

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.432:621.45.026

**О. К. Безюков,  
О. В. Афанасьева,  
А. А. Денисова**

## ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СУДОВЫХ ТОПЛИВНЫХ РАСХОДОМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ

*В статье рассмотрена методика формирования критерия оценки технического уровня судовых контрольно-измерительных приборов на основе методов теории подобия и анализа размерностей. Рассмотрены существующие подходы к оценке технического уровня и качества судовых энергетических установок (СЭУ), судовых дизельных двигателей и контрольно-измерительных приборов (КИП), применяемых в судовой энергетике. Рассмотрены этапы построения критерия технического уровня для расходомеров. Получено критериальное уравнение, состоящее из тривиального критерия подобия, представляющего отношение двух величин с одинаковой размерностью, и критерия подобия, составленного из величин различной физической природы и размерности. Применение критериального уравнения позволит провести отбор расходомеров, обладающих высоким техническим уровнем, что будет способствовать повышению энергоэффективности СЭУ через сокращение расхода топлива и выбросов парниковых газов. Это позволит достигнуть выполнения требований Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», Технических регламентов о безопасности морского и внутреннего водного транспорта, судового плана управления энергоэффективностью (SEEMP), предложенного Международной морской организацией.*

*Ключевые слова: технический уровень, качество, квалиметрическая оценка, контрольно-измерительный прибор, теория подобия и анализа размерностей, критерий технического уровня, топливные расходомеры, судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), теплоэнергетическое оборудование.*



ФЕДЕРАЛЬНАЯ целевая программа «Развитие гражданской морской техники на 2009 – 2016 годы» предусматривает:

- сокращение общего научно-технического и технологического отставания России от передовых стран в приоритетных направлениях развития морской техники;
- снижение номенклатуры и объемов поставок из ближнего и дальнего зарубежья судового комплектующего оборудования (СКО) путем создания новых отечественных технологий в сфере судового машиностроения и приборостроения, совершенствования и развития кооперации с учетом решения вопросов импортозамещения;
- повышение конкурентоспособности гражданской морской техники (ГМТ) для внутреннего рынка и расширение возможностей по поставке российской судостроительной продукции на экспорт.

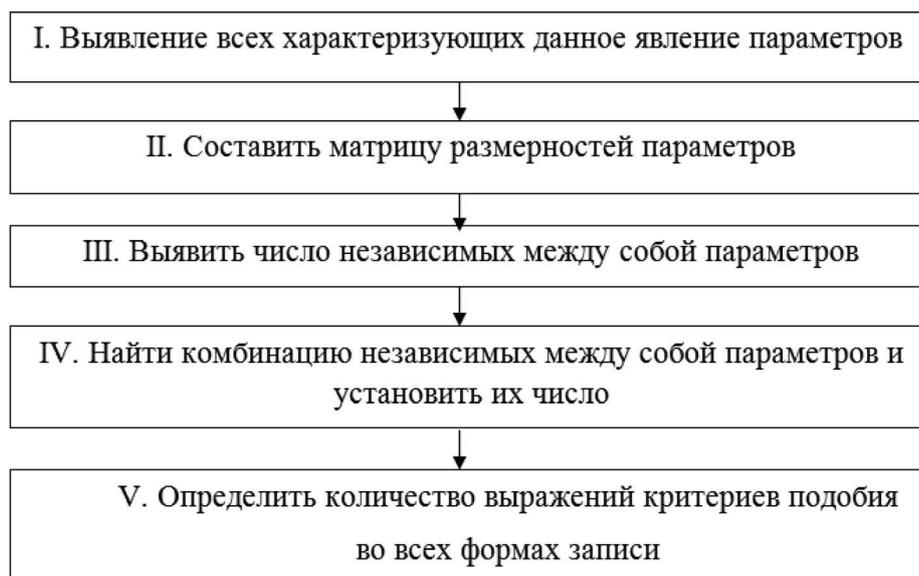
Эта задача может быть решена в полной мере только в том случае, если будет разработана методика оценки научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности судов, продукции судового машиностроения, систем автоматизации, приборостроения и др. [1], [2].

В России еще в первом десятилетии XX в. академиком А. Н. Крыловым была разработана научно обоснованная методика количественного оценивания качества, с помощью которой была решена задача выбора лучших проектов военных кораблей по совокупности их основных свойств [3]. Существенный вклад в дальнейшее развитие методов оценки научно-технического уровня и качества внесла российская научная школа квалиметрии [3], [4], которой были определены ее общие методологические принципы, разработаны основы структуризации свойств, выбора и классификации показателей качества. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию

существующих методов квалиметрической оценки приборов и разработке новых методов [5] – [10]. В частности, предложены новые критерии эффективности (конструктивно-ценовой, габаритно-весовой, критерий комплексной устойчивости датчиков физических величин), которые удобно использовать при оценке приборов, о технических характеристиках которых нет достаточной информации. Однако описанные методы оценки качества основаны в значительной мере на использовании экспертиз, проведение которых для сотен, а иногда тысяч типов контрольно-измерительных приборов (только в России зарегистрировано свыше 4500 предприятий, имеющих права на производство и ремонт средств измерения) с постоянно меняющимися техническими характеристиками требует много времени и финансовых затрат, носит субъективный характер, и поэтому, чаще всего, не находит практического применения.

В 20 и 30-е гг. прошлого столетия были предложены аналитические (неэкспертные) методики оценки качества, преимуществами которых является малая трудоемкость, большая надежность итоговых результатов, а недостатками — относительная технологическая сложность разработки критериев и методик оценивания качества [3]. Упростить процесс оценки качества приборов можно на основе методов теории подобия и анализа размерностей [11], [12], которые используются для определения вида формул, выражающих зависимость между физическими величинами в изучаемых явлениях. Особенностью теории подобия и анализа размерностей является то, что они позволяют осуществлять замещение множества отдельных параметров совокупностью критериев, тем самым достигается увеличение степени общности полученного результата без потери содержащейся в ней информации.

Заметим, что теория подобия и анализ размерностей широко используются не только при исследовании газодинамики, теплообмена, но и при решении задач, связанных с прогнозированием ресурса работы механизма и её элементов, их безотказности, долговечности и безопасности, для анализа вибраций, определения технического уровня и качества судов, дизельных и газотурбинных двигателей [13] – [19]. В основе данного метода лежит  $\pi$ -теорема, которая даёт возможность определить количество критериев подобия, характеризующих конкретное явление и сводится к составлению и решению уравнений размерностей [11], [12], [17]. На рисунке представлен общий алгоритм получения критериев подобия методом анализа размерностей.



Алгоритм получения критериев подобия методом анализа размерностей [17]

Из алгоритма, представленного на рисунке, видно, что для определения критериев с помощью  $\pi$ -теоремы необходимо, прежде всего, выявить все те параметры  $P_1, \dots, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m$ , которые характеризуют данное явление, и, следовательно, установить их число, т. е.

$$\left. \begin{aligned} [P_1] &= [A_1^{\alpha_1} A_2^{\beta_1} \dots A_n^{\xi_1}]; \\ [P_2] &= [A_1^{\alpha_2} A_2^{\beta_2} \dots A_n^{\xi_2}]; \\ &\dots \\ [P_m] &= [A_1^{\alpha_m} A_2^{\beta_m} \dots A_n^{\xi_m}]. \end{aligned} \right\}$$

Дальше следует ряд последовательных этапов, а именно: составление матрицы размерностей параметров; выявление числа  $k$  независимых между собой параметров; нахождение комбинаций независимых между собой параметров и установление их числа, т. е. числа форм записи; определение выражений  $m - k$  критериев подобия во всех формах записи.

Причём формирование матрицы размерностей (второй этап) производится на основе формул размерностей параметров  $P_1, \dots, P_m$  в выбранной системе единиц измерения и имеет вид [17]

$$\|A\| = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \dots & \xi_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \xi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_m & \beta_m & \dots & \xi_m \end{pmatrix}.$$

Третий этап, определение числа  $k$  независимых между собой параметров, сводится к нахождению ранга полной матрицы размерностей  $\|A\|$ , т. е. наибольшего порядка не равного нулю определителя, составленного из элементов строк данной матрицы. Если существует хотя бы один определитель порядка  $n$ , не равный нулю, то ранг матрицы  $\|A\|$  и, соответственно, число независимых параметров  $k = n$ . Если же определители  $n$ -го порядка равны нулю, то  $k < n$ , и необходимо проанализировать на равенство нулю определители порядка  $n - 1$ , составленные из столбцов каждой из частичных матриц  $\|B\|$  размеров  $(n - 1) \times n$ . Если среди определителей порядка  $n - 1$  не существует определителей, не равных нулю, то  $k < n - 1$ , и необходимо продолжать анализ определителей порядка  $n - 2$  и т. д.

На четвёртом этапе, т. е. при нахождении комбинаций независимых между собой параметров и установлении их числа, возможны два случая. Как известно, число независимых между собой параметров  $k$  может быть равно числу основных единиц или меньше числа  $n$  основных единиц ( $k < n$ ). В случае, когда  $k = n$ , число форм записи  $m - k$  критериев подобия соответствует количеству не равных нулю определителей  $k$ -го порядка, составленных из строк полной матрицы размерностей  $\|A\|$ . Если же  $k < n$ , то число форм записи равно количеству комбинаций, состоящих из  $k$  параметров, у которых ранг частичной матрицы  $\|B\|$  размеров  $k \times n$  равен  $k$ .

Определение выражений для  $m - k$  критериев подобия в каждой из форм записи заключается в нахождении значений показателей степени  $x_1, \dots, x_k, \dots, z_1, \dots, z_k$ , которые являются отношениями вида,  $D_{i,s} / D$  где  $D$  — определитель порядка  $k$ , составленный из размерностей независимых параметров, соответствующих данной форме записи;  $D_{i,s}$  — определитель, полученный из  $D$  посредством замены  $i$ -й его строки на строку из размерностей  $s$ -го параметра.

После того как найдены значения  $x_1, \dots, x_k$  и т. д., остаётся лишь записать отношения каждого из параметров  $P_{k+1}, \dots, P_m$  к произведениям независимых между собой параметров  $P_1, \dots, P_k$  в соответствующих степенях.

Рассмотрим методику построения критерия технического уровня топливных расходомеров, играющих существенную роль при оценки эффективности СЭУ [20], [21]. Основываясь на работе [16] под техническим уровнем будет понимать часть характеристики качества, которая может быть определена количественно, путем использования его основных технических параметров без привлечения экспертных оценок. Результаты анализа существующих методов оценки технического уровня расходомеров показывает, что наиболее обоснованным и часто применяемым является метод, основанный на анализе так называемых функциональных моделей, в математической форме описывающих взаимосвязь нескольких параметров объекта оценки с качеством его функционирования [16].

Основным нормативным документом по определению показателей качества расходомеров является ГОСТ 4.158-85 «Система показателей качества продукции (СПКП). Счетчики, дозаторы и расходомеры скоростные, объемные. Расходомеры электромагнитные. Расходомеры, дозаторы и дозирующие установки вихревые. Номенклатура показателей», который обеспечивает декомпозицию показателей качества, но не устанавливает в настоящее время их иерархию, что затрудняет получение строго научного и однозначного (количественного) определения технического уровня и качества судовых КИП (табл. 1).

Таблица 1

**Номенклатура показателей качества расходомеров согласно ГОСТ 4.158-85**

Наименование показателя качества	Размерность показателя качества	Наименование характеризваемого свойства
1	2	3
<b>1. ПОКАЗАТЕЛИ НАЗНАЧЕНИЯ</b>		
1.1. Пределы допускаемой основной погрешности (пределы допускаемой погрешности)	%	Метрологическое свойство
1.2. Пределы измерения	м/ч, м/с, л/ч	То же
1.3. Порог чувствительности	м/ч	»
1.4. Эксплуатационный расход	м/ч	»
1.5. Переходный расход	м/ч	»
1.6. Диаметр условного прохода	мм	Геометрический размер
1.7. Выходной сигнал	А, В	Функциональная возможность
1.8. Исполнения по устойчивости к окружающей среде		Работоспособность
1.9. Исполнения по устойчивости к механическим воздействиям		Работоспособность
1.10. Устойчивость к воздействию промышленных радиопомех		То же
1.11. Параметры измеряемой среды: давление	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Физическое свойство
температура	°С	
и другие	—	
1.12. Номинальная статическая характеристика (ГОСТ 8.009-84)	—	Метрологическое свойство
1.13. Дополнительные погрешности от воздействия внешних влияющих факторов	—	То же
1.14. Минимальный расход	м/ч	—
1.15. Номинальный расход	м/ч	—
1.16. Максимальный расход	м/ч	—
1.17. Наибольшее количество жидкости и газа за сутки, м	м	Работоспособность
1.18. Наибольшее количество жидкости и газа, измеренное в течение гарантийного срока	м	То же
1.19. Потеря давления при максимальном расходе	кПа (кгс/см)	—
1.20. Габаритные размеры	мм	Геометрические размеры
1.21. Установочные и присоединительные размеры	мм	То же
1.22. Материалы деталей, соприкасающихся с измеряемой средой	—	Долговечность
1.23. Параметры электрического питания (с допускаемыми отклонениями): напряжение	—	Функциональная возможность
частота	В	
	Гц	
1.24. Предельное значение сопротивления нагрузки	Ом	То же
1.25. Емкость отсчетного устройства	м	»
1.26. Цена наименьшего деления отсчетного устройства	м	»

Таблица 1  
 (Продолжение)

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ (ГОСТ 27.003-83)		
2.1. Нарботка на отказ или вероятность безотказной работы за время	ч	Безотказность
2.2. Средний срок службы	лет	Долговечность
2.3. Установленный срок службы, (срок службы)	лет	То же
2.4. Среднее время восстановления (для восстанавливаемых приборов)	ч	Ремонтопригодность
2.5. Установленная безотказная наработка	ч	Безотказность
3. ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ЭНЕРГИИ		
3.1. Масса прибора	кг	Экономичность расхода материалов
3.2. Потребляемая мощность	В, А	Экономичность расхода энергии питания
4. ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ (ГОСТ 16035-81)		
4.1. Соответствие прибора и его элементов размерам тела человека и его частей (удобство монтажа и обслуживания)	–	Эргономические свойства
4.2. Соответствие прибора силовым возможностям человека	–	То же
5. ЭСТЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
5.1. Функционально-конструктивная обусловленность	—	Рациональность формы
5.2. Тщательность покрытий и отделки, устойчивость к повреждениям	—	Совершенство производственного исполнения
6. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ		
6.1. Трудоемкость изготовления (ГОСТ 14205-83)	нормо-ч	Эффективность использования трудовых ресурсов
6.1.1. Нормативная трудоемкость	нормо-ч	Эффективность использования трудовых ресурсов
6.1.2. Проектная трудоемкость	нормо-ч	То же
6.2. Энергоемкость изготовления	кВт·ч	Эффективность использования энергетических ресурсов
7. ПОКАЗАТЕЛИ ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОСТИ		
7.1. Устойчивость к механическим воздействиям в упаковке при транспортировании	–	Устойчивость к транспортированию
7.2. Устойчивость к воздействию температуры и влажности в упаковке при транспортировании	–	То же
8. ПОКАЗАТЕЛИ СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ		
8.1. Коэффициент применяемости по типоразмерам	%	–
8.2. Коэффициент применяемости по себестоимости (для серийно выпускаемых приборов)	%	–
8.3. Коэффициент повторяемости	%	–
9. ПАТЕНТНО-ПРАВОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
9.1. Показатель патентной чистоты	–	Техническая новизна
9.2. Показатель патентной защиты	–	Конкурентоспособность
10. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ		
10.1. Прочность и герметичность	кПа, МПа (кгс/см)	Безопасность
10.2. Электрическая прочность изоляции	В/м	То же
10.3. Сопротивление изоляции	МОм	То же

Реализация указанного на рисунке алгоритма осуществляется в следующей последовательности:

- определение основных физических параметров, характеризующих функционирование расходомера;
- составление формул размерностей физических параметров в выбранной системе измерения;
- построение матрицы размерности основных физических параметров;
- построение степенного одночлена, составленного из произведения первичных размерностей;
- составление системы уравнений для нахождения значений степеней физических параметров;
- получение безразмерного комплекса, характеризующего технический уровень расходомера.

Проанализируем основные технические характеристики, определяющие функционирование расходомеров.

Применительно к решаемой задаче, основываясь на результатах, представленных в работе [16], можно установить два иерархических уровня, разделив показатели, перечисленные в ГОСТе, на две группы. В первый, более высокий уровень будут входить технические показатели (1.1; 1.14–1.16; 2.1; 3.1) (см. табл. 1), характеризующие технический (научно-технический) уровень КИП, а во второй уровень — остальные показатели, влияние которых на качество определяется путем экспертизы (назначения соответствующих весовых коэффициентов). При этом обе группы совместно будут давать комплексную оценку качества КИП.

Основным функциональным параметром измерительных приборов является точность их работы, которая может оцениваться обратным значением модуля относительной погрешности, выраженной в процентах. При этом, чем меньше погрешность, тем выше технический уровень приборов [1].

Широкий диапазон измерения является важным достоинством расходомеров, так как расход топлива в диапазоне эксплуатационных режимов (от холостого хода до номинальной нагрузки) изменяется в десятки раз. Поэтому, чем шире диапазон измерения расхода, тем универсальнее прибор и тем выше его технический уровень.

Известно, что микроминиатюризация является одним из основных направлений развития приборостроения. Она обеспечивает существенное сокращение энергопотребления, повышение быстродействия, упрощение конструкции и расширение функциональных возможностей КИП. Поэтому чем ниже масса расходомера, тем выше его технический уровень.

Надежность измерительного прибора — это время, в течение которого прибор безотказно работает и показывает изначальную точность. Это зависит от производителя и модели (типа) расходомера и от условий его эксплуатации. Например, ротаметры финской компании *Kytola* рассчитаны на срок работы не менее десяти лет (см. Интернет-ресурс. Код доступа: <http://www.rotamet.ru/index.php?Content=235&Data=020220&menu=1>).

Надёжность измерительного прибора часто оценивается через наработку на отказ, выраженную в единицах времени и характеризующую среднюю продолжительность работы устройства между ремонтами. Поэтому чем больше наработка на отказ прибора, тем выше его технический уровень.

Таким образом, критерий технического уровня топливных расходомеров определяется следующими параметрами: предел допускаемой относительной погрешности, диапазон измерения расхода, масса первичного прибора, наработка на отказ.

Все физические величины, влияющие на технический уровень расходомера, можно разделить на первичные: масса  $m$  [кг], наработка на отказ  $T$  [с]; и вторичные: диапазон измерения расхода  $\Delta G$  [кг/с]. Формулы размерности вторичных величин имеют вид степенных многочленов.

Построим безразмерный показатель технического уровня расходомера, по описанному алгоритму. Указанный безразмерный показатель в общем виде может быть записан следующим образом:  $\pi = [A_1]^{z_1} \cdot [A_2]^{z_2} \cdot [A_3]^{z_3} \cdot [A_4]^{z_4}$ ,

где размерность величины  $[A_i] = [L]^{\alpha_i} [M]^{\beta_i} [T]^{\epsilon_i}$  ( $[L]$  — размерность длины;  $[T]$  — размерность времени;  $[M]$  — размерность массы).

Показатели степени  $z_1, z_2, z_3, z_4$  должны быть таковы, чтобы размерность  $\pi$  была равна нулю. В табл. 2 представлены степени размерностей, т. е.  $\alpha_i, \beta_i, \epsilon_i$ .

Таблица 2

**Таблица размерностей**

Величина		Степени		
		$[L]$	$[M]$	$[T]$
$A_1$	М	$\alpha_1 = 0$	$\beta_1 = 1$	$\epsilon_1 = 0$
$A_2$	Г	$\alpha_2 = 0$	$\beta_2 = 0$	$\epsilon_2 = 1$
$A_3$	$\delta$	$\alpha_3 = 1$	$\beta_3 = 0$	$\epsilon_3 = 0$
$A_4$	$G$	$\alpha_4 = 0$	$\beta_4 = 1$	$\epsilon_4 = -1$

Составим систему уравнений для нахождения  $z_1, z_2, z_3, z_4$ :

$$\begin{cases} 0z_1 + 0z_2 + z_3 + 0z_4 = 0 \\ z_1 + 0z_2 + 0z_3 + z_4 = 0 \\ 0z_1 + z_2 + 0z_3 - z_4 = 0 \end{cases}$$

Тогда матрица размерностей будет иметь следующий вид:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}$$

Система уравнений для нахождения  $z_1, z_2, z_3, z_4$  имеет множество решений, но физически обоснованным является выражение (1).

$$TU_{\text{расходомера}} = \left[ \frac{1}{\delta} \right]^{C_1} \cdot \left[ \frac{\Delta G}{M} \cdot \Delta T \right]^{C_2}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — пределы допускаемой относительной погрешности, %;  $\Delta G$  — диапазон измерения расхода  $\Delta G$ , кг/с;  $M$  — масса первичного прибора (датчика, измерительной ячейки без вторичного показывающего прибора), кг;  $\Delta T$  — наработка на отказ, с (ч);  $C_1$  и  $C_2$  — весовые коэффициенты (вычисляемые с помощью метода матричного исчисления недоопределённых матриц Гаусса).

Таким образом, получено критериальное уравнение, состоящее из тривиального критерия подобия, представляющего отношение двух величин с одинаковой размерностью, и критерия подобия, составленного из величин различной физической природы и размерности. Полученное критериальное уравнение инвариантно к физическим принципам функционирования приборов и поэтому может быть применено для определения технического уровня различных типов расходомеров. Остальные параметры, которые наряду с критерием технического уровня определяют качество расходомеров, могут быть проанализированы в соответствии с методикой, изложенной в работе [16].

Критериальное уравнение позволяет обеспечить выбор расходомеров, обладающих высоким техническим уровнем, что будет способствовать сокращению расхода топлива и выбросов парниковых газов судовыми энергетическими установками в соответствии с требованиями Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», Технических регламентов о безопасности морского и внутреннего водного транспорта, судового плана управления энергоэффективностью (SEEMP), предложенного Международной морской организацией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Методы оценки научно-технического уровня судов, энергетических установок и контрольно-измерительных приборов / О. К. Безюков, А. А. Денисова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 119–130.
2. *Агеев В. И.* Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок: устройство, эксплуатация, эффективность. Справочник / В. И. Агеев. — Л.: Судостроение, 1985. — 416 с.
3. *Азгальдов Г. Г.* Квалиметрия для всех / Г. Г. Азгальдов, А. В. Костин, В. В. Садов. — М.: ИД «ИнформЗнание», 2012. — 165 с.
4. *Андрианов Ю. М.* Квалиметрия в приборостроении и машиностроении / Ю. М. Андрианов, А. И. Субетто. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1990. — 223 с.
5. *Зубков А. Ф.* Синтез и анализ моделей качества датчиков физических величин / А. Ф. Зубков, М. А. Чернецов, Р. В. Рыжов // Нива Поволжья. — 2012. — № 3. — С. 36–40.
6. *Мамедов Ф. И.* Анализ энергетических показателей электромагнитного датчика малых линейных перемещений / Мамедов Ф. И., Дадашева Р. Б., Гусейнов Р. А. [и др.] // Метрология. — 2010. — № 11. — С. 30–37.
7. *Михайлов П. Г.* Разработка моделей качества датчиков физических величин / П. Г. Михайлов, М. А. Чернецов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2011. — Т. 2. — С. 278–280.
8. *Михайлов П. Г.* Синтез моделей качества датчиков для мониторинга состояния здоровья человека / П. Г. Михайлов, А. С. Митрохин // Датчики и системы. — 2011. — № 10. — С. 21–25.
9. *Свинолупов Ю. Г.* Методика оценки качества измерительных процессов (на примере датчиков давления) / Ю. Г. Свинолупов, В. А. Корнев, В. К. Кулешов // Дефектоскопия. — 2012. — № 2. — С. 73–82.
10. *Цибизов П. Н.* Разработка моделей датчиков физических величин на основе квалиметрического подхода / П. Н. Цибизов, П. Г. Михайлов, Т. В. Астахова, Д. А. Тютюников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. — № 5 (130). — С. 99–104.
11. *Бриджмен П. В.* Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. — М.: Наука, 2001. — 148 с.
12. *Хантли Г.* Анализ размерностей / Г. Хантли. — М.: Мир, 1970. — 176 с.
13. *Афромеев Э. А.* Критерии технического совершенства судов / Э. А. Афромеев // Судостроение. — № 6. — 2005. — С. 14–17.
14. *Гусейнов М. Р.* Обоснование выбора критериев эффективности транспортных судов / М. Р. Гусейнов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2010. — Т. 18. — № 3. — С. 89–95.
15. *Малый П. А.* Принципы определения качества и технического уровня грузовых транспортных судов / П. А. Малый // Труды ЛИВТ «Теория, проектирование и техническая эксплуатация судов речного флота». — 1970. — № 127. — С. 87–92.
16. *Безюков О. К.* Методика формирования карты технического уровня и качества судовых дизелей / О. К. Безюков, И. В. Ивашин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 1. — С. 77–86.
17. *Афанасьева О. В.* Вибродиагностирование технического состояния судовых дизелей по критериям подобия: дисс. ... канд. техн. наук / О. В. Афанасьева. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2004. — 196 с.
18. *Безюков О. К.* Критерии технического уровня основных элементов судовых газотурбинных двигателей / О. К. Безюков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление», 1–2 октября 2009 г. Кн. II. — СПб.: СПГУВК, 2010. — С. 113–122.
19. *Безюков О. К.* Критерий для оценки научно-технического уровня судовых дизелей / О. К. Безюков // Труды междунар. науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во «ПаркКом», 2006. — С. 16–19.
20. *Максимец А. В.* Измерение расхода топлива судовыми дизелями ультразвуковым методом в условиях эксплуатации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Максимец. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2004. — 21 с.
21. *Орлов А. Е.* Методика определения расхода топлива и эффективной мощности судового ДВС в условиях эксплуатации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Е. Орлов. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — 21 с.

## TECHNICAL LEVEL'S CRITERIA FOR SHIP FUEL GAUGE CONSTRUCTION USING THE METHOD OF DIMENSIONAL ANALYSIS

The article describes the method criterion of evaluation of the technical level of marine instrumentation forming, based on the methods of similarity theory and dimensional analysis. The existing approaches to the evaluation of the technical level and quality of SPP, marine diesel engines and instrumentation (instrumentation), used in the ship's power. The stages of the construction of the criterion of technical-level flow. An criterion equation consisting the trivial similarity criterion, which is the ratio of two quantities of the same dimension and similarity criterion, composed of various physical quantities and dimensions. Application criteria equations allow for the selection of flowmeters with high technical level that will enhance the energy efficiency of the ship's power plant by reducing fuel consumption and greenhouse gas emissions. This will achieve the fulfillment of the requirements of the Federal Law № 261-FZ "On energy saving and energy efficiency," technical regulation on safety of maritime and inland waterway transport, ship energy efficiency management plan (SEEMP), proposed by the International Maritime Organization.

*Keywords:* technical level, quality, qualimetry check, similarity theory and dimensional analysis, the criterion of the technical level, fuel flow, marine ICE and heat power equipment.

### REFERENCES

1. Bezyukov, O. and A. Denisova. "Methods of evaluation of scientific and technological level of the courts, energetic installations and instrumentation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 119–130.
2. Ageev, Vladimir. *Kontrolno-izmeritelnye pribory sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: ustrojstvo, jekspluatacija, jeffektivnost: spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1985.
3. Azgaldov, Garry, A. Kostin, and V.Sedov. *Kvalimetrija dlja vseh*. M.: ID InformZnanie, 2012.
4. Andrianov, Yuri, and A. Subetto. *Kvalimetrija v priborostroenii i mashinostroenii*. L.: Mashinostroenie, Leningr. Otd., 1990.
5. Zubkov, A., M. Tchernetsov, and R. Ryzhov. "Synthesis and analysis of models as sensors of physical quantities." *Niva Povolzhya* 3 (2012): 36–40.
6. Mamedov, F. I., R. B. Dadasheva, R. A. Gusejnov, Sh. T. Mamedov, and K. F. Asadova. "The analysis of power indicators of the electromagnetic gage of small linear movements." *Metrology* 11 (2010): 30–37.
7. Mihajlov, P. G., and M. A. Chernecov. "Razrabotka modelej kachestva datchikov fizicheskikh velichin." *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* 2 (2011): 278–280.
8. Mikhailov, P., and A. Mitrokhin. "Synthesis and analysis of models of quality sensor for monitoring the status of human health." *Datchiki & Systemi* 10 (2011): 21–25.
9. Svinolupov, Y., V. Kornev, and V. Kuleshov. "Methods of assessing the quality of the measurement process (at least when, pressure sensors)." *Defektoscopy* 2 (2012): 73–82.
10. Tsibizov, A., P. Mikhailov, T. Astakhov, and C. Tyutyunov. "Modelling sensors based approach qualimetric." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 5 (2012): 99–104.
11. Bridzhmen, P. V. *Analiz razmernostej*. M.: Nauka, 2001.
12. Hantli, G. *Analiz razmernostej*. M.: Mir, 1970.
13. Aframeev, E. A. "Vessels technical perfection criterion." *Sudostroenie* 6 (2005): 14–17.
14. Gusejnov, M. "Obosnovanie vybora kriteriev jeffektivnosti transportnyh sudov." *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskie nauki* 18.3 (2010): 89–95.
15. Maliy, P. A. "Principy opredelenija kachestva i tehničeskogo urovnja gruzovyh transportnyh sudov." *Trudy LIVTa «Teorija, proektirovanie i tehničeskaja jekspluatacija sudov rechnogo flota»* 127 (1970): 87–92.
16. Bezyukov, O., and I. Ivachin. "Method of forming the sheet of technical level and quality of marine diesels." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2009): 77–86.
17. Afanaseva, O. V. *Vibrodiagnostirovanie tehničeskogo sostojanija sudovyh dizelej po kriterijam podobija*: PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2004.
18. Bezyukov, Oleg. "Kriterii tehničeskogo urovnja osnovnyh jelementov sudovyh gazoturbinnih dvigatelej." *Materialy mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konferencii «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, jekspluatacija, upravlenie», 1-2 oktjabrja 2009. Kniga II*. SPb.: SPGUVK, 2010: 113–122.

19. Bezyukov, Oleg. “Kriterij dlja ocenki nauchno-tehnicheskogo urovnja sudovyh dizelej.” *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminara “Issledovanie, proektirovanie i jekspluatsija sudovyh DVS”*. SPb.: Park-Com, 2006: 16–19.

20. Maksimets, A. V. Izmerenie rashoda topliva sudovymi dizeljami ultrazvukovym metodom v uslovijah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2004.

21. Orlov, A. E. Metodika opredelenija rashoda topliva i jeffektivnoj moshhnosti sudovogo DVS v uslovijah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Безюков Олег Константинович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*okb-nayka@yandex.ru, kaf\_sdvs@gumrf.ru*

*Афанасьева Ольга Владимировна* —  
кандидат технических наук, доцент.  
Национальный минерально-сырьевой  
университет «Горный»  
*OVAf@rambler.ru*

*Денисова Анастасия Александровна* — соискатель.

Научный руководитель:

*Безюков Олег Константинович*  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*an-denisova@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Bezyukov Oleg Konstantinovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*okb-nayka@yandex.ru*

*Afanasyeva Olga Vladimirovna* —  
PhD, associate professor.  
National Mineral Resources University  
(Mining University)  
*OVAf@rambler.ru*

*Denisova Anastasiya Aleksandrovna* — applicant.  
Supervisor:

*Bezyukov Oleg Konstantinovich*.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*an-denisova@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.*

УДК 621.431.074

**Г. Е. Живлюк,  
А. П. Петров**

### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL

Современный поршневой двигатель внутреннего сгорания невозможно представить без систем подачи топлива с электронным управлением, изменения фаз газораспределения, наддува и т. д. Таким образом, под программное управление электроникой переданы важнейшие процессы, протекающие в ДВС на всех эксплуатационных режимах.

Настоящая статья сосредоточена на рассмотрении направлений создания и развития аккумуляторных систем топливоподачи высокого давления. Показано, что необходимый уровень давления и требуемые характеристики впрыска могут быть обеспечены современными системами с электронным управлением типа Common Rail. Внедрение подобных систем как одного из способов улучшения топливной экономичности и повышения экологической безопасности судовых дизельных установок вызвано жизненной необходимостью. Показаны достижения в части разработки и организации процесса топливоподачи высокого давления применительно к двигателям различной мощности судового и наземного назначения, выбора ответственных материалов для агрегатов и элементов как направления повышения надежности и долговечности систем. Рассмотрены аспекты создания программного и аппаратного обеспечения процессов управления. Представлены технические характеристики топливной аппаратуры фирмы L'Orange, созданной для двигателей, выпускаемых в странах Азии. Приведено описание систем топливоподачи судовых двигателей фирм Bosch, Wartsila, Woodward, MAN-B & W, Mitsubishi Heavy Industries. Краткому анализу посвящены перспективы дальнейшего повышения давления впрыска топлива в цилиндры двигателя.