

Раздел 3 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 51-74

DOI: 10.34046/aumsuomt100/11

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ

А.В. Лисаченко

В работе представлены способы математического расчета теплотехнических данных после проведения испытаний на морских судах. Проведено испытание электронно-управляемого высокооборотного двигателя фирмы Caterpillar C32. Во время теплотехнических испытаний были выполнены экспериментальные исследования влияния значений теплотехнических параметров на изменение технического состояния двигателя и проверка информативности косвенного диагностического коэффициента по расходу топлива. Полученные результаты проведения экспериментальных исследований высокооборотных двигателей позволят перейти от классических подходов технической эксплуатации к новым, входящих в систему автономного контроля. Проведенные расчеты показали, что полученные значения доверительных интервалов позволяют выявить отклонение значений теплотехнических параметров от статистических нормальных значений в эксплуатации и определить начало развития дефекта, причем, эти параметры не превышают еще предельно-допустимых значений, указанных фирмой изготовителем. Проводимые экспериментальные исследования судовых технических средств безразборным методом диагностики морских судов и составление доверительных интервалов, позволяют контролировать теплотехнические параметры в эксплуатации, что лежит в основе системы управления и мониторинга автономных судов.

Ключевые слова: испытания, методика, высокооборотный двигатель, статистика

EXPERIMENTAL DATA APPROXIMATION OBTAINED DURING HIGH-SPEED MARINE ENGINES THERMAL ENGINEERING TESTS

A.V. Lisachenko

In an article presents methods for mathematical calculation of thermal engineering data after testing on sea vessels. The electronically controlled high-speed Caterpillar C32 engine was tested. During the thermal engineering tests, experimental studies of the influence of the values of thermal parameters on the change in the technical condition of the engine and checking the information value of the calculated diagnostic for fuel consumption ratio were performed. The obtained results of experimental studies of high-speed engines will allow us to move from classical approaches of technical operation to new ones that are part of the autonomous control system. The performed calculations showed that the obtained values of confidence intervals allow us to identify the deviation of the values of thermal engineering parameters from the statistical normal values in operation and to determine the beginning of the development of the defect, moreover, these parameters do not exceed the maximum permissible values specified by the manufacturer. The conducted experimental studies of ship technical means by the non-selective method of diagnostics of sea vessels and the compilation of confidence intervals make it possible to control thermal parameters in operation, which is the basis of the control and monitoring system of autonomous vessels.

Keywords: tests, methodology, high-speed engine, statistics

Экспериментальные исследования высокооборотных двигателей (ВОД) морских судов в эксплуатации позволили автору собрать достаточную базу данных, в период с 2010 г. по 2021 г., теплотехнических параметров и выполнить их обработку статистическими и вероятностными математическими методами. Анализ начала развития дефекта ВОД при отклонении от определенных значений, полученных доверительных интервалов теплотехнических параметров, позволил осуществить введение новых коэффициентов для

создания методики определения технического состояния двигателя в эксплуатации.

Автором статьи проанализированы следующие результаты экспериментальных исследований по определению изменения значений коэффициентов и параметров, влияющих на техническое состояние двигателя в эксплуатации:

1. Температура отработавших газов $t_{ог}$, °С.
2. Давление наддувочного воздуха p_n , кПа.
3. Относительная мощность двигателя Ne , %.

4. Частота вращения коленчатого вала двигателя n , мин⁻¹.
5. Часовой расход топлива B , л/ч.
6. Давление моторного масла p_m , кПа.
7. Температура моторного масла t_m , °С.
8. Температура охлаждающей жидкости $t_{ож}$, °С.
9. Коэффициент расхода топлива β_T

Для большинства параметров, исследуемых двигателей CAT C32 и CAT 3500, разброс значений минимальный, что дает возможность математически описать зависимости параметров работы этих двигателей от нагрузки [2].

Из опыта эксплуатации ВОД морских судов следует считать такие режимы эксплуатации повторно-кратковременные, поскольку переход судна от места стоянки до выполнения швартовных операций занимает короткое время. А также сама швартовная операция длится на всех режимах в совокупности порядка 1,5-2 часа. Поэтому анализ Диагностики таких ВОД показывает большую часть эксплуатационного времени их работы на малых и частичных нагрузках [1].

Измерения параметров, характеризующих работу ГД, проводились с помощью диагностического комплекса CAT ET в условиях эксплуатации на режимах, близких к эксплуатационным, значения которых составляют от 650 мин⁻¹ до 1700 мин⁻¹.

Следует отметить, что измерения параметров выполнялись автором в идентичных условиях, т.е. одним и тем же методом, диагностическим комплексом и приборами измерения, на одинаковых морских буксирах и одинаковых двигателях модели CAT C32 и CAT 3500. Другими словами, проведенные замеры выполнялись с одинаковой точностью, что означает, с точки зрения математической статистики, распределение вероятностей результатов измерений может характеризоваться одинаковым среднеквадратичным отклонением. Причем, на каждом режиме выполнялось по 5 раз количество фиксаций данных с интервалом около 2 мин.

Для того, чтобы определить случайную погрешность и правильное значение среднего результата измерений на каждом режиме работы двигателя от 650 мин⁻¹ до 1700 мин⁻¹, проводим статистический анализ результатов измерений методом наименьших квадратов, разработанный Лежандром и Гауссом [2]. Где основным требованием к определению коэффициентов b_i является сведение к минимуму суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от соответствующих значений уравнения регрессии.

Вывод регрессионных коэффициентов возможно применять при любых статистических данных, распределенных по любому закону.

Для это выполняем вычисление S_x средней квадратичной погрешности среднего арифметического, которая равна [3]:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

По таблице математической статистики принимаем значение вероятности равным 0,95, а значение относительной погрешности 0,5 при числе измерений на каждом режиме равным $n=5$. Тогда табличное значение t-критерия равно $\tau_\alpha(n) = 2,78$ [2].

К примеру, для двигателя CAT C32 замерялось значение параметров частоты вращения, расход топлива и показатель относительной нагрузки на каждом режиме по пять раз (таблица 1). Общее количество измерений на одном двигателе составило 30 - 45 раз. Вычисляем абсолютную случайную погрешность [2]:

$$\Delta x_{случ} = \tau_\alpha(n) \cdot S_x,$$

и результирующую погрешность [2]:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{случ}^2 + \Delta x_{приб}^2}$$

При любых измерениях существуют и случайные и систематические погрешности. Расчет общей (полной) абсолютной погрешности измерения дело непростое, так как эти погрешности разной природы.

Для инженерных измерений имеет смысл не обсуждать систематическую погрешность и принять $\Delta x_{приб} = const$ [4], либо свести к минимуму.

Эксплуатационные теплотехнические параметры двигателя CAT C32 получены путем прямых измерений. Значения, которых являются результатом взаимодействия множества случайных причин, экспериментальные точки, при построении графика отклоняются от общей закономерности, поскольку все результаты измерений содержат погрешности различного происхождения, которые могут быть, как систематическими, так и случайными, в результате чего общая результирующая погрешность лежит в пределах 0,51-0,53%.

Далее для обобщения точек на всех режимах работы и получения его графического сглаженного изображения воспользуемся методом наименьших квадратов [2].

В качестве исходных данных допускалось использование практически неограниченного количества точек, но эксперимент в режиме реального времени удавалось проводить с замерами до 5 точек на каждом режиме, поскольку морские буксиры имеют ограниченное время движения от места стоянки до места выполнения швартовных операций. Поэтому разброс полученных данных был тщательным образом проанализирован с последующей математической обработкой и проверкой полученных коэффициентов с учетом случайных и систематических погрешностей. Все результаты обработки данных занесены в таблицы 1 и 2. Определены эмпирические зависимости путем аппроксимации данных полиномами первой степени как пропорциональным уравнением, так и с использованием коэффициента отличного от нуля $b \neq 0$; полиномом третьей степени при степени доверия 0,95.

Обработка экспериментальных параметров:

1. Диагностический коэффициент отношения частоты вращения двигателя к расходу топлива в зависимости от относительной нагрузки на двигатель $\beta_T = f(N_e)$: при работе на режиме 650-1700 мин⁻¹:

Получено уравнение регрессии полинома первого порядка $y = 0,0089 + 0,0013x$; дисперсия коэффициента равна 0,000020, коэффициент детерминации равен 0,98; доверительный интервал равен $\pm 12\%$;

При выполнении экстраполяции от начала координат и до начала выполнения замеров на режиме 650 мин⁻¹ получим уравнение с одним угловым коэффициентом $y=0,0015x$; дисперсия коэффициента равна 0,000069, коэффициент детерминации равен 0,97; доверительный интервал равен $\pm 6\%$;

2. Температура отработавших газов $t_{oz} = f(N_e)$: при работе на режиме 650-1700 мин⁻¹:

Получено уравнение регрессии полинома первого порядка $y = 151,24 + 6,48x$; дисперсия равна 1523 °С, коэффициент детерминации равен 0,93; доверительный интервал равен $\pm 26\%$;

При выполнении экстраполяции от начала координат и до начала выполнения замеров на режиме 650 мин⁻¹ получим уравнение с одним угловым коэффициентом $y=9,86x$; дисперсия равна 0,85, коэффициент детерминации равен 0,61; доверительный интервал равен $\pm 8,5\%$.

3. Температура отработавших газов $t_{oz} = f(n)$: при работе на режиме 650-1700 мин⁻¹:

Получено уравнение регрессии полинома первого порядка $y = 60,913 + 0,3585x$; дисперсия

равна 272°С, коэффициент детерминации равен 0,98; доверительный интервал равен $\pm 11\%$;

При выполнении экстраполяции от начала координат и до начала выполнения замеров на режиме 650 мин⁻¹ получим уравнение с одним угловым коэффициентом $y=0,31x$; дисперсия коэффициента равна 0,007, коэффициент детерминации равен 0,97; доверительный интервал равен $\pm 2,2\%$.

4. Нагрузка на двигатель $\overline{N_e} = f(n)$: при работе на режиме 650-1700 мин⁻¹:

Получено уравнение регрессии полинома первого порядка $y = 0,068x - 38,707$; дисперсия равна 28%, коэффициент детерминации равен 0,96; доверительный интервал равен $\pm 9\%$;

При выполнении проверки значимости коэффициентов дополнительно построим уравнение регрессии с полиномом третьего порядка на режиме 650 мин⁻¹ получим уравнение $y = 5 \cdot 10^{-8}x^3 + 0,0002x^2 - 0,1811x + 57,244$; коэффициент детерминации равен 0,98; доверительный интервал равен $\pm 9\%$.

5. Давление наддувочного воздуха $P_n = f(\overline{N_e})$: при работе на режиме 650-1700 мин⁻¹:

Получено уравнение регрессии полинома первого порядка $y = 1,4024x - 26,583$; дисперсия равна 329 кПа, коэффициент детерминации равен 0,83; доверительный интервал равен $\pm 21\%$;

При выполнении проверки значимости коэффициентов дополнительно построим уравнение регрессии с полиномом третьего порядка на режиме 650 мин⁻¹ получим уравнение $y = 0,0007x^3 - 0,0698x^2 + 2,4608x - 17,263$; коэффициент детерминации равен 0,99; доверительный интервал равен $\pm 21\%$.

Все построенные аппроксимационные зависимости были проверены на адекватность и значимость коэффициентов. Для наглядности рассмотрим пример построения и проверки регрессионного полинома первой и третьей степени, описывающего зависимость давления наддувочного воздуха от относительной нагрузки при работе ГД САТ С32 на эксплуатационных режимах (табл. 1).

Из таблицы 1 видно, что генеральная совокупность состоит из 30 точек и 6 режимов. Выполнена обработка каждого режима, найдена выборочная средняя \bar{x} и значение погрешности на каждом режиме $\epsilon_x, \%$. Далее, полученные значения входного параметра относительной мощности $\overline{N_e}$ и отклика (выходного параметра) давление наддува P_n занесены в таблицу 2 для дальнейшей математической обработки и представлены на рисунке 1.

Таблица 1– Расчет относительной погрешности и определения среднеквадратичного отклонения относительной нагрузки и давления наддувочного воздуха

п/п, выборка	$N_{e, \%}$	\bar{x}	S_x	$\Delta x_{случ}$	$\Delta x_{приб}$	ΔX	$\epsilon_{x, \%}$	$p_n, кПа$	\bar{y}	S_y	$\Delta y_{случ}$	$\Delta y_{приб}$	ΔY	$\epsilon_{y, \%}$
1.	10							1						
2.	10							1						
3.	10							1						
4.	10							1						
5.	10							1						
среднее		10	0	0	0,05	0,05	0,5		1	0	0	0,05	0,05	0,5
6.	27							9						
7.	28							9						
8.	27							9						
9.	26							9						
10.	28							9						
среднее		27,2	0,374	1,04	0,136	1,0	3,86		9	0	0	0,045	0,045	0,5
11.	37							21						
12.	38							20						
13.	37							21						
14.	36							21						
15.	37							21						
среднее		37	0,32	0,88	0,185	0,9	2,43		20,8	0,20	0,56	0,10	0,57	2,72
16.	51							25						
17.	52							25						
18.	52							25						
19.	52							26						
20.	51							25						
среднее		51,6	0,24	0,68	0,26	0,73	1,41		25,2	0,2	0,56	0,13	0,57	2,26
21.	68							57						
22.	67							57						
23.	68							56						
24.	65							57						
25.	66							57						
среднее		66,8	0,58	1,62	0,33	1,66	2,48		56,8	0,2	0,56	0,28	0,62	1,1
26.	79							107						
27.	79							108						
28.	78							107						
29.	78							107						
30.	79							107						
среднее		78,6	0,24	0,68	0,39	0,79	1,00		107,2	0,2	0,56	0,53	0,8	0,72

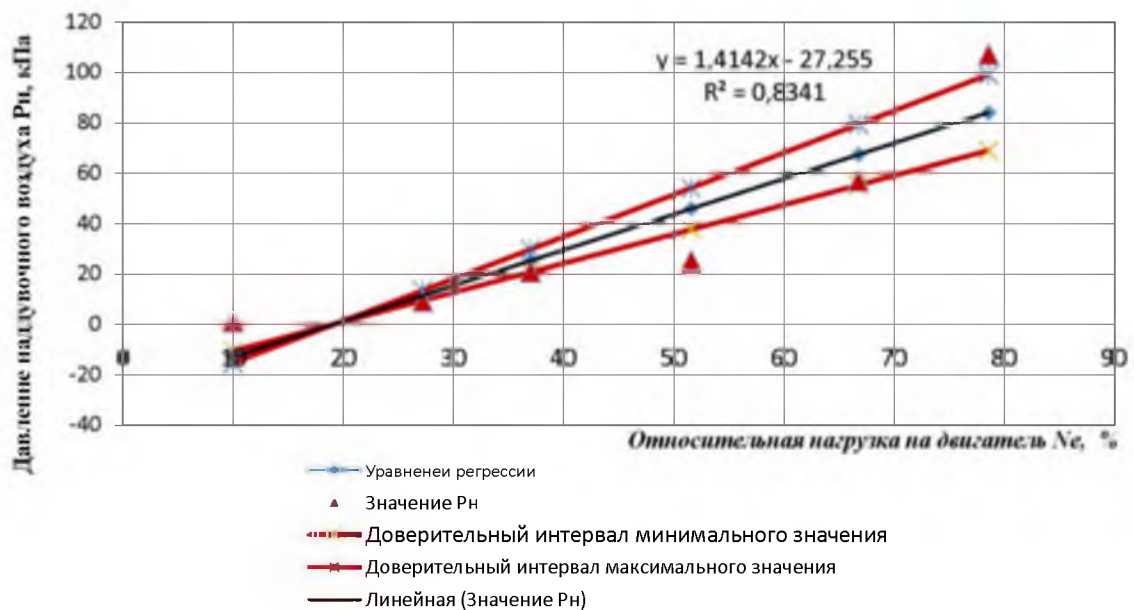


Рисунок 1 – Построение уравнения регрессии и доверительного интервала

Как показано на рисунке 1, если в границы доверительного интервала попадает ноль, т. е. нижняя граница отрицательна, а верхняя положительна, то оцениваемый параметр принимается

нулевым, так как он не может одновременно принимать и положительное, и отрицательное значения [2].

Таблица 2 – Расчет коэффициентов регрессии функции $P_n = f(N_e)$

Выборка	X, N_e	Y, P_n	$x \cdot y$	x^2	x^3	y^2	\hat{y}_x	$y - \hat{y}_x$	$(y - \hat{y}_x)^2$
1	10,0	1,00	10,00	100,00	1000,0	1,000	-13,113	14,113	199,175031
2	27,2	9,00	244,800	739,84	20123,6	81,000	11,211	-2,211	4,889347
3	37,0	20,8	769,600	1369,00	50653,0	432,640	25,070	-4,27	18,2529
4	51,6	25,2	1300,32	2662,56	137388,1	635,040	45,718	-20,518	421,0063
5	66,8	56,8	3794,24	4462,24	298077,6	3226,240	67,213	-10,413	108,435620
6	78,6	107,2	8425,92	6177,96	485587,7	11491,840	83,901	23,299	542,856273
Сумма	271,20	220,00	14544,88	15511,60	992830,03	15867,76	220,00	0,00	1294,56
Среднее	45,20	36,67	2424,15	2585,27	165471,67	2644,63	36,67	0,00	215,76

Для сравнения результатов наблюдений рассчитываем следующие статистики:

- среднее арифметическое значение результатов наблюдения (измерения):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i,$$

где i – порядковый номер наблюдения, $i=1, 2, 3, \dots, n$; n – число наблюдений, объем выборки; x_i – результат отдельного наблюдения.

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2,$$

где $\overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum x_i^2$

Общая дисперсия (дисперсия выходного параметра) характеризует разброс экспериментально наблюдаемых точек относительно среднего значения x .

Тесноту связи и изучаемых явлений и оценку качества построенной модели даст линейный коэффициент парной корреляции для линейной регрессии r_{xy} и коэффициент детерминации p_{xy}^2 :

$$r_{xy} = b \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

т.к. коэффициент $r_{xy} > 0,7$, то это говорит о наличии тесной связи между признаками [5, 6]:

Коэффициент детерминации:

$$p_{xy}^2 = r_{xy}^2$$

Оценка значимости уравнения регрессии в целом проводится на основе F -критерий Фишера:

$$F_{\text{факт}} = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} \cdot (n - 2)$$

Фактическое значение F – критерия Фишера сравнивается с табличным значением $F_{\text{табл}}(q, f_1, f_2)$ при уровне значимости q и степенях свободы $f_1 = m$ и $f_2 = n - m - 1$. При этом, если фактическое значение F -критерия больше табличного, то признается статистическая значимость уравнения в целом.

В нашем случае

$$F_{\text{табл}}(q, f_1, f_2) < F_{\text{факт}}, \text{ т.е. } 4,2 < 20,1$$

Для оценки статистической значимости параметров регрессии и корреляции рассчитывается t - критерий Стьюдента:

$$t_{b_0} = \frac{b_0}{m_{b_0}}$$

$$t_b = \frac{b}{m_b}$$

$$t_{r_{xy}} = \frac{r_{xy}}{m_{r_{xy}}}$$

где b, b_0 - коэффициенты уравнения регрессии.

Сравнивая фактическое и критическое (табличное) значения t – статистики – делаем вывод о значимости параметров регрессии и корреляции.

Если $t_{\text{табл}} < t_{\text{факт}}$, в нашем случае условие выполняется.

Параметры b_0, b, r_{xy} не случайно отличаются от нуля и являются статистически значимыми.

Задача обработки результатов измерений заключается в том, чтобы определить границы, в которых заключено истинное значение измеряемой величины – доверительный интервал [3]. Рассчитаем доверительные интервалы для параметров регрессии b_0 и b .

Для расчета доверительного интервала определяем предельную ошибку Δ для каждого показателя:

$$\Delta_{b_0} = t_{\text{табл}} \cdot m_{b_0}$$

$$\Delta_b = t_{\text{табл}} \cdot m_b$$

Доверительные интервалы:

$$Y_{b_0} = b_0 \pm \Delta_{b_0}$$

$$b_{0_{\min}}^*$$

$$b_{0_{\max}}^*$$

$$Y_b = b \pm \Delta_b$$

$$b_{\min}^*$$

$$b_{\max}^*$$

В нашем случае доверительный интервал составляет $\pm 21,6\%$.

Проведенный анализ полученных данных для всех зависимостей, за исключением $P_n = f(N_e)$, показывает наименьшее среднеквадратичное отклонение и доверительный интервал при аппроксимации полиномами первой степени.

Зависимость $P_n = f(N_e)$ хорошо описывается полиномом первой и третьей степени, их значения среднеквадратичных отклонений и доверительных интервалов при аппроксимации наименее расходятся.

Таблица 3 – Результаты получения уравнений регрессии функций теплотехнических параметров

Кол-во точек	Функция	Полином	R ²	С	Доверительный интервал
84	$t_{ог} = f(N_e)$	$Y' = 6,4825 \cdot x + 154,24$	0,931	39	0,26
		$Y' = 9,8607 \cdot x$	0,963		
84	$t_{ог} = f(n)$	$Y' = 0,3585 \cdot x - 60,913$	0,987	16,5	0,11
		$Y' = 0,3125 \cdot x$	0,997		
84	$N_e = f(n)$	$Y' = 0,068 \cdot x - 38,707$	0,965	5,304	0,09
		$Y' = -5 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 0,0002 \cdot x^2 - 0,1811 \cdot x + 57,244$	0,981		
84	$p_n = f(N_e)$	$Y' = 1,414 \cdot x - 27,255$	0,834	17,98	0,22
		$Y' = 0,0008 \cdot x^3 - 0,0721 \cdot x^2 + 2,5758 \cdot x + 19,007$	0,994		
84	$\beta_T = f(N_e)$	$Y' = 0,0013 \cdot x + 0,0089$	0,981	$7 \cdot 10^{-5}$	0,18
		$Y' = 0,0015 \cdot x$	0,993		

Полученные аппроксимационные зависимости экспериментальных характеристик при эксплуатации ВОД на режимах частичных нагрузок, могут быть использованы при прогнозировании, контроле теплотехнических параметров управляющими техническими службами. Статистика контроля технического состояния элементов исследуемых двигателей САТ серии С32 и С3500 показывает, что их отказы происходят в процессе эксплуатации, и блок электронного управления ВОД не в состоянии определить начало развития дефекта, т.к. он способен выдавать запрограммированный сигнал об ошибке.

Поскольку судовладельца интересует не только контроль технического состояния двигателя, но и прогноз и определение качества предстоящего ремонта. Проведенные исследования ВОД на морских судах показали удовлетворительный результат контроля теплотехнических параметров с применением доверительных интервалов и нового диагностического коэффициента расхода топлива β_T .

Поэтому, актуальными являются предложенные методы по:

- определению и использованию доверительного интервала при контроле технического состояния ВОД в эксплуатации;
- по оценке совпадения принадлежности экспериментальных контролируемых параметров к их расчетным доверительным интервалам, что должно служить показателем точности математической модели и её разработанной методики.
- введению нового диагностического коэффициента расхода топлива β_T ;

- составлению методики по определению технического состояния ВОД в эксплуатации;
- контролю судовым экипажем и техническими службами теплотехнических параметров особенно на кратковременных режимах швартовых операций;
- сокращению издержек судовладельца, связанных с планированием и проведением ремонта;
- сокращению времени нахождения судна в ремонте, за счет раннего определения его технического состояния и обнаружения возможного развития дефектов.

Литература

1. Лисаченко А.В. Анализ теплотехнических параметров на основе опыта применения переносных диагностических комплексов современных морских главных высокооборотных двигателей / А.В. Лисаченко, В.В. Герасиди // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 4 (97). – С. 89-94.
2. Чубинский А.Н. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина. – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – 109 с.
3. Самохина С.С. Физика. Обработка результатов физического эксперимента: учеб. метод. пособие / сост. С. С. Самохина. – Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2015. – 103 с.
4. Спиринов Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурькин; под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. — 290 с.

5. Пижурич А.А. Методы и средства научных исследований / А.А. Пижурич, (мл) А.А. Пижурич, В.Е. Пятков. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 264 с.

6. Шалабанов А.К. Практикум по эконометрике с применением MS EXCEL. Линейные модели парной и множественной регрессии / А.К. Шалабанов, Д.А. Роганов. – Казань: Академия управления ТИСБИ, 2008. – 198 с.

7. ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93). Статистические методы, вероятность и основы статистики. Термины и определения. ГОССТАНДАРТ РОССИИ. Москва.

Reference

1. Lisachenko A.V. Analiz teplotekhnicheskikh parametrov na osnove opyta primeneniya perenosnykh diagnosticheskikh kompleksov sovremennykh morskikh glavnykh vysokooborotnykh dvigateley / A.V. Lisachenko, V.V. Gerasidi // Eksploatatsiya morskogo transporta. 2020. № 4 (97). S. 89-94.

2. Chubinskiy A.N. Metody i sredstva nauchnykh issledovaniy. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov eksperimentov / A.N. Chubinskiy, D.S. Rusakov,

I.M. Batyreva, G.S. Varankina. – SPb.: SPbGLTU, 2018. – 109 s

3. Samokhina S.S. Fizika. Obrabotka rezul'tatov fizicheskogo eksperimenta: ucheb. metod. posobie / sost. S. S. Samokhina. – Ul'yanovsk : UVAU GA(I), 2015. – 103 s.

4. Spirin N.A. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo eksperimenta: Uchebnoe posobie / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, L.A. Zaynullin, A.R. Bondin, A.A. Burykin; Pod obshch. red. N.A. Spirina. — Ekaterinburg: ООО «UINTs», 2015. — 290 s.

5. Pizhurin A.A. Metody i sredstva nauchnykh issledovaniy / A.A. Pizhurin, (ml) A.A. Pizhurin, V.E. Pyatkov. – М.: NITs INFRA-M, 2016. – 264 s.

6. Shalabanov A.K. Praktikum po ekonometrike s primeneniem MS EXCEL. Lineynye modeli parnoy i mnozhestvennoy regressii / A.K. Shalabanov, D.A. Roganov. – Akademiya upravleniya TISBI. Kazan' – 2008. – 198 s.

7. GOST R 50779.10-2000 (ISO 3534.1-93). Statisticheskie metody, veroyatnost' i os-novy statistiki. Termini i opredeleniya. GOSSTANDART ROSSII. Moskva.

УДК 621.43

DOI: 10.34046/aumsuomt100/12

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОКСИДАМИ СЕРЫ С СУДОВ

*М.А.Модина, кандидат технических наук, доцент
Е.В. Хекерт, доктор технических наук, профессор
А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент
Ю.В. Письменская, аспирант
В.В. Шкода, кандидат педагогических наук, доцент*

В статье проведен анализ сокращения эмиссии оксидов серы в соответствии с требованиями Международной морской организации.

Ключевые слова: экологическая безопасность, требования ИМО, эмиссия SO_x, зоны контроля.

MODERN REQUIREMENTS IN THE FIELD OF AIR POLLUTION WITH SULFUR OXIDES FROM SHIPS

M. A.Modina, E.V. Khekert, A. I.Epikhin, Yu. V.Pismenskaya, V. V Skoda

The article analyzes the reduction of sulfur oxide emissions in accordance with the requirements of the International Maritime organization.

Keywords: environmental safety, IMO requirements, Nox emission, control zones.

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды являются главные и вспомогательные двигатели. В качестве главных судовых двигателей на сегодняшний день чаще всего используются дизельные. Соответственно в настоящее время морская транспортная индустрия сталкивается с повышенными требованиями к сокращению вредных выбросов NO_x, SO_x, CO₂ дизельными агрегатами СЭУ.

Со второй половины 80-х гг. XX столетия

проблема снижения вредных выбросов от судовых энергетических установок стала привлекать к себе внимание многих отечественных исследователей, ставящих перед собой цель не только более глубоко изучить причины этой проблемы, но и найти пути решения выхода из нее.

Значительный вклад в решение данной проблемы на морском транспорте внесли работы О.А. Гладкова, С.А. Богатых, В.А. Звонова.