ГВ (изменение относительной поступи);
- на этапе эксплуатации за счет регулятора частоты вращения (управление частотой вращения в зависимости от режима работы).

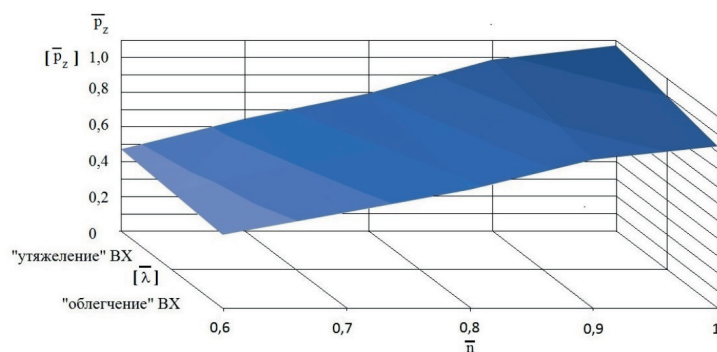
а)



б)



в)



г)

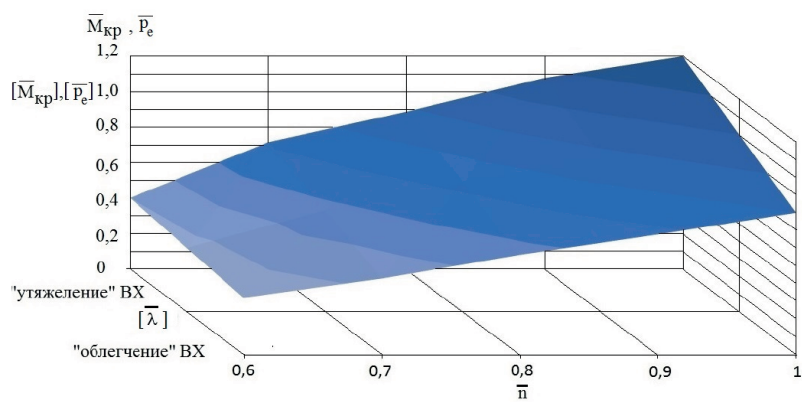


Рис. 7. Трехмерные графики: а — зависимости мощности, потребляемой ГВ, от относительной поступи ГВ λ , скорости судна V и частоты вращения ГВ n ; б — зависимости температуры отработавших газов t_r от вида ВХ и частоты вращения ГД n ; в — зависимости максимального давления сгорания p_z от вида ВХ и частоты вращения ГД n ; г — зависимости момента сопротивления вращению гребного винта $M_{кр}$ и среднего эффективного давления p_e от вида ВХ и частоты вращения ГД n

Все это позволяет предотвратить перегрузку ГД по частоте вращения и зависящим от нее параметрам. Недостатком данного способа является снижение частоты вращения ГД, изменение скорости судна и расхода топлива на милю пройденного пути. Для снижения влияния внешних условий с целью предотвращения перегрузки ГД требуется разработка методов или средств коррекции параметров ГВ в эксплуатации. Это позволит обеспечить сохранение оптимальной тепло-механической нагруженности двигателя и даст возможность сохранить расход топлива на милю пройденного пути.

Применение системы струйной подачи воды через щелевую насадку, установленную на входной кромке подсасывающей поверхности лопасти [22], позволяет искусственно изменять взаиморасположение винтовой и ограничительных характеристик. Это дает возможность управлять параметрами тепловой и механической напряженности путем «облегчения» или «утяжеления» винтовых характеристик ГД. На рис. 7 показаны изменения параметров теплонагруженности двигателя при «облегчении» ВХ. При этом достигается ограничение влияния внешних условий на эксплуатационные показатели ГД на всех режимах эксплуатации.

Обсуждение (Discussion)

Выполним оценку влияния струйного воздействия дополнительной воды, подаваемой на лопасти ГВ, при ухудшении внешних условий. Для примера рассмотрим работу двигателя 7S70MC (см. рис. 1) в условиях, соответствующих 10 %-му «утяжелению» ВХ (мощность, потребляемая ГВ, для достижения той же скорости движения судна возросла на 10 %). Главный двигатель, работая по действительной ВХ, развивает цилиндровую мощность 1300 кВт при 118 об/мин. При утяжелении ВХ и повышении гидродинамического момента сопротивления затраты мощности возрастают на 10 % при постоянной частоте вращения. Наблюдается перегрузка двигателя по p_z на 12 %, по $M_{кр}$ на 6 %, по p_e на 6 %, по t_r на 15 %. Для предотвращения перегрузки двигателя по параметрам тепловой и механической напряженности регулятор частоты вращения снижает цикловую подачу топлива.

После снижения регулятором цикловой подачи топлива частота вращения падает до 75 % номинальной, параметры тепловой и механической напряженности не превышают максимальные. При этом их средние значения завышены и составляют: p_z — 100 %, $M_{кр}$ — 100 %, p_e — 82 %, t_r — 100 %. Удельный эффективный расход топлива увеличился на 1 %, что на фоне снижения скорости судна приводит к перерасходу топлива на милю пройденного пути.

Подача дополнительной воды на лопасти гребного винта позволит ограничить перегрузку двигателя по максимальному давлению сгорания, крутящему моменту и температуре отработавших газов. Это обеспечивает ограничение перегрузки ГД по показателям: p_z до 103 %, $M_{кр}$ — до 100,5 %, p_e — до 103 %, t_r — до 105 %, без изменения частоты вращения. Дальнейшее снижение тепломеханической нагруженности ГД достигается незначительным изменением частоты вращения. При этом падение частоты вращения до 95 %, вместо 75 % от номинальной, не приведет к возрастанию удельного расхода топлива и будет достигнуто минимальное изменение расхода топлива на милю пройденного пути.

Заключение (Conclusion)

В результате оценки параметров тепловой и механической напряженности двигателя, работающего по ненормальной ВХ, качественно показана возможность ограничения влияния внешних условий на показатели работы ГД. Показано, что подача дополнительной воды на лопасти ГВ позволяет целенаправленно изменять взаиморасположение винтовой и ограничительных характеристик, что позволит ограничить опасность перегрузки двигателя по показателям тепловой и механической напряженности следующим образом:

- за счет ограничения изменения частоты вращения;
- за счет снижения гидродинамического момента сопротивления;
- за счет изменения относительной поступи ГВ.

На основании изложенного сформулируем основные преимущества ГД, работающего на ГВ фиксированного шага, оборудованного щелевой насадкой подачи дополнительной воды на лопасти:

- возможность обеспечить постоянную теплонапряженность ГД при изменении внешних условий эксплуатации путем ограничения их влияния;
- возможность оптимизировать режим работы двигателя, ограничив его перегрузку по тепловой и механической напряженности для поддержания требуемых параметров (скорости судна, расхода топлива на миль пройденного пути).

«Облегчение» ВХ в условиях эксплуатации позволяет наиболее полно использовать мощность двигателя без обязательной корректировки конструктивного шага ГВ. При этом снижается опасность перегрузки ГД при изменении внешних условий эксплуатации по показателям тепловой и механической напряженности.

Гребному винту со щелевой насадкой дополнительной подачи воды на лопасти [23] свойственны следующие недостатки, которые компенсируются следующими эксплуатационными преимуществами:

- более сложная конструкция и более высокая стоимость изготовления и ремонта компенсируются увеличением межремонтного периода эксплуатации;
- расход фильтрующих элементов в связи с высокими требованиями к качеству подаваемой воды компенсируется долговечностью и надежностью конструкции, сохранением проектных параметров гребных винтов в течение всего периода эксплуатации судна.

Таким образом, применение дополнительного струйного воздействия воды, подаваемой на лопасти гребного винта, позволяет снизить влияние внешних условий на тепломеханическую нагруженность главного двигателя и реализовать новые методы управления ГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченко А. А. Повышение качества проектирования и эксплуатации дизельных установок судов внедрением математического моделирования их рабочего процесса / А. А. Иванченко, Ю. В. Тамбовский // Транспортное дело России. — 2017. — № 5. — С. 169–173.
2. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — Кн. III. — 412 с.
3. Zhao F. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation / F. Zhao, W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, and S. K. Chou // Applied Energy. — 2016. — Vol. 161. — Is. C. — Pp. 124–132. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.022.
4. Molland A. F. Propeller Characteristics / F. A. Molland, S. R. Turnock, D. Hudson // Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. — 2nd ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2017. — Pp. 277–312. DOI:10.1017/9781316494196.014
5. Дитятев С. Г. Исследование изменений винтовой характеристики судового малооборотного дизеля в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.05 — судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) / С. Г. Дитятев. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1984. — 295 с.
6. Возницкий И. В. Двигатели модельного ряда МС 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / И. В. Возницкий. — М.: Моркнига, 2008. — 260 с.
7. S70MC Project guide [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/> (дата обращения: 01.09.2018).
8. Geertsma R. W. Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification / R. W. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, M. A. Loonstijn, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 206. — Pp. 1609–1631. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.103.
9. Шаратов А. С. Струйное воздействие на динамику гребного винта / А. С. Шаратов // Вісник двигунобудування. — 2010. — № 2. — С. 82–85.
10. Carlton J. S. Propeller Performance Characteristics / J. S. Carlton // Marine Propellers and Propulsion. — 3rd ed. — Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd., 2012. — Pp. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.

11. Banawan A. A. Prediction of the fuel saving and emissions reduction by decreasing speed of a catamaran / A. A. Banawan, M. Mosleh, I. S. Seddiek // *Journal of Marine Engineering & Technology*. — 2013. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 40–48. DOI: 10.1080/20464177.2013.11020287.
12. Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B&W 7s70MC. — Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1995. — 15 p.
13. Basic Principles of Ship Propulsion [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship/> (дата обращения: 01.09.2018).
14. Расчетная программа CEAS Engine Calculations [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (дата обращения: 01.09.2018).
15. Безюков О. К. Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103.
16. Гиттис В. Ю. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей / В. Ю. Гиттис, В. Л. Бондаренко, Т. П. Ефимов. — М.: Транспорт, 1965. — 376 с.
17. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Дизели 6Ч(СП) 18/22, 6ЧН(СП) 18/22. — М.: Внешторгиздат. — Изд. № 883Н. — 80 с.
18. Taskar B. The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships / B. Taskar, K. K. Yum, S. Steen, E. Pedersen // *Ocean Engineering*. — 2016. — Vol. 122. — Pp. 262–277. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.034.
19. Иванченко А. А. Проблемы эксплуатации судов с дизельными установками нового поколения и задачи по их совершенствованию / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2014. — № 5 (27). — С. 26–33.
20. Мясников Ю. Н. Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и безопасной эксплуатации морского судна: монография / Ю. Н. Мясников, А. М. Никитин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 136 с.
21. Орехов С. Н. Улучшение топливной экономичности судового двигателя на эксплуатационных режимах при увеличении максимального давления цикла / С. Н. Орехов, К. Ю. Перов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. — 2010. — № 1 (78). — С. 81–86.
22. Осовский Д. И. Исследование гидродинамических характеристик гребного винта, оборудованного струйной механизацией в гидродинамической трубе / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов // *Рыбное хозяйство Украины: научно-производственный журнал*. — 2007. — № 6. — С. 37–38.
23. Пат. 46740 Украина, МПК В63Н 1/00. Конструкция механизированного гребного винта / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов; заяв. и патентообл. Керченский государственный морской технологический университет. — № 200903725; заявл. 16.04.2009; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. — 4 с.

REFERENCES

1. Ivanchenko, A., and Y. Tambovskii. “Improving the quality of design and operation of diesel vessel installations by introducing the mathematical modeling of their working process.” *Transport business of Russia* 5 (2017): 169–173.
2. *Mezhdunarodnaya Konventsia po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MARPOL-73/78)*. Kn. III. SPb.: AO «TsNIIMF», 2017.
3. Zhao, F., W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, and S. K. Chou. “Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation.” *Applied Energy* 161.C (2016): 124–132. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.022.
4. Molland, A., S. Turnock, and D. Hudson. “Propeller Characteristics.” *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 277–312. DOI:10.1017/9781316494196.014.
5. Dityatev, S.G. Issledovanie izmenenii vintovoi kharakteristiki sudovogo malooborotnogo dizelya v ekspluatatsii. PhD diss. L.: LVIMU im. adm. S.O. Makarova, 1984.
6. Voznitskii, I. V. *Dvigateli model'nogo ryada MC 50 – 98. Konstruktsiya, ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie*. M.: Morkniga, 2008.

7. S70MC Project guide. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/>>.
8. Geertsma, R. W., R. R. Negenborn, K. Visser, M. A. Loonstijn, and J. J. Hopman. "Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification." *Applied Energy* 206 (2017): 1609–1631. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.09.103.
9. Sharatov, A.S. "Struinoe vozdeistvie na dinamiku grebnogo vinta." *Visnik dvigunobuduvannya* 2 (2010): 82–85.
10. Carlton, J. S. "Propeller Performance Characteristics." *Marine Propellers and Propulsion*. Third edition. Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd., 2012. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.
11. Banawan, A. A., M. Mosleh, and I. S. Seddiek. "Prediction of the fuel saving and emissions reduction by decreasing speed of a catamaran." *Journal of Marine Engineering & Technology* 12.3 (2013): 40–48. DOI: 10.1080/20464177.2013.11020287
12. *Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B & W 7s70MC*. Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1995.
13. Basic Principles of Ship Propulsion. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship/>>.
14. CEAS Engine Calculations. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas/>>.
15. Bezyukov, O.K., V.A. Zhukov, and V.N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103
16. Gittis, V.Yu., V.L. Bondarenko, and T.P. Efimov. *Teoreticheskie osnovy ekspluatatsii sudovykh dizelei*. M.: Transport, 1965.
17. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. Dizeli 6Ch(SP) 18/22, 6ChN(SP) 18/22*. Izd. № 883N. M.: Vneshtorgizdat.
18. Taskar, B, K. K. Yum, S. Steen, and E. Pedersen. "The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships." *Ocean Engineering* 122 (2016): 262–277. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.034
19. Ivanchenko, A. A., and I. A. Schennikov. "Ship operating problems with the new generation of diesel engines and objectives for their improvement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 26–33.
20. Myasnikov, Yu.N., and A.M. Nikitin. *Kharakteristiki propul'sivnogo kompleksa v probleme obespecheniya energoeffektivnoi i bezopasnoi ekspluatatsii morskogo sudna: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016.
21. Orekhov, S.N., and K.Yu. Perov. "Uluchshenie toplivnoi ekonomichnosti sudovogo dvigatelya na ekspluatatsionnykh rezhimakh pri uvelichenii maksimal'nogo davleniya tsikla." *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie* 1(78) (2010): 81–86.
22. Osovskii, D.I., and A.S. Sharatov. "Issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik grebnogo vinta, oborudovannogo struinoi mekhanizatsiei v gidrodinamicheskoi trube." *Rybnoe khozyaistvo Ukrainy: nauchno-proizvodstvennyi zhurnal* 6 (2007): 37–38.
23. Oowski, D.I., and A.S. Sharatov. UA46740U, IPC B63H 1/00. Konstruktsiya mekhanizirovannogo grebnogo vinta. Ukraine assignee. Publ. 1 Jan. 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шаратов Алексей Сергеевич — инженер-механик 1 категории
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309, Российская Федерация,
Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: seykgmtu@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sharatov, Aleksei S. — Mechanical engineer of 1 category
Kerch State Maritime Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch,
298309, Republic of Crimea,
Russian Federation
e-mail: seykgmtu@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*