

Раздел 3 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 504.3.054: 621.43.068.4
DOI: 10.34046/aumsuomt92/16

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 7RT-FLEX82T

Р.Ю. Атласов, аспирант
Г.В. Игнатенко, аспирант
В.А. Туркин, доктор технических наук

Показано, что в системах с электронным управлением процессом топливоподачи отсутствие жесткого алгоритма управления законом впрыска позволяет изменять характер протекания рабочего цикла в процессе эксплуатации двигателя в зависимости от поставленной задачи. Если стоит задача добиться максимальной экономичности двигателя, может быть реализован закон подачи топлива с пологим ростом давления впрыска в начальной стадии. Если необходимо максимально снизить содержание оксидов азота, реализуется закон подачи с двухфазным впрыском топлива. Переход с одного режима на другой осуществляется путем изменения алгоритма управления, на который необходимо время в пределах 0,25 с. Используя метод планирования эксперимента, а также результаты проведенных в судовых условиях опытов получена математическая модель для оценки влияния нагрузки, угла опережения впрыска топлива и двухфазного впрыска топлива главных дизельных двигателей типа 7RT-Flex82T на значение удельных концентраций оксидов азота в их отработавших газах. Адекватность предложенной математической модели результатам проведенного эксперимента проверена по критерию Фишера. Учитывая, что математическая модель по критерию Фишера адекватно описывает результаты проведенного эксперимента, сделан вывод о том, что она может быть использована для оценки влияния на значение удельных выбросов оксида азота в отработавших газах нагрузки, угла опережения впрыска и массы предвпрыска топлива главных двигателей модели 7RT-Flex82T. Полученная математическая модель позволяет решать задачу оптимизации значений угла опережения впрыска топлива и массы предвпрыска топлива в зависимости от нагрузки дизельного двигателя с целью снижения удельных выбросов оксидов азота до значений, нормируемых правилом 13 Окислы азота Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78.

Ключевые слова: Судовые дизельные двигатели, удельные выбросы оксидов азота, нагрузка, угол опережения впрыска топлива, массы предвпрыска топлива, планирование эксперимента, математическая модель.

It is shown that in systems with electronic control of the fuel supply process, the absence of a rigid algorithm for controlling the injection law makes it possible to change the nature of the flow of the working cycle during engine operation, depending on the task. If the task is to achieve maximum engine efficiency, the fuel supply law can be implemented with a gentle increase in injection pressure in the initial stage. If it is necessary to minimize the content of nitrogen oxides, the law of supply with two-phase fuel injection is implemented. The transition from one mode to another is carried out by changing the control algorithm, which takes time within 0.25 s. Using the method of planning the experiment, as well as the results of experiments carried out in a ship, a mathematical model was obtained to assess the effect of load, lead angle of fuel injection and two-phase fuel injection of 7RT-Flex82T main diesel engines on the value of specific concentrations of nitrogen oxides in their exhaust gases. The adequacy of the proposed mathematical model to the results of the experiment was verified by the Fisher criterion. Given that the mathematical model adequately describes the results of the experiment by the Fisher criterion, it was concluded that it can be used to assess the effect on the specific emissions of nitric oxide in the exhaust gases of the load, the timing of the injection timing and the mass of pre-injection of fuel from the main engines of the 7RT-Flex82T. The obtained mathematical model allows us to solve the problem of optimizing the values of the lead angle of fuel injection and the mass of fuel pre-injection depending on the load of the diesel engine in order to reduce specific emissions of nitrogen oxides to the values normalized by rule 13 Nitrogen oxides of Annex VI of MARPOL 73/78.

Key words: Marine diesel engines, specific emissions of nitrogen oxides, load, lead angle of fuel injection, pre-injection masses, experimental design, mathematical model.

Введение

Нормирование экологических показателей судовых дизельных двигателей осуществляется в

соответствии с разработанными Комитетом по защите морской среды ИМО требованиями Приложения VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» Конвенции

МАРПОЛ 73/78 [1]. Разработанные Комитетом и действующие с 1 января 2011 г. технические нормы ИМО Tier II касаются только выбросов оксидов азота. С 1 января 2016 года вступили в силу новые нормы ИМО Tier III требующие сокращения выбросов оксидов азота (NO_x) приблизительно на 76% в сравнении с Tier II. Нормы распространяются только на новые суда и двигатели в случае их эксплуатации в районах контроля выбросов оксидов азота. Такое серьезное ужесточение норм требует разработки новых технологических решений для снижения выбросов эксплуатирующихся судовыми дизельными двигателями.

Анализ литературных источников и работ в области исследований экологической безопасности показал, что на судах мирового морского флота находят широкое применение дизельные двигатели производства компании «Wartsila» моделей RTA и RT-flex-B/D [2, 3]. В тоже время в инструкциях по эксплуатации указанных дизелей отсутствуют четкие рекомендации по оптимальной настройке регулировочных параметров, способных привести реальный режим дизеля в соответствие с требованиями экологической безопасности.

Экспериментальные и теоретические исследования по изучению закономерностей образования вредных веществ в судовых дизелях проводятся в научно-исследовательских институтах и ВУЗах, как в России, так и за рубежом [4, 5, 6, 7]. Однако еще недостаточно разработаны математические модели, полученные на основе анализа эксплуатационных параметров судовых дизельных двигателей, которые позволили бы разработать технологические мероприятия, направленные на снижение токсичности отработавших газов с целью приведения их значений в соответствие с введенными нормами Приложения VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» Конвенции МАРПОЛ 73/78.

1. Возможности улучшения в условиях эксплуатации экологических характеристик судовых дизельных двигателей 7RT-Flex82T производства компании «Wartsila»

Внедрение на судовых дизелях новых типов топливных систем и в первую очередь электронных систем управления подачей топлива позволили оптимизировать рабочие процессы применительно к заданным условиям эксплуатации.

Наметившаяся в последние годы тенденция повышения давлений впрыска направлена на сокращение периода подачи и повышение полноты сгорания топлива. Высокое давление в начальной стадии способствует большой скорости истечения первых порций топлива, поступающих в камеру

сгорания. В результате этого первые порции хорошо распыляются, распределяясь по всему объему камеры сгорания, предпламенные процессы протекают быстрее, а время задержки самовоспламенения уменьшается. Такая организация рабочего процесса привела к росту эффективности двигателя. Однако концентрация всего процесса сгорания на узком участке цикла привела к повышению жесткости сгорания, повышению уровня шума, создаваемого двигателем, и повышению нагрузок на детали [8].

Чтобы избежать отмеченных явлений на ряде режимов для малооборотных двигателей используется пологий закон нарастания давления впрыска в начальной стадии. Наиболее просто такой закон реализуется в двигателях с гидравлическим приводом топливных насосов или в аккумуляторных системах впрыска с электронным управлением топливоподачей. Влияние закона подачи с пологим нарастанием давления на рабочий процесс малооборотного двигателя с электронным управлением показано на рисунке 1а.

В результате растянутого тепловыделения экономичность двигателя несколько снижается, а экологические показатели улучшаются. Особенно важно, что при такой организации рабочего процесса снижаются локальные температуры в камере сгорания, так как именно в зонах с высокими локальными температурами происходит образование оксидов азота, наиболее токсичного компонента отработавших газов дизелей.

Меньшая скорость нарастания давления в начальной стадии и меньшие температуры рабочего цикла достигаются при двухфазном впрыске (рисунок 1б). К этому варианту прибегают, когда стоит задача снижения шумности и уменьшения содержания в выхлопных газах NO_x . Реализуется такой закон подачи путем организации предвпрыска, когда небольшая порция топлива впрыскивается в цилиндр до начала основной подачи.

В системах с электронным управлением процессом топливоподачи отсутствие жесткого алгоритма управления законом впрыска позволяет изменять характер протекания рабочего цикла в процессе эксплуатации двигателя в зависимости от поставленной задачи. Если стоит задача добиться максимальной экономичности двигателя, может быть реализован закон подачи, приведенный на рисунке 1а. Если необходимо максимально снизить содержание вредных выбросов, реализуется закон подачи, приведенный на рисунке 1б. Переход с одного режима на другой осуществляется путем изменения алгоритма управления, на который необходимо время в пределах 0,25 с. [8].

На рисунке 2 показан характер изменения выбросов оксидов азота с отработавшими газами при переходе дизельного двигателя с электрон-

ным управлением с режима максимальной экономичности на режим максимальной экологической безопасности.

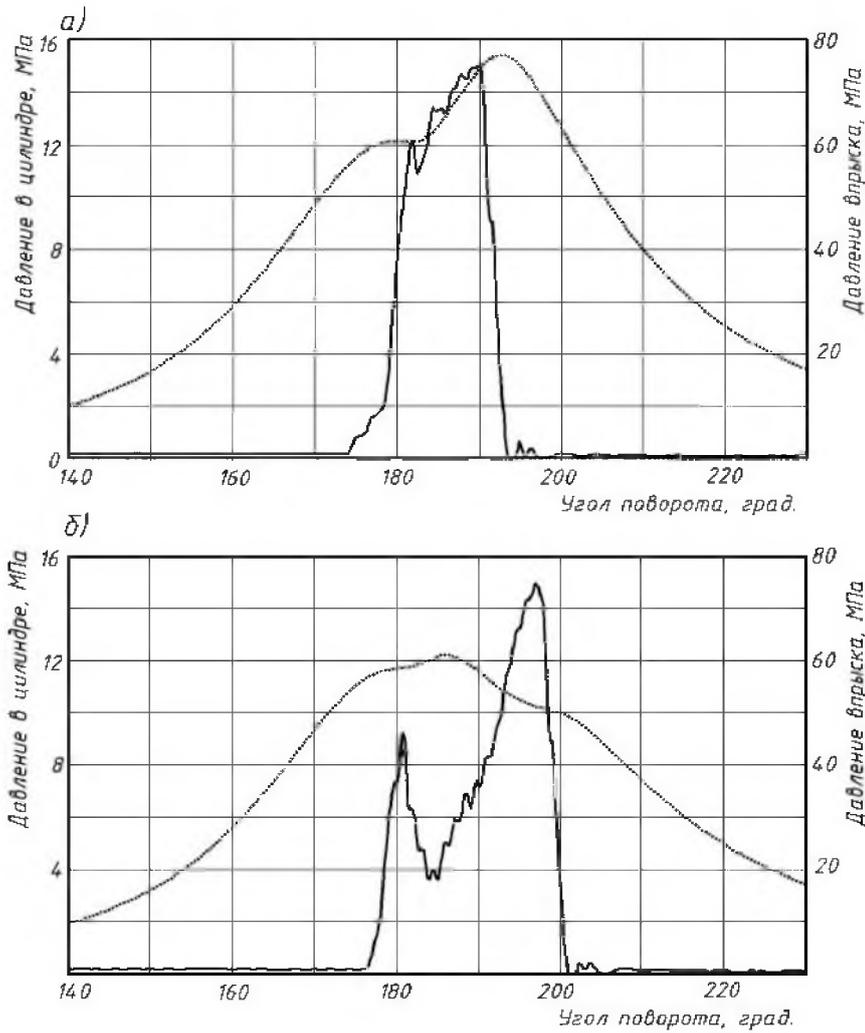


Рисунок 1 – Рабочие процессы малооборотного двигателя с пологим ростом давления впрыска в начальной стадии (а) и с двухфазным впрыском топлива (б) [8]:

— — — — — давление топлива перед распылителем; — давление в цилиндре

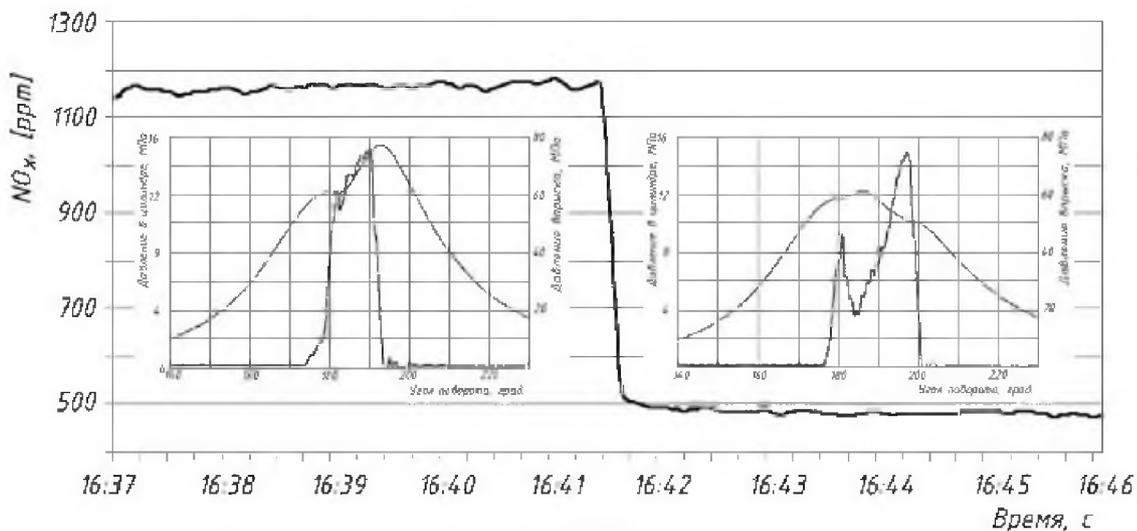


Рисунок 2 – Переход двигателя с электронным управлением с режима экономической работы на режим, обеспечивающий минимальное содержание оксидов азота в отработавших газах

При этом максимальное давление цикла снижается с 15,7 до 12,2 МПа. В то же время отмечается снижение выбросов NO_x при переходе на режим с предварительным впрыском с 1200 до 480 ppm.

2. Математическая модель зависимости удельных выбросов оксидов азота от нагрузки, угла опережения впрыска топлива и двухфазного впрыска топлива главных двигателей 7RT-Flex82T

С целью получения математической модели, описывающей влияние *нагрузки двигателя, угла опережения впрыска топлива и двухфазного впрыска топлива* главных двигателей 7RT-Flex82T на значение *удельных выбросов* оксидов азота в отработавших газах, эксперименты проводились с учетом теории планирования эксперимента [9] по представленному в таблице 1 плану.

Требуемая для решения данной задачи математическая модель имеет следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y – значение *удельных выбросов* оксидов азота в отработавших газах главного дизельного двигателя, г/(кВт·час);

x_i, x_j – значения факторов в кодированном масштабе;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значения коэффициентов уравнения регрессии.

Значения коэффициентов математической модели (1) определяются с использованием следующего выражения:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}. \quad (2)$$

Например, расчет значения коэффициента b_1 при x_1 осуществлялся следующим образом:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{27} x_{1i} y_i}{\sum_{i=1}^{27} x_{1i}^2} = -30,99 / 18 = -1,722.$$

Аналогично были определены значения всех коэффициентов математической модели (1):

$$b'_0 = 294 / 27 = 10,9; \quad b_2 = 55,9 / 18 = 3,106; \quad b_3 = -84,1 / 18 = -4,671;$$

$$b_{12} = -5,9 / 12 = -0,4917; \quad b_{13} = 8,86 / 12 = 0,7383; \quad b_{23} = -16,0 / 12 = -1,3317;$$

$$b_{11} = -0,8 / 6 = -0,1333; \quad b_{22} = -7,39 / 6 = -1,2317; \quad b_{33} = 0,1 / 6 = 0,017.$$

Для определения дисперсии воспроизводимости $s_{\text{воспр}}^2$, в центре плана были поставлено три опыта и получены следующие значения y :

$$y_1^0 = 11,82; \quad y_2^0 = 11,95; \quad y_3^0 = 11,81; \quad \bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 11,86;$$

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / (u - 1) = 0,0122 / 2 = 0,0061; \quad s_{\text{воспр}} = 0,078.$$

Для расчета коэффициентов математической модели (1) был реализован полный эксперимент – три фактора на трёх уровнях, то есть эксперимент вида 3^3 . Для реализации подобного эксперимента необходимо провести $3^3 = 27$ опытов для трёх независимых факторов z_1, z_2 и z_3 при трех значениях каждого фактора (в безразмерной системе координат это: +1 – максимальное значение фактора; 0 – среднее значение фактора; -1 – минимальное значение фактора). В качестве независимых были приняты следующие факторы: z_1 – нагрузка главного двигателя в процентах от максимальной длительной мощности (% MCR); z_2 – *угол опережения впрыска топлива в градусах* поворота коленчатого вала главного двигателя до верхней мертвой точки ($^\circ$ ПКВ до ВМТ) и z_3 – удельная масса предвпрыска топлива (отношение массы предвпрыска топлива к максимально возможному значению массы предвпрыска топлива), %.

Проведение измерения исследуемых величин в условиях эксплуатации главных дизельных двигателей осуществлялось с учетом рекомендаций, изложенных в работе [4].

Матрица планирования полный факторный эксперимент вида 3^3 , значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты 27 проведённых опытов и рассчитанные значения исследуемой величины (*удельные выбросы* оксидов азота в отработавших газах главного двигателя в г/(кВт·час)) представлены в таблице 1.

Далее используя приведенную в работе [9] методику по найденному значению дисперсии воспроизводимости были оценены дисперсии всех коэффициентов математической модели (1), что позволило оценить их значимость по критерию Стьюдента.

Проверка по критерия Стьюдента для уровня значимости $p = 0,05$ показала, что все коэффициенты модели, кроме коэффициента b_{33} , являются значимыми. После исключения незначимого коэффициента математическая модель (1) будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = 11,81 - 1,722x_1 + 3,106x_2 - 4,671x_3 - 0,4917x_1x_2 + 0,7383x_1x_3 - 1,3317x_2x_3 - 0,1333x_1^2 - 1,2317x_2^2 \quad (3)$$

Адекватность математической модели (3) результатам проведенного эксперимента проверена по критерию Фишера с использованием следующей зависимости:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь } s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 1,718 / 18 = 0,095,$$

где l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, равное 9.

Таблица 1 – Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат						Исследуемая величина, г/(кВт·час)	
	z_1 , % MCR	z_2 , ° ПКВ до ВМТ	z_3 , % предвпрыска	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 - 2/3$	$x_2^2 - 2/3$	$x_3^2 - 2/3$	Из эксперимента y	Из уравнения (1) \hat{y}
1	25	7,5	0	-1	-1	-1	1/3	1/3	1/3	12,17	12,64
2	25	7,5	50	-1	-1	0	1/3	1/3	-2/3	8,52	8,57
3	25	7,5	100	-1	-1	+1	1/3	1/3	1/3	4,87	4,49
4	25	12,5	0	-1	0	-1	1/3	-2/3	1/3	19,32	18,81
5	25	12,5	50	-1	0	0	1/3	-2/3	-2/3	13,52	13,40
6	25	12,5	100	-1	0	+1	1/3	-2/3	1/3	7,73	7,98
7	25	17,5	0	-1	+1	-1	1/3	1/3	1/3	22,41	22,51
8	25	17,5	50	-1	+1	0	1/3	1/3	-2/3	15,69	15,76
9	25	17,5	100	-1	+1	+1	1/3	1/3	1/3	8,96	9,02
10	50	7,5	0	0	-1	-1	-2/3	1/3	1/3	10,63	10,68
11	50	7,5	50	0	-1	0	-2/3	1/3	-2/3	7,44	7,47
12	50	7,5	100	0	-1	+1	-2/3	1/3	1/3	4,25	4,00
13	50	12,5	0	0	0	-1	-2/3	-2/3	1/3	16,88	16,48
14	50	12,5	50	0	0	0	-2/3	-2/3	-2/3	11,82	11,81
15	50	12,5	100	0	0	+1	-2/3	-2/3	1/3	6,75	7,14
16	50	17,5	0	0	+1	-1	-2/3	1/3	1/3	19,58	19,55
17	50	17,5	50	0	+1	0	-2/3	1/3	-2/3	13,71	13,68
18	50	17,5	100	0	+1	+1	-2/3	1/3	1/3	7,83	7,55
19	75	7,5	0	+1	-1	-1	1/3	1/3	1/3	8,84	8,71
20	75	7,5	50	+1	-1	0	1/3	1/3	-2/3	6,19	6,11
21	75	7,5	100	+1	-1	+1	1/3	1/3	1/3	3,54	3,51
22	75	12,5	0	+1	0	-1	1/3	-2/3	1/3	14,03	13,89
23	75	12,5	50	+1	0	0	1/3	-2/3	-2/3	9,82	9,95
24	75	12,5	100	+1	0	+1	1/3	-2/3	1/3	5,61	6,02
25	75	17,5	0	+1	+1	-1	1/3	1/3	1/3	16,27	16,60
26	75	17,5	50	+1	+1	0	1/3	1/3	-2/3	11,39	11,34
27	75	17,5	100	+1	+1	+1	1/3	1/3	1/3	6,51	6,07
$\sum_{i=1}^{N=27} (y_i - \hat{y}_i)^2$										1,718	

Тогда $F = 0,095 / 0,0016 = 15,6$.

Табулированное значение критерия Фишера для уровня значимости $p = 0,05$, $f_1 = 18$, $f_2 = 2$, $F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$.

Так как $F = 15,6 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$, то математическая модель (3) адекватно описывает результаты проведенного эксперимента.

Следовательно, полученная математическая модель может быть использована для оценки

влияния нагрузки, угла опережения впрыска топлива и двухфазного впрыска топлива главных дизельных двигателей типа 7RT-Flex82T производства компании «Wartsila» на значение удельных концентраций оксидов азота в их отработавших газах.

Заключение

1. В системах с электронным управлением процессом топливоподачи отсутствие жесткого алгоритма управления законом впрыска позволяет изменять характер протекания рабочего цикла в процессе эксплуатации двигателя в зависимости от поставленной задачи. Если стоит задача добиться максимальной экономичности двигателя, может быть реализован закон подачи топлива с пологим ростом давления впрыска в начальной стадии. Если необходимо максимально снизить содержание оксидов азота, реализуется закон подачи с двухфазным впрыском топлива. Переход с одного режима на другой осуществляется путем изменения алгоритма управления, на который необходимо время в пределах 0,25 с.

2. Используя метод планирования эксперимента, а также результаты проведенных в судовых условиях опытов получена математическая модель для оценки влияния *нагрузки, угла опережения впрыска топлива и двухфазного впрыска топлива* главных дизельных двигателей типа 7RT-Flex82T производства компании «Wartsila» на значение *удельных концентраций* оксидов азота в их отработавших газах.

3. Полученная математическая модель позволяет решать задачу оптимизации значений угла опережения впрыска топлива и массы предвпрыска топлива в зависимости от нагрузки и эксплуатационного состояния главного судового дизельного двигателя с целью снижения удельных выбросов оксидов азота до значений, нормируемых правилом 13 Окислы азота Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78.

Литература

1. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания, том 2 / И.В. Возницкий, А.С. Пунда. – М.: Моркнига, 2008. – 470 с.
2. Лашко В. А. Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». – 2014. – Том 5. – № 1. – С. 260-287.
3. Николаев Н.И. Теплотехнические и экологические параметры современных дизельных и котельных установок морских судов в эксплуатации: монография / Н.И. Николаев, Н.Н. Зиненко, В.Е. Панамарев. – Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2017. – 154 с.

4. Иванченко А. А. Техника и технология нейтрализации в отработавших газах СЭУ: учебное пособие / А. А. Иванченко. – СПб.: СПГУВК, 2012.– 111 с.
5. Гальшнев Ю.В. Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей: учебное пособие. Изд. второе перераб. и доп. / Ю.В. Гальшнев, А.Б. Зайцев, А.А. Сидоров, А.Ю. Шабанов, И.А. Яксон. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. – 355 с.
6. Мельник Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. – 2013.– № 3. – С. 39-53.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotasio, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Современные тенденции в организации рабочего процесса двигателей. URL: <http://mirmarine.net/dvs/toplivnye-sistemy/pokazateli-raboty-toplivnoj-apparatury-sovremennykh-dizelej/420-sovremennye-tendentsii-v-organizatsii-rabocheho-protssesa-dvigatelj> (дата обращения 28.05.2019).
9. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк, 1985. – 327 с.
10. Туркин А.В. Моделирование рабочих процессов малооборотного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота / А.В. Туркин, В.А. Туркин, А.Ю. Самойленко // Морские интеллектуальные системы. – 2018. – № 1 (39). – Т.1. – С. 106-110.
11. Кондратьев С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.– Новороссийск, 2004.
12. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 1). //Эксплуатация морского транспорта.– 2016.– № 3(80).– С. 54-60.
13. Дубровин Р.Г., Герасиди В.В. Обзор структуры современного портового перегрузочного комплекса по перевалке зерновых культур//Наука и инновации. – 2009.– Т. 13-5.– С. 12.

14. Герасиди В., Дубровин Р.Г. Эксплуатация турбокомпрессоров судовых дизель-генераторов, работающих на тяжелом топливе// Наука и инновации.– 2009.– Т. 14.– С. 3.
15. Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. Контроль состояния двигателя фирмы "caterpillar" сат 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам.// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 1-1 (39).– С. 100-105.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnaya Konventsia po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (МК MARPOL-73/78), Kniga III, Sankt-Peterburg, АО «TsNIIMF», 2017. 412 p.
2. Voznitskiy I.V., Punda A.S. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya, tom 2. Moscow, Morkniga, 2008. 470 p.
3. Lashko V. A. (2014). Perspektivy razvitiya intellektual'nykh porshnevnykh DVS. Elektronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU», Tom 5, 1, 260-287.
4. Nikolaev N.I., Zinenko N.N., Panamarev V.E. Teploekhnicheskies i ekologicheskie parametry sovremennykh dizel'nykh i kotel'nykh ustanovok morskikh sudov v ekspluatatsii, monografiya. Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2017. 154 p.
5. Galyshev Yu.V., Zaytsev A.B., Sidorov A.A., Shabanov A.Yu.Yakson., I.A. Rabochie protsessy i toksichnost' otrabotavshikh gazov sudovykh dizel'nykh i gazoporshnevnykh dvigateley, uchebnoe posobie. Izd. vtoroe pererab. i dop. Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2019. 355 p.
6. Mel'nik G.V. (2013). Razvitie dvigatelestroeniya za rubezhom (po materialam kongressa CIMAC 2013). Dvigatelistroenie, 3, 39-53.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotiasios, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Sovremennye tendentsii v organizatsii rabocheho protsessa dvigateley. URL: <http://mirmarine.net/dvs/toplivnye-sistemy/pokazateli-raboty-toplivnoj-apparatury-sovremennykh-dizelej/420-sovremennye-tendentsii-v-organizatsii-rabocheho-protsessa-dvigatelej> (data obrashcheniya 28.05.2019).
9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. Ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vyssh. shk, 1985. 327 p.
10. Turkin A.V., Turkin V.A., Samoylenko A.Yu. (2018). Modelirovanie rabochikh protsessov maloobrotного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота. Morskie intellektual'nye sistemy, 1 (39), T.1, 106-110.
11. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energoberezheniya: Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk.- Novorossiysk, 2004.
12. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1). Eksploatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3(80). S.54-60.
13. Dubrovin R.G., Gerasidi V.V. Obzor struktury sovremenного portovogo peregruzochnого комплекса по перевалке зernovykh kul'tur//Nauka i innovatsii. 2009. T. 13-5. S. 12.
14. Gerasidi V., Dubrovin R.G. Eksploatatsiya turbokompressorov sudovykh dizel'-generatorov, rabotayushchih na tyazhelom toplive// Nauka i innovatsii. 2009. T. 14. S. 3.
15. Hekert E.V., Nikolaev N.I., Gerasidi V.V. Kontrol sostoyaniya dvigatelya firmy "cat-erpillar" сат 3512 gruntonasosnoj ustanovki zemsnyarada po vibratsionnym parametram.// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 100-105.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4
DOI: 10.34046/aumsuomt92/17

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ СУДОВЫМИ ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ОПЕРЕЖЕНИЕМ ВПРЫСКА ТОПЛИВА

Р.Ю. Атласов, аспирант
В.А. Туркин, доктор технических наук
Г.В. Игнатенко, аспирант

Выполнен обзор мероприятий, направленных на снижение выбросов оксидов азота судовыми дизельными двигателями посредством настройки их регулировочных параметров. Показано, что одним из таких параметров, позволяющим быстро решать задачу оперативного управления концентра-