

## Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей

Сагин Сергей Викторович<sup>1</sup>, Куропятник Алексей Андреевич<sup>2</sup>  
НУ «Одесская морская академия», Одесса, Украина  
saginsergii@gmail.com<sup>1</sup>, kuropyatnyk83@gmail.com<sup>2</sup>

## Optimization of operating modes exhaust gas wastegate system of marine medium speed diesel

Sagin Sergii<sup>1</sup>, Kuropyatnyk Oleksiy<sup>1</sup>  
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
saginsergii@gmail.com<sup>1</sup>, kuropyatnyk83@gmail.com<sup>2</sup>

*Аннотация – Проанализированы режимы перепуска выпускных газов судового среднеоборотного дизеля 6L20 Wartsila. Выполнены комплексная оценка влияния степени перепуска выпускных газов на эмиссию оксидов азота, удельный эффективный расход топлива и тепловую напряженность дизеля. Приведены результаты исследований, подтверждающие целесообразность использования системы перепуска выпускных газов на режимах, превышающих 75 %-ую нагрузку дизеля.*

*Abstract - The modes of exhaust gas bypass of a marine medium-speed diesel engine 6L20 Wartsila are analyze. A comprehensive assessment of the effect of the degree of exhaust gas bypass on the emission of nitrogen oxides, specific effective fuel consumption and thermal stress of the diesel engine was carried out. The research results are presented confirming the feasibility of using the exhaust gas bypass system in modes exceeding 75 % of the diesel load.*

DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-79-89

Современное судостроение развивается в направлении повышения энергетической и экономической эффективности дизелей при выполнении ужесточающихся экологических международных норм и пра-

вил [1]. Выполнение этих задач невозможно без точного управления на всех эксплуатационных режимах процессами воздухо- и топливоподачи, а также выпуска газов, которое для современных судовых дизелей обеспечиваются электронными системами.

При эксплуатации судовых дизелей возникает необходимость обеспечения экологических показателей его работы, к которым относятся несгоревшие углеводороды  $\text{CH}_x$ , монооксид углерода  $\text{CO}$ , оксиды серы  $\text{SO}_x$ , оксиды азота  $\text{NO}_x$ , входящие в состав выпускных газов.

Основным документом, регламентирующим вредные выбросы в атмосферу от морских транспортных судов, является Приложение VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ). Этим документом выбросы оксидов серы  $\text{SO}_x$  предложено нормировать в соответствии с содержанием серы в топливе, а выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$  – исходя из типа судового дизеля [2].

Системы, обеспечивающие рециркуляцию выпускных газов (exhaust gas recirculation – EGR), как правило, применяются для малооборотных дизелей. Для судовых среднеоборотных дизелей управление потоком выпускных газов осуществляется путем их перепуска (Exhaust gas wastegate – EGW). В этом случае часть отработавших газов дизеля поступают непосредственно в газовыпускную магистраль помимо газотурбокомпрессора.

Использование системы EGW обеспечивает снижение концентрации  $\text{NO}_x$  в выпускных газах, однако при этом (в связи с ухудшением процесса сгорания) снижается мощность дизеля и увеличивается удельный эффективный расход топлива. Кроме того, чрезмерное увеличение количества перепускаемых газов приводит к увеличению температурной напряженности дизеля [3].

Исходя из этого, целью исследования являлось определение оптимального объема перепуска выпускных газов судового среднеоборотного дизеля 6L20 Wartsila. При этом с одной стороны должны быть обеспечены наилучшие для рассматриваемого режима работы дизеля экологические показатели (концентрация  $\text{NO}_x$  в выпускных газах), а с другой – минимальное увеличение (по сравнению с режимом работы без перепуска) удельного эффективного расхода топлива при одновременном поддержании заданного диапазона тепловой напряженности цилиндров дизеля.

Исследование проводилось на трех судовых среднеоборотных дизелях 6L20 фирмы Wartsila с электронной системой управления фазами топливоподачи, воздухо- и газораспределения, которые входили в состав судовой электростанции в качестве дизель-генераторов. Номинальная мощность дизелей составляла  $N_{\text{ном}} = 1200$  кВт при частоте

вращения 1000 об/мин. Дизели имели одинаковый моторесурс работы и эксплуатировались на равновеликих нагрузках. В качестве системы управления выпускными газами на данных дизелях установлена система EWG. Использование этой системы фирма Wartsila рекомендует в первую очередь для ограничения давления наддувочного воздуха при высоких нагрузках и как дополнительную функцию – для снижения выбросов  $\text{NO}_x$ . Согласно проектной документации система EWG обеспечивает перепуск газов в диапазоне 0 ... 10 % [4]. Принципиальная схема системы EWG судового дизеля 6L20 фирмы Wartsila показана на рис. 1.

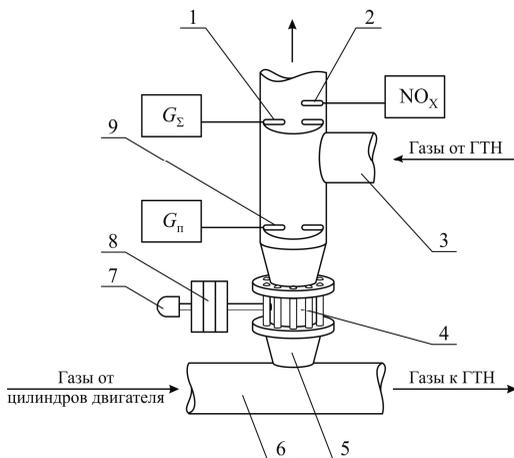


Рис. 1. Принципиальная схема системы перепуска выпускных газов EWG судового среднеоборотного дизеля 6L20 Wartsila:

1, 9 – точки контроля основного и перепускного расхода газов; 2 – точка контроля концентрации  $\text{NO}_x$ ; 3, 6 – выпускные магистрали основного потока газов; 4 – перепускной клапан (wastegate); 5 – выпускные магистрали перепускного потока газов; 7 – контроллер положения перепускного клапана; 8 – пневматический привод перепускного клапана

При проведении исследования контролировались и измерялись параметры, позволяющие определить эмиссию  $\text{NO}_x$ , удельный эффективный расход топлива  $b_e$ , а также эффективную мощность дизеля.

Концентрация  $\text{NO}_x$  в выпускных газах определялась в точке 2 с помощью газоанализатора Testo350XL, который обеспечивал быстрое действие определения 30 ... 90 с и возможность получения как текущего, так и среднего (по результатам до 1000 измерений) значения.

Удельный эффективный расход топлива  $b_e$  рассчитывался по выражению:

$$b_e = \frac{G_{\text{ч}}}{N_{\text{срж}}},$$

где  $N_{\text{срж}}$  – мощность дизеля, на различных режимах работы, кВт;  $G_{\text{ч}}$  – часовой расход топлива (определялся с помощью судовых измерительных средств – расходомера, установленного на магистрали подвода топлива к топливным насосам высокого давления, и таймера), кг/ч,

$$G_{\text{ч}} = \frac{V_{\text{т}} \rho}{t};$$

$V_{\text{т}}$  – объем топлива, прошедший через расходомер, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность топлива при соответствующей температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, в течении которого проводился эксперимент на соответствующем скоростном режиме, час.

Степень перепуска газов, %,

$$\delta_{EWG} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\Sigma}} \cdot 100,$$

где  $G_{\text{п}}$ ,  $G_{\Sigma}$  – соответственно, количество выпускных газов, прошедших через перепускной клапан, кг/с; суммарное количество выпускных газов, поступающих в газовыпускную магистраль от газотурбонагнителя (ГТН) при полностью закрытом перепускном клапане, кг/с.

Значения  $G_{\text{п}}$  и  $G_{\Sigma}$  измерялись с помощью расходомера МТ100S, позволяющего проводить измерения в газовых потоках с температурой до 454°С, в точках 9 и 1 соответственно. Погрешность в измерении расхода газов, определяемого расходомером МТ100S, не превышала  $\pm 0,5$  %, погрешность в измерении эмиссии  $\text{NO}_x$  в выпускных газах газоанализатором Testo350XL составляла  $\pm 3,5$  %, погрешность в определении удельного эффективного расхода топлива не превышала  $\pm 2,5$  % [5]. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 – 3.

Таблица 1

Эмиссия  $\text{NO}_x$ , г/(кВт·ч)

Нагрузка, %	Степень перепуска выпускных газов, $\delta_{EWG}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	8,41	8,36	8,31	8,22	8,18	8,13
65	7,92	7,82	7,68	7,59	7,51	7,48
75	7,63	7,47	7,23	7,15	7,02	6,93
85	7,46	7,10	7,01	6,68	6,57	6,31

Таблица 2  
Удельный эффективный расход топлива,  $b_e$ , г/(кВт·ч)

Нагрузка, %	Степень перепуска выпускных газов, $\delta_{EWG}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	196,6	203,0	204,0	204,7	204,8	205,3
65	195,3	200,5	202,7	203,2	203,3	203,4
75	193,7	196,8	197,3	197,5	197,6	197,7
85	189,2	190,6	190,9	191,2	191,3	191,4

Таблица 3  
Температура газов после ГТН,  $t_g$ , °С

Нагрузка, %	Степень перепуска выпускных газов, $\delta_{EWG}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	283	285	291	298	308	315
65	276	277	280	285	298	301
75	276	278	279	283	288	297
85	273	275	277	281	287	292

Снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  при использовании системы EWG показано на рис. 2. Эффективность использования системы EWG для каждого из режимов работы дизеля возможно определить оценив площадь под кривой  $\text{NO}_x=f(\delta_{EWG})$ . Наиболее целесообразно для этого использовать формулу трапеций [6]. Метод применяют для вычисления определенных интегралов непрерывных функций, к которым относится зависимость  $\text{NO}_x=f(\delta_{EWG})$ . Интеграл представляют в виде суммы площадей трапеций равной ширины

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} [f(x_0) + 2f(x_1) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)] \quad (1)$$

где  $f(x)$  – непрерывная функция с аргументом  $x$ ;  $a, b$  – пределы интегрирования ( $a \leq x \leq b$ );  $h = (b - a)/n$  – шаг интегрирования;  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n$  – значение аргумента с шагом приращения  $h$  в интервале интегрирования  $[a, b]$ ;  $n$  – число площадей [6].

Точность формулы тем выше, чем большим количеством площадей заменяется интеграл.

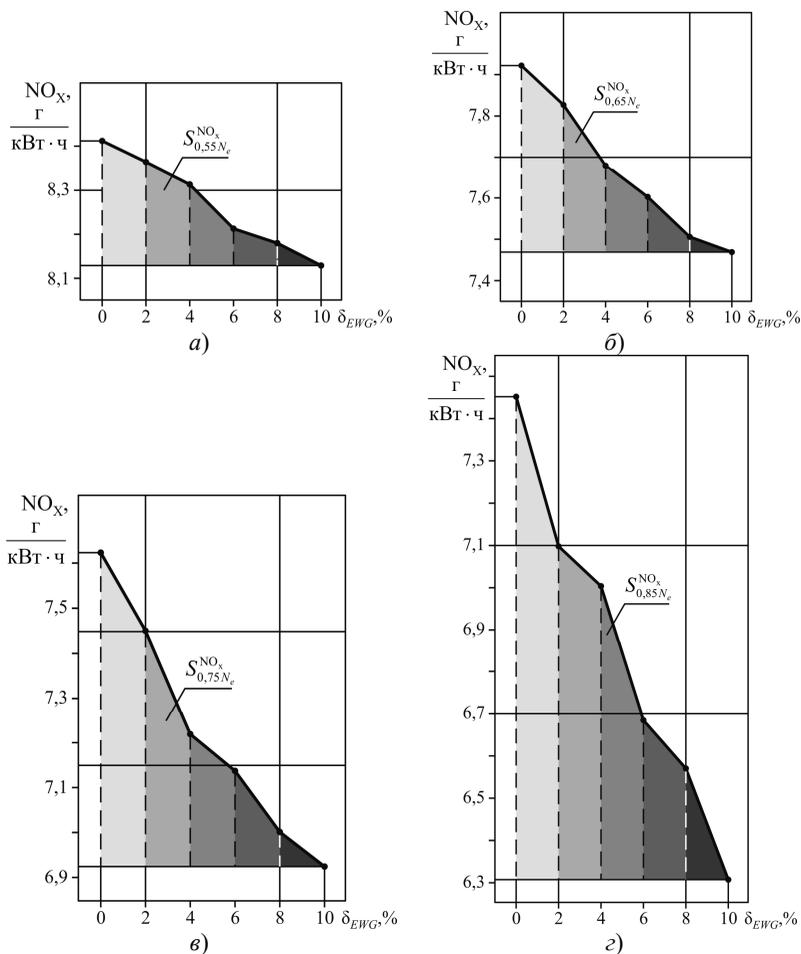


Рис. 2. Изменение эмиссии  $NO_x$  в зависимости от степени открытия перепускного клапана  $\delta_{EWG}$  при различных нагрузках дизеля 6L20 Wartsila: а – 55 %; б – 65 %; в – 75 %; з – 85 %

Учитывая значения  $NO_x$ , приведенные в табл. 1, получим следующие значения интеграла (1), определяющего площадь под кривой  $NO_x=f(\delta_{EWG})$ :  $S_{0,55N_c}^{NO_x} = 1,38$ ;  $S_{0,65N_c}^{NO_x} = 1,80$ ;  $S_{0,75N_c}^{NO_x} = 3,00$ ;  $S_{0,85N_c}^{NO_x} = 5,39$ .

Изменение удельного эффективного расхода топлива  $b_e$  при различной степени рециркуляции  $\delta_{EWG}$  и разных нагрузках представим в

виде табл. 4, отражающей увеличение  $\Delta b_e$  по сравнению с работой дизеля без использования системы EWG.

Таблица 4  
Увеличение удельного расхода топлива  $\Delta b_e$ , %

Нагрузка, %	Степень перепуска выпускных газов, $\delta_{EWG}$ , %					
	0	2	4	6	8	10
55	3,25	3,78	4,12	4,17	4,43	315
65	2,66	3,78	4,05	4,08	4,15	301
75	1,62	1,88	1,95	1,98	2,07	297
85	0,75	0,88	1,07	1,12	1,17	292

Номограмма, отражающая диапазон изменения удельного расхода топлива  $\Delta b_e$  в зависимости от нагрузки дизеля для различной степени открытия клапана перепуска выпускных газов  $\delta_{EWG}$  показан на рис. 3.

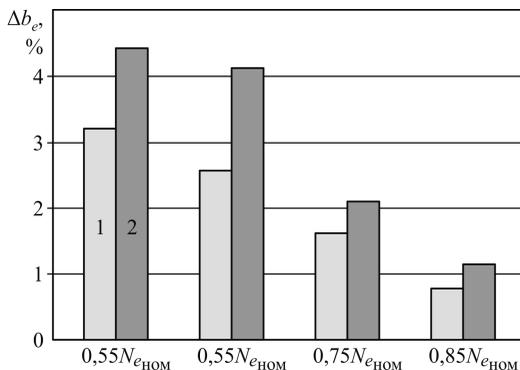


Рис. 3. Диапазон изменения удельного расхода топлива  $\Delta b_e$  при различных нагрузках дизеля 6L20 Wartsila: 1 –  $\delta_{EWG}=2\%$ ; 2 –  $\delta_{EWG}=10\%$

Использование системы EWG приводит к повышению температуры выпускных газов дизеля  $t_r$ , что, по нашему мнению, связано с повышением удельного эффективного расхода топлива и смещением процесса его сгорания на линию расширения. Номограммы, отражающие изменение  $t_r$  в зависимости от степени открытия перепускового клапана  $\delta_{EWG}$  при различных нагрузках дизеля приведены на рис. 4.

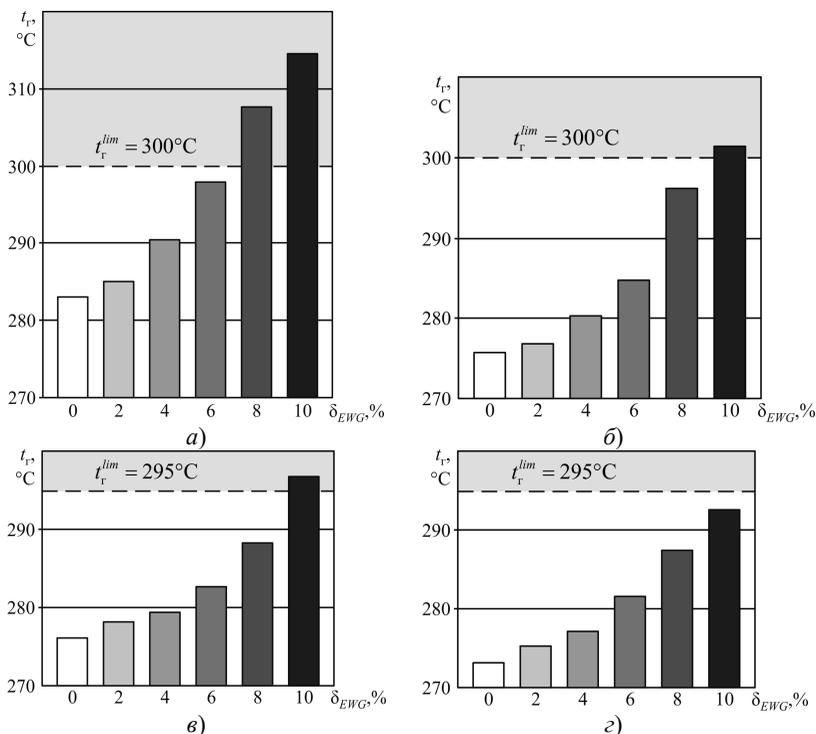


Рис. 4. Изменение температуры выпускных газов  $t_r$  в зависимости от степени открытия перепускного клапана  $\delta_{EWG}$  при различных нагрузках дизеля 6L20 Wartsila: а – 55 %; б – 65 %; в – 75 %; г – 85 %

В качестве предельного значения температуры выпускных газов  $t_r^{lim}$  для рассматриваемого дизеля фирма Wartsila рекомендует следующие значения: при нагрузке 100 % – 305 °С; при нагрузке 85 % – 295 °С; при нагрузке 75 % – 295 °С; при нагрузке 65 %– 300 °С; при нагрузке 50 % – 300 °С.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Для судовых среднеоборотных дизелей с электронным управлением в качестве метода, обеспечивающего выполнение требований Приложения VI МАРПОЛ, может использоваться система перепуска выпускных газов – EGW, при которой часть продуктов сгорания направляется в выпускную магистраль минуя ГТН. Электронное управление дизелем позволяет выполнять данный процесс в гибком режиме

в интервале 0 ... 10 % от общего объема газов, выходящих из цилиндра дизеля.

2. Использование перепуска выпускных газов способствует улучшению экологических показателей работы судовых среднеоборотных дизелей, в частности при этом в диапазоне эксплуатационных нагрузок (0,55 ... 0,85) $N_{\text{ном}}$  на 3,33 ... 15,42 % снижается уровень эмиссии  $\text{NO}_x$  в выпускных газах. Необходимо отметить, что наибольший уровень снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  соответствует 75 ... 85 %-ой нагрузке – самым распространенным режимам работы судовых среднеоборотных дизелей при их использовании в качестве дизель-генераторов в составе судовой электростанции.

3. Оценка эффективности применения системы перепуска выпускных газов для снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  может быть осуществлена путем определения площади по графиком зависимости  $\text{NO}_x=f(\delta_{EWG})$ , при этом большие значения площади соответствуют большим значениям снижения выбросов  $\text{NO}_x$ .

4. Использование системы EGW уменьшает количество выпускных газов, поступающих к ГТН, это приводит к снижению производительности турбокомпрессора, уменьшению количества воздуха, поступающего в цилиндр дизеля, и росту удельного эффективного расхода топлива. При этом для режимов, соответствующих 55 ... 65 %-ой нагрузки рост этого показателя увеличивается пропорционально степени перепуска выпускных газов  $\delta_{EWG}$  и составляет 2,66 ... 4,43 % (в диапазоне  $\delta_{EWG}=2 \dots 10$  %). Для нагрузок близких к номинальной мощности – 0,85 $N_{\text{ном}}$  увеличение удельного расхода топлива не превышает 1,2 % (для максимальной величины перепуска газов  $\delta_{EWG}=10$  %).

5. Ухудшение процесса воздухообеспечения цилиндра при использовании системы EGW способствует смещению процесса сгорания топлива на линию расширения и вызывает рост тепловой напряженности дизеля (которую возможно оценить по значению температуры выпускных газов  $t_r$ ). Для эксплуатационного режима, соответствующего 0,55 $N_{\text{ном}}$  использование системы EGW возможно только в диапазоне  $\delta_{EWG}=0 \dots 6$  %, поскольку для больших значений  $\delta_{EWG}$  уровень температуры выпускных газов превышает рекомендуемые пределы. Для режимов, соответствующих диапазону нагрузок (0,65 ... 0,75) $N_{\text{ном}}$  использование системы EGW рекомендуется для диапазона  $\delta_{EWG}=0 \dots 8$  %, в котором значения температуры выпускных газов не превышают допустимый уровень тепловой напряженности. При нагрузке 0,85 $N_{\text{ном}}$  во всем диапазоне изменения перепуска газов  $\delta_{EWG}=0 \dots 10$  % происходит рост их температуры, однако даже при значении

$\delta_{EGW}=10\%$  величина  $t_T$  не превышает максимально допустимые пределы.

6. Оценка эффективности использования системы EGW, как одного из способов обеспечения требований Приложения VI МАРПОЛ по ограничению эмиссии  $\text{NO}_x$ , должна производиться путем комплексной оценки следующих параметров работы дизеля: количество  $\text{NO}_x$  в выпускных газах, увеличение удельного эффективного расхода топлива  $\Delta b_e$ , температура выпускных газов  $t_T$ . В качестве оптимальной степени перепуска газов следует принимать значения, которым соответствует максимальное снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  при минимальном повышении расхода топлива и одновременном поддержании  $t_T$  в пределах, не превышающих допустимый уровень тепловой напряженности.

7. Для рассмотренного судового дизеля 6L20 Wartsila использование системы EGW целесообразно для нагрузок, превышающих величину  $0,75N_{\text{снoм}}$ . При этом возможно достичь 9,17 ... 15,42 %-е снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ , обеспечив значение концентрации  $\text{NO}_x$  в выпускных газах на уровне 6,31 ... 6,93 г/(кВт·ч). Увеличение удельного эффективного расхода на данных режимах находится в пределах 1,17 ... 2,07 %. Для нагрузок (0,55 ... 0,65) $N_{\text{снoм}}$  также характерно снижение уровня эмиссии  $\text{NO}_x$  (на 3,33 ... 5,56 %), однако при этом происходит 4,15 ... 4,43 %-е увеличение расхода топлива, а кроме того при 8 ... 10 %-ом перепуске газов уровень тепловой напряженности дизеля превышает допустимые пределы.

Приведенные результаты подтверждают целесообразность использования системы EGW для снижения уровня эмиссии  $\text{NO}_x$ . Однако наиболее рациональным ее использование может быть в качестве дополнительного решения в комплексе с системой рециркуляции выпускных газов EGR, для чего целесообразно выполнить дополнительные исследования.

Оптимизация режимов перепуска выпускных газов, а также управление этими режимами, возможно с использованием информационных систем для управления активами на судах [7].

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С. И. Повышение энергоэффективности судов с винтом регулируемого шага / С. И. Горб // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса : ОНМА. – С. 36 - 40.

2. Kuropyatnyk O. A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NO<sub>x</sub> Emissions from Marine Diesel Engines / O. A. Kuropyatnyk, S. V. Sagin // OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – № 1. – P. 1 - 9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

3. Куропятник А. А. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей / А. А. Куропятник, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 72 - 80.

4. Куропятнік О. А. Зниження емісії оксидів азоту суднових дизелів методом перепуску выпускних газів / О. А. Куропятнік // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 98 - 108.

5. Sagin S. V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S. V. Sagin; O. A. Kuropyatnyk // OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology. – June 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78 - 86. [doi.org/10.17818/NM/2018/2.3](https://doi.org/10.17818/NM/2018/2.3).

6. Горб С. И. Моделирование судовых дизельных установок и систем управления : учеб. пособие для вузов. – М. : Транспорт, 1993. – 134 с.

7. Горб С. И. Программное обеспечение для управления активами на судах / С. И. Горб, А. С. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 34 - 48.