

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

### EVALUATION OF THE TECHNICAL LEVEL OF QUALITY MARINE ENGINE

В статье приводится оценка уровня качества отечественного и зарубежного двигателя, определяется перечень и значение единичных показателей качества, которые сопоставляются с базовыми значениями. В статье оценивается технический уровень двигателя и выполняется сопоставление по его единичным показателям качества, которые характеризуют техническое совершенство двигателя.

Тема актуальна, однако кроме рассмотренных вариантов целесообразно было бы рассмотреть взаимозаменяемый вариант оценки серийного двигателя, выпускаемого промышленностью, в качестве базовых принять среднестатистические показатели большого числа современных дизелей. Они позволяют оценить уровень нового двигателя с точки зрения мирового судостроения и сделать вывод о целесообразности дальнейшего его выпуска. При проектировании новых двигателей базовые значения, выбираемые для сравнения, должны определяться прогнозированием развития дизеля данного класса на несколько лет вперед. В статье для сравнительной оценки используется обобщенный показатель качества (интегральный и комплексный). В отечественной практике применяется одновременное сопоставление двигателя с перспективным образцом и показателями двигателей, установленными Государственным стандартом. Оценка технического уровня дизелей производилась с помощью приведенной номенклатуры показателей.

The paper presents an evaluation of the quality level of domestic and foreign motor, determines the list and the value of individual quality indicators, which are compared with the baseline values. The paper evaluated the technical level of the engine, where the comparison is performed only on the single indicators of quality that characterize the technical excellence of the engine. Topic is relevant, however, in addition to the options considered it would be appropriate to consider the evaluation version of interchangeable production engine, commercially available as a base to take the average performance of a large number of modern diesel engines. They allow you to assess the level of the new engine in terms of the global shipbuilding and conclude the feasibility of further release it. Obviously the design of new engines baseline values selected for comparison must be determined for forecasting the development of the diesel class for several years ahead. In an article for the comparative evaluation using a generalized indicator of quality (integral and complex). In domestic practice, a simultaneous comparison of the engine with a promising model and engine parameters established by government standards. Evaluation of the technical level diesels made using the above nomenclature indicators.

**Ключевые слова:** технический уровень качества дизеля, классификационный показатель, коэффициент весомости, метод экспертных оценок.

**Key words:** technical quality of the engine, classification index, weighting factor, the method of expert estimates.

**II** ЕРЕХОД промышленности на производство высокодорсированных дизелей, отличающихся значительным усложнением систем и высоким уровнем тепловой и механической напряженности основных деталей, а также жесткие требования рынка к их качеству, темпам его улучшения, обеспечению надежности и эффективности их эксплуатации ставят в число наиболее актуальных задач проблему управления качеством принимаемых решений на всех этапах их жизненного цикла. Сложность конструкции судового двигателя, большое количество узлов и агрегатов, подлежащих контролю, приводит к тому, что в настоящее время расходы на поддержание технической готовности судового двигателя в пять – десять раз превосходят затраты на его производство и, несмотря на внедрение новых технологий в производстве, в условиях эксплуатации решение проблемы обеспечения их качества еще далеко от совершенства. В распоряжении специалистов уже имеются отдельные алгоритмы оценки качества судовых дизелей на различных этапах их жизненного цикла, однако комплексно рассматриваемая проблема в специальной литературе до настоящего времени не нашла широкого отражения.

Решение проблемы требует разработки совокупности косвенных показателей, значение которых определяет техническое совершенство двигателя, требует создания специальных методик, базирующихся на теории подобия, статистических, математических и физических моделях и позволяющих прогнозировать конструктивные и эксплуатационные характеристики дизельной энергетической установки судна на всех этапах жизненного цикла дизеля. Разработка такого обобщающего подхода к оценке качества судовых дизелей, от выбора исходных данных при проектировании до выбора наиболее рациональных технологий их технического обслуживания и ремонта, представлена в работах [1] – [10]. В настоящей статье обобщены имеющиеся наработки и предложен объективный подход к оценке технического уровня качества судового двигателя.

В проблемно-ориентированной научной литературе [2] – [5] для решения подобного рода задач рассматривают различные наборы показателей качества, рекомендуя при этом для сравнительных исследований использовать комплексный показатель качества продукции, вычисленный методом среднего взвешенного:

$$\Pi_0 = \sum_{j=1}^z m_j g_j, \quad (1)$$

где  $m_j$  — коэффициент весомости показателя  $g_j$ ;  $g_j$  — показатель  $j$ -го свойства оцениваемого двигателя;  $Z$  — число учитываемых свойств.

Коэффициент весомости показателя качества при таком подходе оценивает значимость данного показателя среди остальных. Значения определяются методом экспертных оценок или на основе анализа влияния данного показателя качества на технико-экономическую эффективность двигателя. При этом

$$\sum_{j=1}^z m_j = 1, \quad (2)$$

где  $m$  — количество оценочных показателей.

При рассматриваемом подходе к оценке качества серийного двигателя, выпускаемого промышленностью, в качестве базовых обычно принимаются среднестатистические показатели большого числа современных дизелей. Они позволяют оценить уровень нового дизеля с точки зрения мирового дизелестроения и сделать вывод о целесообразности дальнейшего его выпуска. Очевидно, что при проектировании нового дизеля базовые значения, выбираемые для сравнения, должны определяться прогнозированием развития дизелей данного класса на 8 – 12 лет вперед.

В отечественной практике [2], [5], [11] применяется одновременное сопоставление дизелей с перспективным образцом и показателями двигателей, установленными государственным стандартом.

При оценке уровня качества двигателя определяются относительные единичные показатели качества:

$$g_j = \Pi_j / \Pi_{j6} \quad (3)$$

или

$$g_j = \Pi_{j6} / \Pi_j, \quad (4)$$

где  $\Pi_j$  — единичный показатель  $j$ -го свойства;  $\Pi_{j6}$  — то же базовое значение.

Для показателей  $\Pi_j$ , снижающихся при повышении уровня качества (например, удельного расхода топлива), используется формула (3). Если с улучшением качества показатель растет (например, ресурс до первой переработки), то используется формула (4) [1], [4], [5], [11] – [14].

Таким образом, если  $g_j > 1$ , то  $j$ -е свойство дизеля изменилось в лучшую сторону по сравнению с базовым.

Когда при оценке уровня качества или технического уровня дизеля важно значение каждого показателя  $g_j$ , уровень считается ниже базового, если хотя бы один из относительных единичных показателей качества окажется меньше единицы [4], [15]. В остальных случаях при оценке

используется обобщенный показатель [1], [12]. Последний может быть выражен главным относительным единичным показателем качества (например, отношением удельных расходов топлива), интегральным и комплексным показателем качества [3], [4], [12].

В качестве примера использования описанной методики рассмотрим процедуру государственной аттестации, при которой оценка технического уровня дизелей производится с помощью приведенной номенклатуры показателей [5], [11], [16], [17] (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Оценка технического уровня дизеля по показателям качества**

Показатель качества	Коэффициент весомости
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	0,267
Удельный расход масла на угар, г/(кВт·ч)	0,267
Ресурс до первой переработки, тыс. ч	0,201
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	0,134
Удельная материалоемкость, кг/(кВт·ч)	0,083
Удельная энергонасыщенность, кг/(кВт·ч)	0,148

Таблица 2

**Оценка технического уровня дизелей по классификационным показателям**

Наименование отдельных показателей качества	Дизель		$g_j$
	6ЧНСП 18/22	6НС11 16/16,5	
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	211	211	1,0
Удельный расход масла на угар, г/(кВт·ч)	1,36	1,63	1,2
Ресурс до первой переработки, тыс. ч	12,0	10,0	1,2
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	45,0	40,0	1,125
Удельная материалоемкость, кг/(кВт·ч)	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-3}$	0,66
Удельная энергонасыщенность, кг/(кВт·ч)	1720	596	0,66

Приведем в качестве примера оценку технического уровня дизеля 6ЧНСП 18/22 ( $P_e = 165$  кВт,  $n = 750$  об/мин), сопоставив его с зарубежным дизелем 6НС11 16/16,5 ( $P_e = 185$  кВт,  $n = 1000$  об/мин), имеющим близкие классификационные показатели ( $P_e$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $d$ ).

Как видно из таблиц, сравниваемый дизель по трем показателям лучше аналога, по двум хуже. По удельному расходу топлива двигатели равнозначны. В соответствии с выражением (1) для дизеля 6ЧНСП 18/22

$$\Pi_0 = 0,267 \cdot 1 + 0,267 \cdot 1,2 + 0,201 \cdot 1,2 + 0,234 \cdot 1,125 + 0,83 \cdot 0,66 + 0,048 \cdot 0,663 \approx 1,066. \quad (5)$$

Вместе с тем, в рассмотренном подходе основное внимание уделяется признакам, характеризующим конструкцию дизеля, не уделяя должного внимания признакам, характеризующим требования потребителя, производственные и кадровые возможности предприятия-изготовителя, предприятия, осуществляющего сервисное и техническое обслуживание, а также судоремонтного предприятия. Поэтому, хотя рассмотренная методика оценки технического уровня качества судового двигателя обладает по сравнению с другими существующими методиками рядом преимуществ: простотой использования и компактностью, независимостью от режима работы двигателя, возможностью применения для различных типов двигателя), отмеченные недостатки потребовали рассмотрения и других подходов.

С целью решения упомянутых задач рядом авторов предпринята попытка при сопоставлении множества взаимозаменяемых вариантов расширить перечень оценочных показателей, характеризующих то или иное свойство изделия. При этом показатели формулируются так, чтобы с их

улучшением улучшался и общий технико-экономический уровень решения. Примеры оценочных классификационных показателей: надежность, бесшумность, долговечность, ремонтопригодность и др. [1], [12].

Для каждого большого показателя разбивается большая шкала с 4,5 или 10 градациями. Например:

- отлично (очень высокий уровень качества) — от 8 до 10;
- хорошо (выше среднего уровня) — от 5 до 8;
- удовлетворительно (ниже среднего уровня) — от 5 до 3;
- удовлетворительно — от 3 до 2;
- плохо (неприемлемый уровень качества) — ниже 2 баллов.

Если свойство можно количественно измерить параметрами, последний также переводится в баллы:

$$U = (X - X_m)/(X_b - X_m) \cdot U_b, \quad (6)$$

где  $U$  — балльная оценка  $X$ -параметра;  $X_m$ ,  $X_b$  — соответственно нижнее и верхнее предельное значение параметра в натуральных единицах;  $U_b$  — верхний предел балльной шкалы.

Метод экспертных экономических оценок рекомендуется авторами в тех случаях, когда одни виды затрат по вариантам (например, затраты на изготовление) поддаются расчету, а другие виды затрат (например, эксплуатационные издержки) из-за ограниченности информации невозможно объективно оценить [1], [12]. В таком случае рекомендуется перечень оценочных показателей, которые характеризуют факторы, влияющие только на оцениваемый вид затрат. Например, если нужно оценить эксплуатационные издержки, рекомендуются такие показатели как ремонтопригодность, безотказность, долговечность, энергетический КПД и т.д. Критерии формулируются так, чтобы они однозначно влияли на оцениваемые затраты. Правила построения шкал и значение коэффициентов весомости применяется аналогично правилам, рассмотренным ранее. Для каждого варианта рассчитывается совокупный показатель качества (полезности)

$$Q = \sum_{i=1}^m U_i \cdot V_i. \quad (7)$$

Величина затрат находится по показателю качества с помощью стоимостного множителя, показывающего «цену» одного балла. Например, переменные эксплуатационные издержки, снижающиеся с ростом показателя  $Q$ , рассчитываются

$$U = U_b (Q_{\max} - Q), \quad (8)$$

где  $U_b$  — удельные эксплуатационные издержки, приходящиеся на один балл (стоимостной множитель);  $Q_{\max}$  — максимальный уровень показателя качества «эталонного» решения.

Стоимостные множители (руб./балл) определяются и нормируются на основе статистического анализа данных об экономических показателях известных аналогичных конструкций [14], [18]. Для оценок эксплуатационных показателей формируется группа экспертов. Основные требования к экспертам — это компетентность и независимость суждений.

В работах [6], [7] – [9], [19] и др. в основу разработки методики оценки качества судового дизеля положено использование прямых и экспертных оценок с их последующей математической обработкой с использованием функции Харрингтона. Такой подход требует рассмотрения и решения следующих частных задач:

- анализа особенностей функционирования судового дизеля как сложной технической системы на всех этапах его жизненного цикла, его элементной базы как параметра системы;
- выбора его математической модели качества;
- научного обоснования и разработки методики оценки;
- выбора наиболее рациональных конструкторских решений на этапе проектирования, технологий их эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Учитывая многообразие комплектующих узлов и деталей дизеля, многообразие существующих технологий, применяемых при их изготовлении, техническом обслуживании и ремонте, а также тесную связь с другими параметрами системы (многообразием марок двигателей, комплектаций на их основе дизельных установок, проектов судов, судостроительных и судоремонтных верфей и т. п.), уровень качества дизеля на каждом этапе функционирования как параметр системы может быть представлен в виде функции пяти аргументов [6], [9], [19], [20]:

$$УКД = f(\varepsilon, \mathcal{E}, K, T, \Pi), \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  — экологическая эффективность конструкции, зависящая от его комплектации и использованной технологии нейтрализации  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH$ , сажи и других вредных веществ, типа катализатора и его носителя и т. д.;  $\mathcal{E}$  — экономичность конструкции, зависящая от комплектации двигателя, использующихся технологий при их изготовлении, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте и др.;  $K$  — конструктивные особенности двигателей, их габаритов, массы, объемов;  $T$  — технологичность изготовления, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта двигателя, определяющая возможность применения доступных материалов и оборудования;  $\Pi$  — производственные трудозатраты на изготовление, монтаж, техническое обслуживание и ремонт.

Многочисленность коэффициентов и показателей, характеризующих уровень качества дизеля как параметра системы, и отсутствие достоверной информации по каждому из них делает выбор инженерных решений на каждом этапе жизненного цикла для оптимального функционирования системы более высокого уровня чрезвычайно сложным. Поэтому важное место в работе уделено разработке и реализации методики оценки и выбора инженерного решения на основе решения задачи «черного ящика», выбору математической модели и параметров, характеризующих ее.

В общем виде рассматриваемая кибернетическая система «черного ящика» с зависимостью  $УКД = f(\varepsilon, \mathcal{E}, K, T, \Pi)$  в основе схематично представлена на рис. 1 и включает входы



Рис. 1. Кибернетическая система «черного ящика»

и выходы. Причем, каждому уровню входов отвечают определенные значения выходов, которые через соответствующие потенциалы  $D_{CBj}$  оценивают уровень сравниваемых инженерных решений по двигателю. В качестве одного из основных вопросов описания функционирования рассматриваемой системы является введение количественной характеристики уровня качества в виде числа, которое давало бы возможность оценить ее в целом. Такое число должно

но количественно характеризовать, насколько эффективно она обеспечивает достижение целей системы.

Анализ сущности показателей качества, математических моделей, методик ее оценки и выбора позволил принять в качестве целевой функции рассматриваемой технической системы зависимость

$$D_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_{ij}^\lambda} \quad (10)$$

или при поэтапной комплексной оценке на всех этапах жизненного цикла —

$$D_{jk} = \sqrt[n_k]{\prod_{i_k=1}^{n_k} d_{ijk}}, \quad (11)$$

где  $D_j$ ,  $D_{jk}$ ,  $d_{ij}$ ,  $d_{ijk}$  — безразмерные числа (потенциалы), характеризующие рассматриваемую техническую систему по всем показателям с учетом их веса,  $j$ -е инженерное решение по комплексу

показателей и  $i$ -й показатель  $j$ -го инженерного решения;  $n$  и  $n_k$  — показатели в комплексе;  $\lambda$  — шкалирующий коэффициент, учитывающий вес  $i$ -го показателя.

Качественные и количественные показатели  $y_j$ , характеризующие техническую систему, определены исследователями, их численные значения могут определяться путем экспертного опроса с присвоением соответствующих баллов.

Перевод значений показателей в безразмерные числа может осуществляться с помощью номограммы, построенной на основе кривой желательности Харрингтона по уравнению

$$d_{ij} = \exp \left[ - \left( e^{-Y_{ij}} \right) \right], \quad (12)$$

где  $Y_{ij}$  — безразмерная величина  $i$ -го показателя, характеризующего  $j$ -ю технологию, линейно связанная с соответствующим натуральным показателем  $Y_{ij}$ , определяемым по формуле

$$Y_{ij} = 2m \frac{(Y_i - 0,8Y_{i\min})}{(Y_{i\max} - 0,8Y_{i\min})} - m, \quad (13)$$

где  $Y_{i\max}$ ,  $Y_{i\min}$  — соответственно максимальное и минимальное численные значения  $Y_i$ ;  $m$  — предел изменения кривой желательности по оси абсцисс, начиная от нуля.

Если численное значение  $Y_{i\max}$  соответствует наименее приемлемому уровню данного показателя, то знак при  $Y'_i$  нужно изменить на противоположный.

Кривая желательности может быть принята следующей:

- при  $d = 1,00$  — уровень значений показателя  $Y_i$ , обеспечивающий максимально возможный положительный эффект при внедрении технологии;
- при  $1,00 < d < 0,80$  — реально достигнутый наибольший положительный эффект;
- при  $0,80 < d < 0,60$  — допустимый и довольно высокий уровень показателя  $Y_i$ ;
- при  $0,60 < d < 0,37$  — допустимый и достаточный уровень показателя  $Y_i$ ;
- при  $0,37 < d < 0$  — реально достигнутый наихудший уровень показателя  $Y_i$ ;
- при  $d = 0$  — сравниваемая технология заведомо неприемлема для практической реализации.

При этом для множества взаимозаменяемых вариантов составляется перечень оценочных показателей, характеризующих то или иное свойство изделия. Показатели должны формулироваться так, чтобы с их улучшением улучшался и общий технико-экономический уровень решения.

В работах [9], [10] рассматриваемая кибернетическая модель определения технического облика вновь создаваемого судового дизеля общем виде представлена в виде функции трех групп аргументов: целевых, конструктивных и эксплуатационных факторов, на основе которых происходит синтез вариантов конструкции дизеля. Анализ математических моделей, методик оценки и выбора наиболее рациональных решений позволил авторам принять в качестве функции оценки качества зависимости, широко используемые в квалиметрии. С целью получения данных, лежащих в основе методики, выполнены исследования по выбору признаков оценивания технического облика дизелей.

Основные параметры, характеризующие конструкцию и эксплуатационную эффективность дизеля на этапе его проектирования приняты на основе работ ведущих ученых: среднее эффективное давление —  $p_{me}$ ; удельный расход топлива —  $b_e$ ; удельная масса двигателя —  $m_{уд}$ ; скорость поршня —  $c_m$ ; цилиндровая мощность —  $P_u$ ; обороты коленчатого вала —  $n$ ; отношение хода поршня к диаметру цилиндра —  $s/d$ ; степень сжатия —  $\varepsilon$ ; степень повышения давления —  $\lambda$ ; максимальное давление сгорания —  $p_{max}$ ; максимальная среднемассовая температура цикла —  $T_{max}$ ; температура отработавших газов —  $T_g$ .

В ходе исследований пределы изменения выбранных параметров рассматривались в границах, достигнутых для современных высокооборотных судовых дизелей. Приняты конструктивные ограничения:  $s/d$  — от 1,1 до 1,26;  $\varepsilon$  — в пределах 12 — 16. В качестве параметров, косвенно характеризующих тепловую и механическую напряженность судового двигателя в эксплуатационных условиях, рассматривались:  $c_m$  — в диапазоне 10 — 13 м/с;  $p_{max}$  — в диапазоне 15 — 23 МПа;  $\lambda$  — в пределах от 1,05 до 1,3;  $T_{max}$  и  $T_g$  — соответственно в пределах до 195 К и 873 К. В каче-

стве целевых показателей в модели рассматриваются параметры, определяющие конструкцию и назначение дизеля  $P_n$ ,  $n$  и  $p_{me}$ .

Важным этапом жизненного цикла судового двигателя является этап его использования по назначению. Как правило, в эксплуатационной практике состояние эксплуатирующегося двигателя оценивается мерой утраты им работоспособности и экономичности. Обычно оценка технического состояния производится в результате «разборки» двигателя. Такие операции трудоёмки и не всегда целесообразны.

Применение средств и методов технического диагностирования в практике эксплуатации двигателей дает возможность решать задачи повышения эксплуатационного КПД и ресурса за счет поддержания высокого технического уровня ДВС и понижения затрат эксплуатации.

Разработке методики совершенствования системы технического обслуживания и ремонта судовых энергетических комплексов посвящена работа К. А. Алексеева [8]. В этой работе на основании анализа различных систем ТО, ремонта и их эволюции, а также анализа целей и задач отрасли предложена система технической эксплуатации ледоколов при ограниченных ресурсах в виде совокупности взаимосвязанных организационно-технических и технологических мероприятий и средств, необходимых и достаточных при выделенных ресурсах для получения максимальной эффективности технической эксплуатации ледоколов с наибольшим технико-экономическим эффектом. Показано, что для обеспечения необходимого качества ледоколов необходима разработка системы информационной поддержки принимаемых решений на всех этапах жизненного цикла судна: проектирования, эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и утилизации. Это требует разработки математических моделей и методов, позволяющих производить оценку качества дизельной установки в условиях эксплуатации.

Вопросы, связанные с анализом технического качества судовых дизелей в условиях эксплуатации нашли отражение в работах А. А. Обозова, В. А. Лашко, А. Ю. Конькова, А. Ю. Самойленко и др. Их анализ показывает, что в настоящее время не существует проблем при выборе параметров, описывающих состояние двигателя [2] – [4], [14]. Они подбираются, как правило, достаточно информативными, что дает возможность отнести оценку технического состояния двигателя к одному из возможных «классов диагнозов». В рассматриваемой области остается задача определения эталонной модели, позволяющей прогнозировать требуемое качество судового двигателя в любой момент его эксплуатации. Для решения указанной задачи, как правило, используются статистические модели. Некоторые авторы предлагают использовать для целей оценки и улучшения показателей качества судовых дизелей математические модели [6], [9], [20], [21].

Автор данной статьи предлагает использовать для указанных целей математическую модель численного моделирования рабочего процесса в цилиндре дизеля и смежных с ним системах «Импульс». Численное моделирование рабочего процесса как метод исследования характеризуется следующими принципами:

– описание отдельных процессов в системе двигателя осуществляется, исходя из общих теоретических положений и обобщенных эмпирических зависимостей [1], [2], [12], [14];

– реализация замкнутого моделирования на основе рассмотрения взаимосвязи отдельных процессов между собой и окружающей средой с использованием возможности получения сходящегося решения в течение нескольких циклов при произвольных начальных условиях;

– рациональное применение моделей различной сложности с учетом конкретных требований к точности решения задачи и при наличии ресурса на основе проверки адекватности моделей путем сопоставления с экспериментальными данными и сравнительных расчетов [1], [12];

– базирование на общих методологических концепциях создания автоматизированных систем различного назначения, включая интерактивный метод разработки программ на ЭВМ по унификации и преемственности модельных и алгоритмических решений, широкую автоматизацию управления ходом моделирования и выдачу результатов.

Для описания нестационарных процессов в рабочем цилиндре и выпускной системе используются квазистатистические дифференциальные уравнения энергетического и массового балан-

сов с учетом переменного состава и переменных теплоемкостей рабочего тела. Интегрирование системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов ведется методом Рунге — Кутта с переменным шагом без двойного пересчета. Обеспечение замкнутого моделирования осуществляется путём автоматической балансировки мощностей компрессора надувного воздуха и газовой турбины с учетом переменных КПД турбины и компрессора, гидравлических и тепловых потерь в газовоздушном тракте, параметров окружающей среды.

Комплексный подход к разработке общей математической модели позволяет обеспечить определение параметров и характеристик двух- и четырехтактных дизелей с различными схемами и системами воздухоснабжения. Для удобства проведения исследований моделирование номинального режима ведется с настройкой рабочего процесса и системы наддува [1], [11], [12]. При этом автоматически определяются регулировки двигателя и параметры воздухоснабжения (угол опережения впрыска топлива, сечение соплового аппарата турбины, коэффициенты гидравлических и тепловых потерь) по задаваемым значениям максимального давления сгорания, КПД турбокомпрессора давления наддува и других величин.

Полученные результаты настройки рабочего процесса используются для моделирования рабочего процесса двигателя с определением параметров системы наддува во всей области рабочих режимов, задаваемых величиной подачи топлива и чистотой вращения коленчатого вала двигателя.

### Выводы

1. Проведен обзор исследований по оценке технического уровня качества судовых двигателей, который позволил выработать рациональные методологические решения задачи качества диагностирования судовых двигателей.
2. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечены применением известных методов системного и логического анализа и синтеза и общепризнанного математического инструментария, а также подтверждены результатами проведенных исследований.
3. Приведенная методика опробована на конкретных двигателях.

### Список литературы

1. Иванченко А. А. Судовые энергетические установки, основы проектирования нестандартных судовых энергетических установок / А. А. Иванченко, И. А. Боровикова, В. И. Резниченко. — СПб.: СПГУВК, 2010.
2. Конкс Г. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. Конкс, В. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005.
3. Костылев И. И. Двойное топливо в современной судовой энергетике / И. И. Костылев, М. К. Овсянников // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 1 (71). — С. 35–39.
4. Новиков Л. А. Современные и перспективные технологии для организации малотоксичной работы двигателей / Л. А. Новиков // Двигателестроение. — 2005. — № 24. — С. 8–15.
5. Сорокин В. А., Иванов М. Ю. Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — Вып. 34. — С. 111–131.
6. Иванченко А. А. Комплексное снижение вредных выбросов дизельными установками судов речного флота: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.05 / А. А. Иванченко. — СПб., 1999.
7. Молодцов Н. С. Восстановление изношенных деталей судовых механизмов / Н. С. Молодцов. — М.: Транспорт, 1988.
8. Алексеев К. А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок ледоколов: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.08.05 / К. А. Алексеев. — СПб., 2008.
9. Щенников И. А. Прогнозирование эксплуатационных показателей дизельной энергетической установки судна на этапе проектирования ее элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / И. А. Щенников. — СПб., 2015.

10. Иванченко А. А. Методика определения и оценки технического облика судового высокооборотного дизеля / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // Двигателестроение. — 2014. — № 4 (258). — С. 10–15.
11. Дизельные и газовые двигатели: каталог. — СПб.: ООО «ЦНИДИ», 2009.
12. Боровикова И. А. Оптимизация работы судовой энергетической установки / И. А. Боровикова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 42–44.
13. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий. — М.: Морская книга, 2008.
14. Сорокин В. А. Современные условия эксплуатации судовых дизелей / В. А. Сорокин // Перспективные транспортные средства: сб. науч. тр. — 2002. — С. 196–211.
15. Ходаков Ю. С. Оксиды азота и теплоэнергетика. Проблемы и решения / Ю. С. Ходаков. — М.: ООО «ЭСТ-М», 2001.
16. Gas Engines Propulsion // Marine engineers review, IMarEST, 2003 and Dec / Jan 2005.
17. Thijssen B. Dual-Fuel-Electric LNG carriers / B. Thijssen // Proc. of the 28<sup>th</sup> Annual Event The Motor Ship Propulsion Conference. — Copenhagen, April, 2006.
18. Семенюк А. В. Энергетические установки судов для перевозки природного газа / А. В. Семенюк, С. А. Гармаш // Вестник МГУ. — 2010. — № 38. — С. 45–51.
19. Авдевин Д. Е. Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Д. Е. Авдевин. — СПб., 2003.
20. Иванченко А. А. Проблемы эксплуатации судов с дизельными установками нового поколения и задачи по их совершенствованию / А. А. Иванченко, И. А. Щенников, А. А. Иванченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 26–33.
21. Иванченко А. А. Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.

УДК 621.431:629

**В. В. Мартынов,**  
ст. преп.

## РАСЧЕТ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА ПРОГУЛОЧНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТЕПЛОХОДА «ЭРИДАН» ПР. Р19-1

### A SHIP SHAFTING TORSIONAL OSCILLATION CALCULATION OF THE PLEASURE PASSENGER SHIP «ERIDANUS» PR.R19-1

Статья посвящена вопросу безопасной работы судового валопровода. С помощью расчета крутильных колебаний производится определение рабочих безрезонансных режимов работы двигателя внутреннего сгорания, входящего в состав валопровода. Актуальность представленной статьи заключается в анализе результатов проведенных математических расчетов, на основании которых можно дать рекомендации о снижении вибрации и увеличении надежности судового валопровода, а также рекомендовать некоторые конструктивные изменения.

В работе проведен расчет основных характеристик свободных крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Эридан» проект Р19-1. Рассмотрены конструкции узлов пропульсивного комплекса судна. Описан алгоритм и приведена программа по расчету свободных