

4. Саушев А. В. Синтез настраиваемых электротехнических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2012. — Вып. 4 (16).
5. Саушев А. В. Математическое описание областей работоспособности электромеханических систем / А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 6.
6. Саушев А. В. Аналитическое описание областей работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2009. — Вып. 4 (IV).
7. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
8. Диго Г. Б. Использование эллипсоидов для описания области работоспособности / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго // Информационные технологии. — 2008. — № 1 (15).
9. Саушев А. В. Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем / А. В. Саушев // Информатика и системы управления. — 2012. — № 3 (33).
10. Саушев А. В. Методы линейной аппроксимации граничных точек областей работоспособности технических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2013. — Вып. 3 (19).
11. Саушев А. В. Запас работоспособности как целевая функция при синтезе технических систем / А. В. Саушев // Математика и ее приложения: межвуз. сб. науч. тр. — СПб., 2011. — Вып. 3.
12. Саушев А. В. Метод и алгоритмы параметрического синтеза электротехнических систем по критерию запаса работоспособности / А. В. Саушев // Информационные технологии. — 2012. — № 12.
13. Саушев А. В. Параметрический синтез технических систем на основе линейной аппроксимации области работоспособности / А. В. Саушев // Автометрия. — 2013. — Т. 49, № 1.
14. Саушев А. В. Аналитический и поисковый методы параметрической оптимизации технических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2011. — Вып. 3 (11).
15. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики / В. Л. Рвачев. — Киев: Техника, 1967. — 213 с.
16. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: СПГУВК, 2012. — 272 с.
17. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. В. Статников. — М.: Дрофа, 2006. — 176 с.

УДК 621.181.012

В. Е. Панамарев,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской
университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА СОСТАВ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ

INFLUENCE OF AUXILIARY BOILER EXCESS AIR COEFFICIENT ON EXHAUST GAS COMPONENTS

В настоящее время существуют утвержденные требования к выбросам вредных веществ в атмосферу с отработанными газами двигателей внутреннего сгорания [1]. Данные требования не распростра-

няются на котельные установки, мощность и потребление топлива которых превышает порой суммарную мощность и ежедневный расход топлива на главные и вспомогательные двигатели одного и того же судна. Главная идея статьи состоит в том, чтобы проанализировать потребление топлива котельными установками и возможность снижения концентрации вредных выбросов путем изменения коэффициента избытка.

On the time being there are reinforced regulations related to the diesel engines exhaust gas harmful substances to atmosphere [1]. These regulations do not extend to the boiler plants, having steam capacity and fuel consumption exceeding total daily fuel consumption of main and auxiliary engines summarized, installed on same vessel. Main idea of article is to analyze fuel oil consumption of the steam boiler plants and possibility of harmful substance concentration reduction by change of excess air coefficient.

Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, вспомогательная котельная установка, выбросы SO_x , NO_x , CO_2 .

Key words: excess air coefficient, auxiliary boiler, emission of SO_x , NO_x , CO_2 .

ОСНОВНУЮ роль в загрязнении воздушного бассейна транспортным флотом играют выбросы токсичных веществ в отработанных газах (ОГ) главных и вспомогательных двигателей, в качестве которых в подавляющем большинстве используются дизели. Но загрязнение от главных двигателей происходит в основном за пределами акватории порта, а в порту главным источником загрязнения является котельная установка. Существует ошибочное мнение, о том, что потребление топлива вспомогательными котельными установками незначительно, в то время как на современных судах типоразмеров Aframax оно составляет от 80 до 120 тыс. т (20 % от мирового дедвейта), Suezmax — от 120 до 200 тыс. т (15 % от общего мирового дедвейта). На судах, на которых применима линейная грузовая система, установлены судовые вспомогательные котельные установки паропроизводительностью до 55 т/ч и мощность до 38,8 МВт, что соизмеримо с главными котельными установками. Для обеспечения надежности работы котельной установки обычно включают два вспомогательных котла, которые должны обеспечить работу грузовых насосов и осуществить выгрузку груза в максимально короткие сроки. Таким образом, суммарная мощность вспомогательной котельной установки зачастую превышает суммарную мощность главного двигателя и вспомогательных дизель-генераторов в несколько раз.

Анализ состава котельного оборудования мирового танкерного флота показывает, что основным производителем вспомогательных котлов, установленных на танкерах, являются котельные установки, произведенные фирмой “Aalborg Industries” (с 2011 г. “Alfalaval — Aalborg”).

Так, наиболее часто встречаемая котельная установка в эксплуатации на танкерах — это установка производства фирмы “Aalborg Industries” типа MISSION™OL с различной паропроизводительностью от 18 000 до 35 000 кг/ч и топочным устройством KBSD 1500, KBSD 1900 или KBSD 2650 с соответствующим расходом топлива 1500, 1900 и 2650 кг/ч [2].

Для проведения экспериментальных исследований был выбран наиболее распространенный тип судов с наибольшим количеством судов в серии, это танкеры типа Aframax дедвейтом 106 тыс. т с главным двигателем фирмы “MAN Diesel & Turbo” 6S60MC максимальной мощностью 11 327 кВт при 97 мин⁻¹ и котельной установкой, состоящей из двух котлов фирмы “Alfa Laval Aalborg”, типа MISSION™OL паропроизводительностью 25 000 кг/ч, с топочным устройством KBSD 1900. Данные суда, на которых производился ежесуточный замер топлива, работают в районе Черного, Средиземного, Балтийского и Северного морей. Временной период ежесуточных замеров один год.

На рис. 1 представлена зависимость расхода топлива на котельную установку на различных режимах одного из судов. Как видно из рис. 1, максимальный суточный расход топлива на котельную установку приходится на грузовые операции, то есть выгрузку, что, в свою очередь, составляет 52 % от суммарного годового потребления топлива на котельную установку и может достигать 50 т/сут. Это превышает суммарное суточное потребление топлива на главный и вспомогательные двигатели этого же судна.

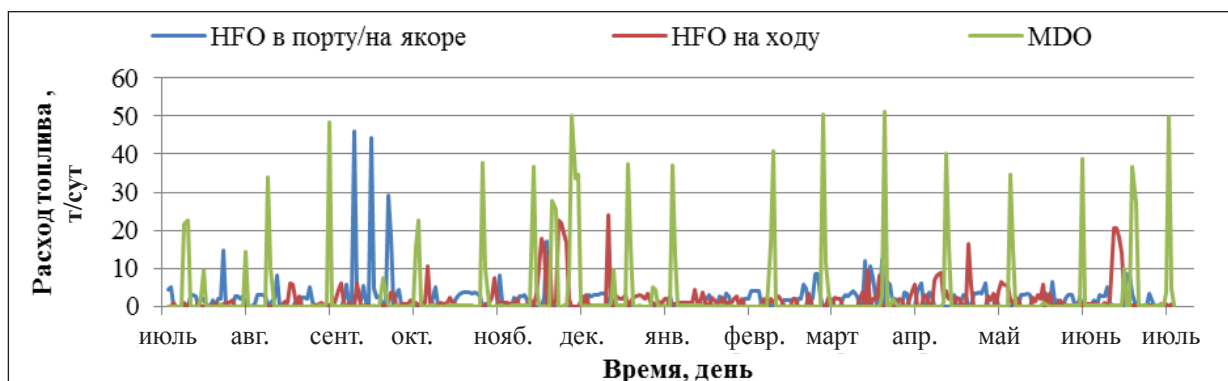


Рис. 1. Расход топлива на котельную установку на различных режимах эксплуатации

Для оценки влияния загрязнения на окружающую среду необходимо произвести экспериментальные исследования в эксплуатации по определению количества загрязняющих веществ в отработанных газах котельной установки танкеров. Эксперимент с замером всех теплотехнических параметров котельной установки, а также замером количества и концентрации вредных веществ в отработанных газах проведен на существующих судах СКФ «Новошип».

Измерения осуществлялись сертифицированными приборами согласно разработанной методике [3, с. 136–140]. Предложенная методика апробирована и применяется при проведении энергетического и экологического аудита на судах компании СКФ «Новошип». Метод определения количества вредных выбросов в атмосферу используется в Системе мониторинга энергоэффективности и экологической безопасности судов (S3ES-NOVOSHIP), патент на полезную модель № 110068, зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 ноября 2011 г. [4].

Места отбора проб выбраны согласно ГОСТ 17.2.4.06-90 и разработанной методике [5; 6, с. 96–100]. Эксплуатация приборов, используемых в процессе проведения измерений, производилась в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019, правилами технической эксплуатации и правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, утвержденными Госэнергонадзором. Расположение и организация рабочих мест при проведении работ выполнялись в соответствии с ГОСТ 12.2032 и ГОСТ 12.2.033.

Замеры теплотехнических параметров и концентрации загрязняющих веществ производились в несколько этапов: при увеличении нагрузки, на установившемся режиме, при снижении нагрузки, а также при изменении коэффициента избытка воздуха. Результаты замеров и расчет массовых выбросов при снижении нагрузки представлены в табл. 1.

Особое внимание уделялось эксперименту при изменении коэффициента избытка воздуха. На начало замеров нагрузка котельной установки составляла 50 % от максимальной, что соответствует нагрузке котельной установки при работе на систему инертных газов. Соотношение топливо–воздух регулировалось в ручном режиме, на начало эксперимента коэффициент избытка воздуха был равен 1,15 ($\alpha = 1,15$), что соответствует инструкции изготовителя. В дальнейшем коэффициент избытка воздуха увеличивался до 1,95 поэтапно в течение 35 мин. Далее коэффициент избытка воздуха был установлен на значение 1,05, но, не достигнув данного значения ($\alpha = 1,07$), сработала сигнализация по срыву пламени (сильное задымление в топке, фотоэлемент определил как срыв пламени) и соответственно была дана команда на остановку котла. После продувания и запуска котла (рис. 2) коэффициент избытка воздуха был установлен 1,95, после чего плавно поэтапно снижался до 1,02 с последующим увеличением.

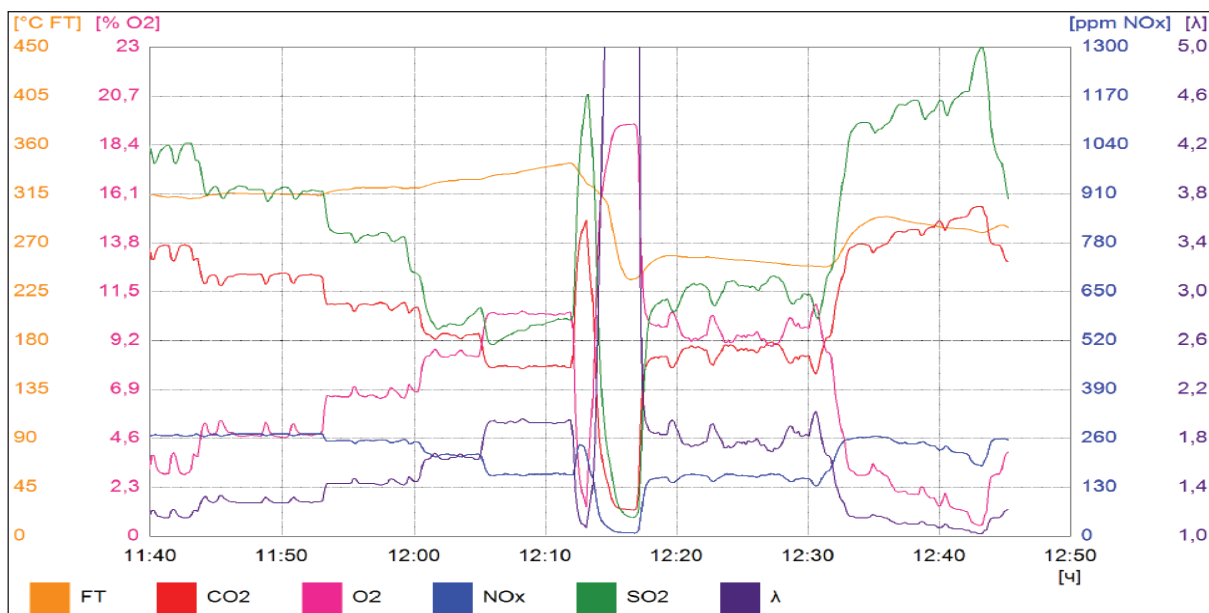


Рис. 2. Результаты замеров в реальном режиме времени при поэтапном изменении коэффициента избытка воздуха

Таблица 1

Результаты замеров и расчет массовых выбросов

Номер испытания		1	2	3	4	5	6
Нагрузка	%	95 %	90 %	75 %	50 %	25 %	15 %
Температура выхлопных газов	°C	420	420	416,2	368,1	296	279,
Атмосферное давление	кПа	100,2	100,2	100,3	100,3	100,4	100,4
Относительная влажность	%	31,5	31,5	31,4	31,4	31,1	31,2
Абсолютная влажность	г/кг	5,89	5,89	5,85	5,83	5,77	5,78
Температура окружающей среды	°C	24	24	23,94	23,9	23,9	23,9
Замер. расход топлива	кг/ч	1805	1710	1425	950	475	285
Расход воздуха	кг/ч	26 675	25 111	20 419	13 843	7129	4471
Диаметр сечения	м	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Площадь сечения	м ²	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
Скорость газов	м/с	10,3	9,7	7,9	5,35	2,75	1,72
Объем газов	м ³ /ч	22 078	20 792	16 934	11 468	5895	3687
Поток выхлопных газов	кг/ч	28 480	26 821	21 844	14 793	7604	4756
Коэффициент избытка воздуха		1,15	1,14	1,12	1,14	1,17	1,22
Концентрация CO ₂	%	13,8	13,8	14,1	13,8	13,4	12,8
Концентрация O ₂	%	2,83	2,73	2,44	2,71	3,3	4,03
Концентрация NO _x	ppm	369,6	373,2	354,7	352,1	283,3	257,5
Концентрация SO ₂	ppm	668	679,5	677,4	645,3	617,4	580
Массовые выбросы							
Выбросы твердых частиц	кг/ч	0,72	0,68	0,57	0,38	0,19	0,11
Массовый выброс SO ₂	кг/ч	47,05	44,58	37,15	24,76	12,38	7,43
Массовый выброс CO	кг/ч	23,76	22,51	18,75	12,50	6,25	3,75
Массовый выброс NO _x	кг/ч	16,65	15,83	12,25	8,24	3,41	1,94

При обработке результатов и визуально из рис. 2 видно, что изменение коэффициента избытка воздуха осуществлялось поэтапно и ступенчато. В результате чего были определены девять этапов. С первого по пятый этап — это повышение коэффициента избытка воздуха с 1,15 до 1,95. Шестой этап (остановка и продувка котла) был исключен. С седьмого по девятый этап — это уменьшение коэффициента избытка воздуха. На всех этапах был произведен расчет массовых выбросов загрязняющих веществ.

Подобные исследования проводились на танкере этой же серии (sistership), замеры на котором осуществлялись в феврале 2012 г. Условия, методика и приборное обеспечение замеров аналогичны предыдущим. Отличие составляла сама процедура изменения коэффициента избытка воздуха. Так же как и в предыдущем случае, нагрузка на начало эксперимента составляла 50 % от максимальной нагрузки котельной установки. Коэффициент избытка воздуха на начало эксперимента составил 1,15. Далее коэффициент избытка воздуха увеличивался равными долями и с равным интервалом времени до значения 1,83 и последующим равномерным уменьшением до значения 1,09. После чего соотношение воздух–топливо было переведено в автоматический режим, в результате чего коэффициент избытка воздуха установился равным 1,15. Результаты замеров, произведенных в реальном режиме времени при изменении коэффициента избытка воздуха, изображены на рис. 3.

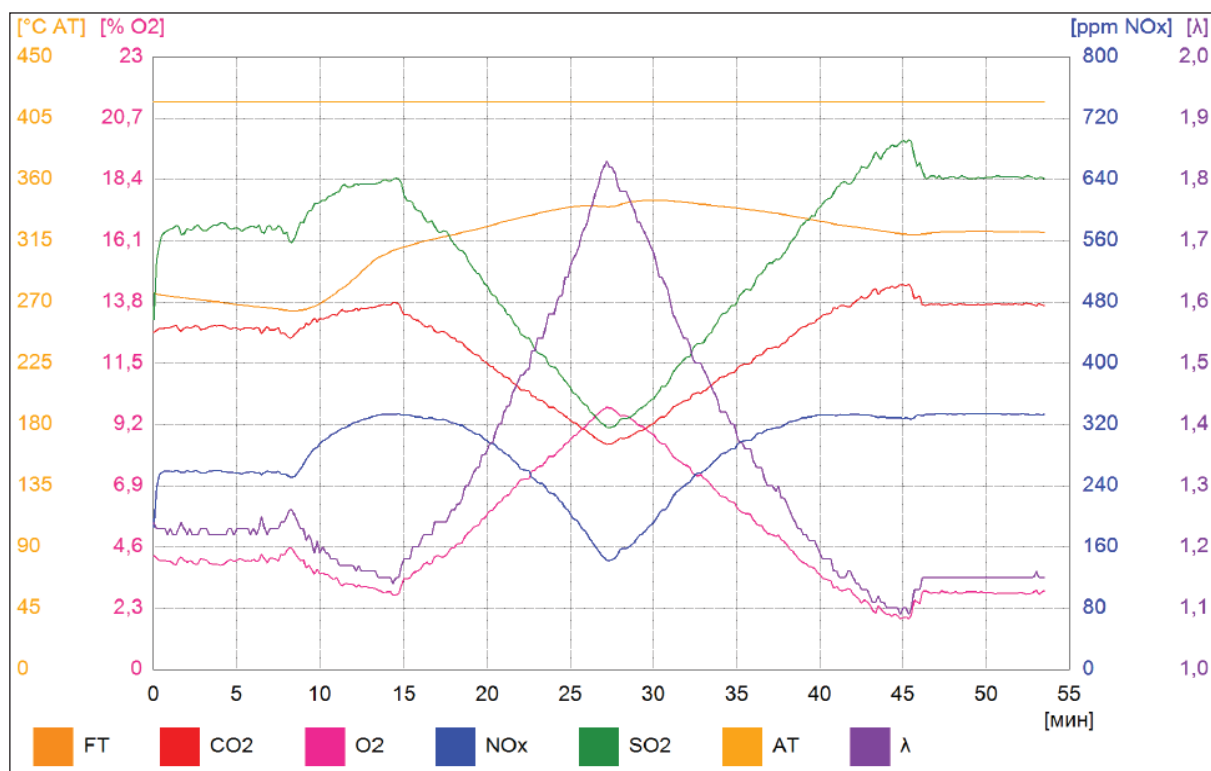


Рис. 3. Результаты замеров в реальном режиме времени при изменении коэффициента избытка воздуха

В результате проведенного эксперимента был произведен расчет массовых выбросов (табл. 2).

По полученным результатам построены следующие зависимости:

- 1) температуры отработанных газов от коэффициента избытка воздуха;
- 2) массовых выбросов твердых частиц от коэффициента избытка воздуха;
- 3) массовых выбросов SO_2 от коэффициента избытка воздуха;

4) массовых выбросов CO от коэффициента избытка воздуха;

5) массовых выбросов NO_x от коэффициента избытка воздуха;

Определены полиномиальные уравнения четвертого порядка полученных зависимостей:

$$\begin{aligned}T_r &= 3375\alpha^4 - 20\,756\alpha^3 + 47\,378\alpha^2 - 47\,508\alpha + 17\,967; \\M_{TB} &= 0,2565\alpha^4 - 1,5774\alpha^3 + 3,6007\alpha^2 - 3,6106\alpha + 1,7227; \\M_{SO_2} &= 16,716\alpha^4 - 102,8\alpha^3 + 234,66\alpha^2 - 235,3\alpha + 112,27; \\M_{CO} &= 8,4397\alpha^4 - 51,903\alpha^3 + 118,48\alpha^2 - 118,8\alpha + 56,682; \\M_{NO_x} &= 0,0959\alpha^4 + 9,1011\alpha^3 - 54,272\alpha^2 + 95,024\alpha - 43,616,\end{aligned}$$

где T_r — температуры отработанных газов;

M_{TB} — массовые выбросы твердых частиц;

M_{SO_2} — массовые выбросы SO₂;

M_{CO} — массовые выбросы CO;

M_{NO_x} — массовые выбросы NO_x;

α — коэффициент избытка воздуха.

Таблица 2

Результаты замеров и расчет массовых выбросов

Номер испытания		1	2	3	4	5	6
Температура выхлопных газов	°C	395,6	317,3	325,3	344,5	326,8	321,4
Атмосферное давление	кПа	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Относительная влажность	%	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
Температура окружающей среды	°C	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Замер. расход топлива	кг/ч	968,2	953,3	954,8	958,4	955,1	954,1
Расход воздуха	кг/ч	14 378	15 195	16 880	21 162	14 253	14 116
Диаметр сечения	м	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Площадь сечения	м ²	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
Скорость газов	м/с	5,55	5,84	6,45	8	5,5	5,45
Объем газов	м ³ /ч	11 896	12 518	13 825	17 148	11 789	11 682
Поток выхлопных газов	кг/ч	15 346	16 148	17 835	22 121	15 208	15 070
Коэффициент избытка воздуха		1,16	1,24	1,36	1,68	1,16	1,15
Концентрация CO ₂	%	13,5	12,7	11,5	9,2	13,6	13,7
Концентрация O ₂	%	3,13	4,28	5,77	8,84	3,09	2,89
Концентрация NO _x	ppm	325,4	324,9	299,6	190,0	332,3	333,4
Концентрация SO ₂	ppm	631,2	572,6	502,0	353,1	627,7	643,2
Выброс твердых частиц	кг/ч	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Массовый выброс SO ₂	кг/ч	25,24	24,85	24,89	24,98	24,90	24,87
Массовый выброс CO	кг/ч	12,74	12,55	12,57	12,61	12,57	12,56
Массовый выброс NO _x	кг/ч	7,90	8,30	8,45	6,65	7,99	7,94

На рис. 4 изображены зависимости температуры отработанных газов от коэффициента избытка воздуха и массовые выбросы вредных веществ.

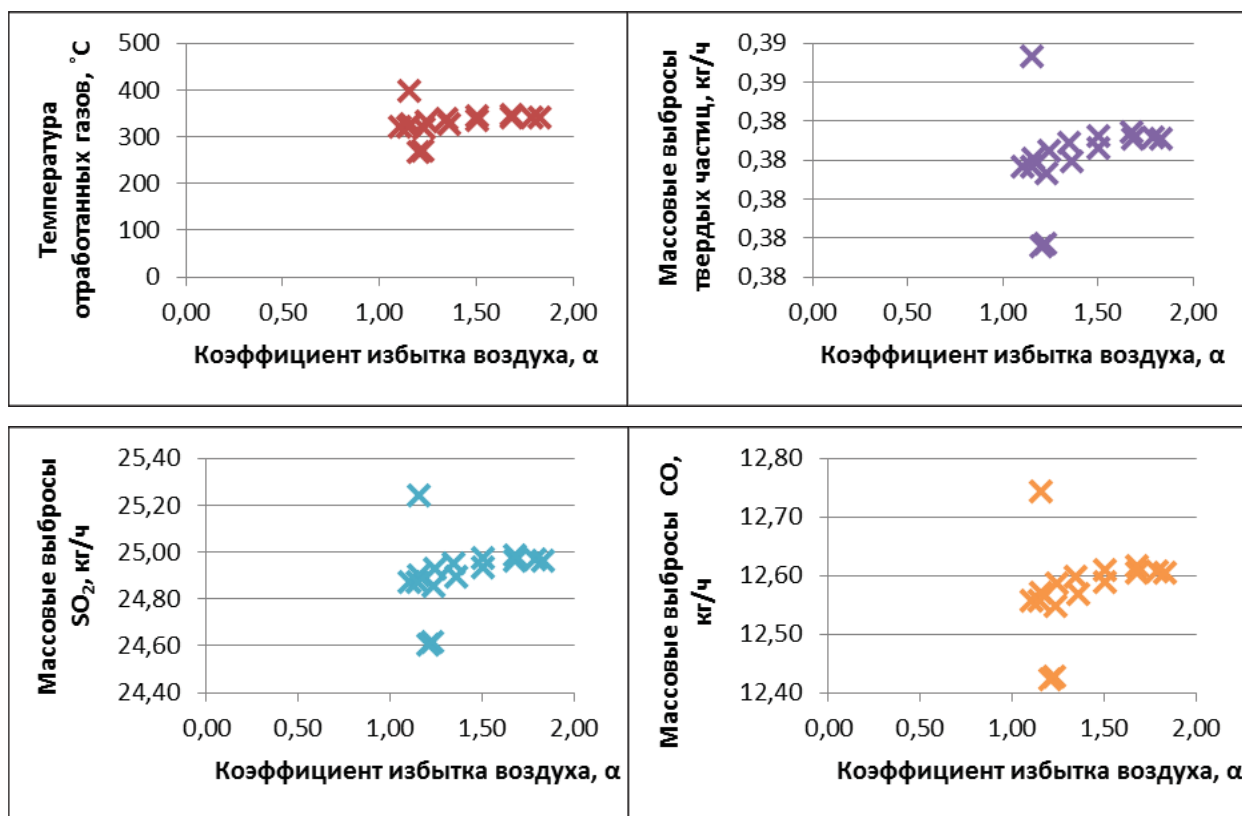


Рис. 4. Зависимости полученных параметров от коэффициента избытка воздуха

На рис. 5 изображена зависимость массового выброса NO_x и коэффициента избытка воздуха по результатам экспериментов, проводимых на двух из судов одной серии NS Challenger и NS Century, а в целом замеры проводились более чем на 20 судах компании СКФ «Новошип», шесть из которых были одной серии.

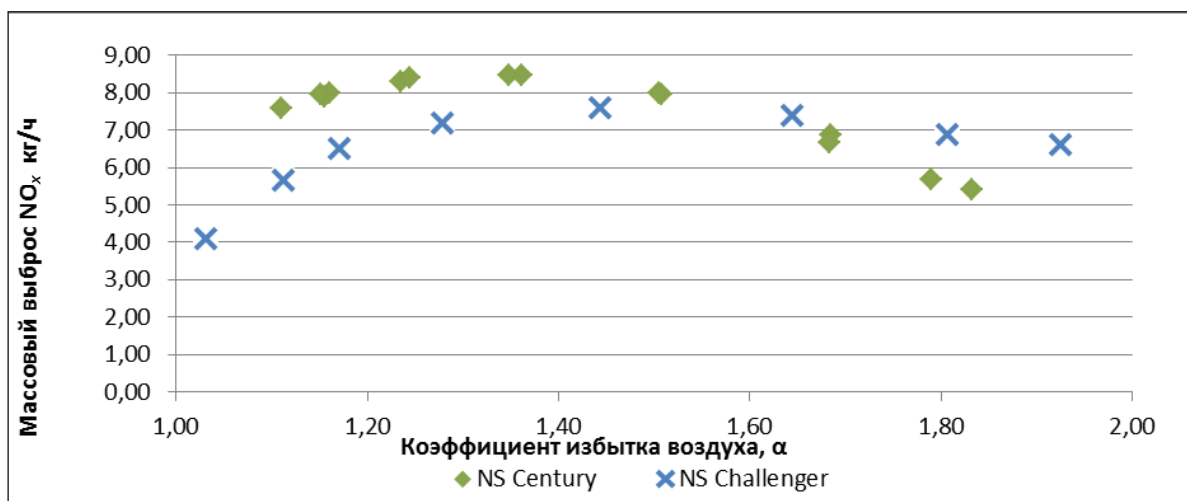


Рис. 5. Зависимость массового выброса NO_x и коэффициента избытка воздуха

В связи с тем, что в полиномиальном уравнении четвертого порядка при определении массовых выбросов NO_x первый член уравнения принимает малое значение, было получено полиномиальное уравнение третьего порядка с достоверностью аппроксимации ($R^2 = 0,9969$), близкой к 1, которое имеет следующий вид:

$$M_{\text{NO}_x} = 9,665\alpha^3 - 55,503\alpha^2 + 96,206\alpha - 44,037.$$

Также полиномиальное уравнение третьего порядка с достоверностью аппроксимации ($R^2 = 0,9921$), близкой к единице, было построено по другим судам одной серии, обобщено и приведено к следующему виду:

$$M_{\text{NO}_x} = 17,812\alpha^3 - 90,432\alpha^2 + 149,81\alpha - 73,696.$$

В результате аппроксимации данных зависимостей (рис. 6) получено полиномиальное уравнение третьего порядка с достоверностью аппроксимации ($R^2 = 0,9999$), близкой к единице, которое имеет вид

$$M_{\text{NO}_x} (\text{общее}) = 13,738\alpha^3 - 72,967\alpha^2 + 123,01\alpha - 58,866.$$

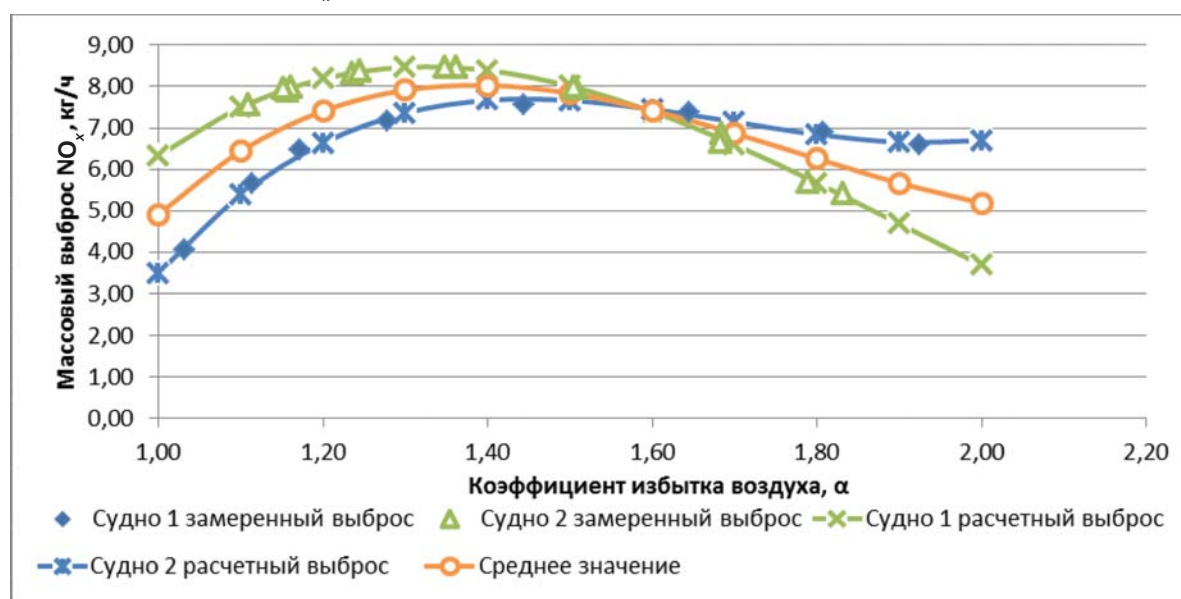


Рис. 6. Зависимости массовых выбросов от коэффициента избытка воздуха

Исходя из полученных данных, максимальная концентрация выбросов NO_x соответствует диапазону коэффициента избытка воздуха от 1,3 до 1,4. При дальнейшем увеличении коэффициента избытка воздуха концентрация NO_x снижается и минимальное значение достигается при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,9. Согласно методическим указаниям по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч [7, с. 24] поправочный коэффициент для определения концентрации оксида азота (NO_x) при коэффициенте избытка воздуха, отличного от 1 ($\alpha \neq 1$), указан в диапазоне от 0,8 до 1,2. В действительности для современных судовых котлов с автоматическим регулированием соотношения топливо–воздух коэффициент избытка воздуха обычно находится в диапазоне 1,15–1,25. Поэтому данное экспериментальное исследование расширяет имеющийся диапазон и может служить рекомендацией по перенастройке автоматики котельной установки с целью уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

Список литературы

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ). — Пересмотр. изд. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2009. — Кн. III. — 304 с. = International Convention for Prevention of Pollution from Ship (MARPOL). — Rev. ed. — В. III.

2. Instruction Manual for boiler plant. — Aalborg Industries, 2005. — Vol. 1, 2: Boiler type 2xMISSION™OL model 25000, Burner type KBSD 1900.

3. Панамарев В. Е. Опыт контроля состава отработавших газов современных судовых дизельных и котельных установок танкеров / В. Е. Панамарев, Н. И. Николаев, Н. Н. Зиненко // Материалы Всерос. межотр. науч.-техн. конф. / С.-Петербург. гос. морской техн. ун-т. — СПб., 2012. — С. 136–140.

4. Пат. 110068 РФ. Система мониторинга энергоэффективности и экологической безопасности судов (S3ES-Novoship). Зарег. 10.11.2011.

5. ГОСТ 17.2.4.06-90. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 16 с.

6. Панамарев В. Е. Контроль состава отработавших газов судовых двигателей и котлов в эксплуатации / В. Е. Панамарев, Н. И. Николаев, Н. Н. Зиненко // XI конф. по судостроению судоходству, деятельности портов, освоению океана и шельфа «Нева-2011», 21–23 сентября 2011 г. — СПб.: Издат.-полиграф. комплекс ЛЕНЭКСПО, 2011.

7. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч. — М.: Гидрометеиздат, 1985.

УДК 517.9

А. Г. Таранин,

доцент,

ФГБОУ ВПО «Государственный
морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ СРЕДСТВАМИ MATLAB

PARAMETRIC PID TUNE OF SHIP DIESEL FREQUENCY COMPENSATORS BY MEANS OF MATLAB PROMPTS

Статья посвящена параметрической настройке регулятора частоты вращения судового дизеля в процессе тренажерной подготовки средствами MATLAB. Для повышения качественных показателей в переходных режимах и упрощения настройки применен ПИД-регулятор. Разработана программа для автоматизации настройки. Приведен пример.

The article is devoted to diesel frequency regulator parametric tuning for training on ship simulator by means of MATLAB. To keep the controller as simple as possible PID-regulator is used for step response rising of quality indicators. For automated tuning the program in codes MATLAB is created. The example is considered.

Ключевые слова: тренажер, судовой дизель, параметрическая настройка, переходный процесс, передаточные функции, ПИД-регулятор.

Key words: simulator, ship diesel, parametric tuning, step response, transfer functions, PID-controller.



ПОВЫШЕНИЕ требований к энергетической эффективности, безопасности и надежности энергетических установок морских и речных судов на базе современных систем автоматизации и управления является важной научно-технической задачей. Процесс оснащения судов сложными техническими средствами и системами, построенными на качественно