

УДК 621.629

**СНИЖЕНИЕ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ  
МЕТОДОМ ПЕРЕПУСКА ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ**

**А.А. Куропятник**  
аспирант

*Национальный университет «Одесская морская академия»*

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования перепуска выпускных газов для снижения эмиссии оксидов азота судовых среднеоборотных дизелей. Эксперименты, выполненные на судовом среднеоборотном дизеле 6L20 фирмы Wartsila, показали, что повышение степени перепуска выпускных газов в диапазоне 0-9,6 % способствует снижению эмиссии оксидов азота с 8,72 г/(кВт·ч) до 6,53 г/(кВт·ч) и зависит от нагрузки на дизель. При этом относительное снижение выбросов оксидов азота находится в пределах 1,15-13,85 %; наибольший уровень снижения концентрации оксидов азота в выпускных газах соответствует максимальной степени перепуска газов и режиму максимальной нагрузки на дизель.

**Ключевые слова:** судовой дизель, эмиссия оксидов азота, газо-выпускная система, турбокомпрессор, система перепуска выпускных газов, удельный эффективный расход топлива.

УДК 621.629

**ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ  
МЕТОДОМ ПЕРЕПУСКУ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ**

**О.А. Куропятник**  
аспірант

*Національний університет «Одеська морська академія»*

**Анотація.** Розглянуто можливість використання перепуску выпускных газів для зниження емісії оксидів азоту судових середньооборотних дизелів. Експерименти, що були виконані на судовому середньооборотному дизелі 6L20 фірми Wartsila, показали, що підвищення ступеня перепуску выпускных газів в діапазоні 0-9,6 % сприяє зниженню емісії оксидів азоту з 8,72 г/(кВт·год) до 6,53 г/(кВт·год) і залежить від навантаження на дизель. При цьому відносне зниження викидів оксидів азоту знаходиться в межах 1,15-13,85 %; найбільший рівень зниження концентрації оксидів азоту в выпускных газах відповідає максимальному ступені перепуску газів і режиму максимального навантаження на дизель.

**Ключові слова:** судновий дизель, емісія оксидів азоту, газо-випускна система, турбокомпресор, система перепуску выпускных газів, питома ефективна витрата палива.

© Куропятник А.А., 2018

UDC 621.629

**REDUCING THE EMISSION OF NITROGEN OXIDES SHIP DIESEL  
ENGINES BYPASS EXHAUST GASES**

**О. Куропятник**  
graduate student

NU «Odessa Maritime Academy»

***Annotation.** The possibility of using the bypass exhaust gases to reduce the emission of nitrogen oxides of ship's medium-speed diesel engines is considered. Experiments performed on the ship's 6L20 medium-speed diesel engine from Wartsila showed that increasing the degree of bypass exhaust gases in the range of 0-9.6 % contributes to reducing emissions of nitrogen oxides from 8.72 g/(kWh) to 6.53 g/(kWh) and depends on the load on the diesel. In this case, the relative reduction in emissions of nitrogen oxides is within 1.15-13.85 %; The highest level of reduction of nitrogen oxides concentration in exhaust gases corresponds to the maximum degree of gas bypass and the maximum load on the diesel.*

***Keywords:** marine diesel, emission of nitrogen oxides, gas exhaust system, turbocharger, exhaust gas bypass system, specific effective fuel consumption.*

**Постановка проблемы.** Судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые используются на всех без исключения морских и речных судах, исполняя при этом функции как главных, так и вспомогательных двигателей, являются источниками повышенного загрязнения водной и воздушной среды [1]. Путем использования специальных технологий и оборудования по очистке нефтесодержащих вод, а в некоторых случаях за счет полного отказа от сброса нефтесодержащих вод, возможно минимизировать или полностью избежать загрязнения водной среды. Обеспечить работу судовых ДВС без загрязнения воздушной среды, невозможно, поскольку их рабочий цикл неизбежно включает в свой состав процесс выпуска отработавших газов.

При использовании углеводородных топлив нефтяного происхождения и атмосферного воздуха в качестве окислителя образующиеся выпускные газы (ВГ) судовых ДВС состоят на 99,2 % из нетоксичных компонентов – продуктов неполного сгорания (диоксид углерода CO<sub>2</sub> и водяной пар H<sub>2</sub>O) и воздуха с пониженным содержанием кислорода O<sub>2</sub>. Все токсичные компоненты, которые образуются в судовых дизелях, можно разделить на две группы. К первой группе относятся продукты неполного сгорания топлива – это монооксид углерода, углеводороды, альдегиды, сажа. Токсичные компоненты второй группы образуются в результате полного окисления химических элементов, входящих в состав

топлива и воздуха – это оксиды азота  $\text{NO}_x$  и серы  $\text{SO}_x$ . Судовые ДВС, которые находятся в эксплуатации, требуют постоянного поиска эффективных способов снижения токсичности ВГ, в первую очередь, выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

**Анализ последних исследований и публикаций.** Количество оксидов азота в ВГ судовых ДВС регламентируется требованиями MARPOL Annex VI [2].

Снижение концентрации оксидов азота в ВГ ДВС до требуемых величин и поддержание этого параметра в необходимых пределах возможно по двум принципиальным направлениям:

- использование технологических решений, направленных на изменение эксплуатационных свойств топлива, конструкции топливной аппаратуры, характеристик топливоподачи, характера протекания рабочего процесса и предшествующих моменту образования  $\text{NO}_x$  в цилиндре дизеля;

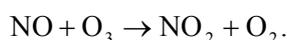
- непосредственное влияние на ВГ (их очистка, химическая обработка, рециркуляция) на протяжении времени, когда они находятся в газовой выпускной системе (ГВС) дизеля.

Снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  путем химической обработки топлива было исследовано в работе [3], при этом ее основной задачей было определение оптимальной концентрации вводимых в топливо реагентов с целью интенсификации процесса его сгорания. Обеспечение экологических параметров работы судовых ДВС за счет модернизации построения и комплектации топливной системы рассматривалось в работе [4], однако для реализации полученных в ней результатов требуется дополнительное оборудование, что влечет за собой повышенные расходы энергии. Моделирование процессов образования оксидов азота выполнялось в [5], а работа [6] посвящена поиску оптимальной степени рециркуляции выпускных газов. При этом в данных исследованиях не рассматривался такой способ снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ , как их перепуск помимо газотурбокомпрессора (ГТН) непосредственно в выпускную магистраль.

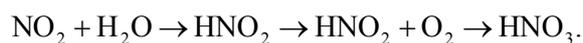
**Постановка задачи.** Разрабатываемые в настоящее время способы снижения уровня эмиссии  $\text{NO}_x$  связаны с изменением конструкции дизелей и возможны только на стадии проектирования. При этом для находящихся в эксплуатации дизелей, изменение конструкции которых либо не возможно, либо требует значительных капиталовложений, задача снижения концентрации  $\text{NO}_x$  в выпускных газах может быть решена путем оптимизации режимов их технической эксплуатации. Учитывая это, задачей исследования являлось определение оптимального (по критериям энергетической и экономической эффективности) уровня перепуска выпускных газов в ГВС выпускная магистраль – ГТН– выпускная магистраль.

**Изложение основного материала исследования.** Оксиды азота являются единственными загрязняющими веществами, которые не могут быть устранены путем смены сорта топлива (как это возможно для снижения выбросов  $SO_x$ ), поскольку чаще всего они образуются при соединении азота (обязательно находящегося в составе жидкого топлива) с кислородом (обязательно находящегося в составе воздуха в цилиндре дизеля).

Среди комплекса оксидов  $NO_x$  именно  $NO$  являются теми веществами, которые преобладают внутри цилиндра дизеля ( $\approx 90-95\%$ ), в то время как большое количество  $NO_2$  образуется только при контакте с низкими температурами, т.е. при попадании выпускных газов в атмосферу. Образование  $NO_2$  происходит при соединении  $NO$  с озоном, находящемся в воздухе. В результате чего оксид азота  $NO$  преобразуется в двуокись  $NO_2$  и кислород  $O_2$



После чего  $NO_2$  соединится с водяными парами  $H_2O$ , что приводит к образованию азотистой кислоты  $HNO_2$  и далее азотной кислоты  $HNO_3$



Именно азотная кислота, которая впоследствии конденсируется в воздухе и возвращается на поверхность мирового океана или островную и материковую часть Земли в виде кислотных дождей, является тем соединением, которое наносит экологический ущерб окружающей среде и на борьбу с которым направлены все конструктивные и технологические решения по снижению содержания  $NO_x$  в ВГ.

Одним из способов, обеспечивающих снижение эмиссии  $NO_x$ , считается система управления выпускными газами, которая обеспечивает либо рециркуляцию выпускных газов (exhaust gas recirculation – EGR), либо перепуск выпускных газов (Exhaust gas wastegate – EGW) [7].

Система EGW рекомендуется некоторыми дизелестроительными фирмами (например, Wartsila-Sulzer) для ограничения давления наддувочного воздуха при высоких нагрузках. В то же время, система EGW может использоваться для снижения выбросов  $NO_x$ . Для подтверждения этого на судовом среднеоборотном дизеле 6L20 фирмы Wartsila, выполняющим функции дизель-генератора в составе судовой электростанции и оборудованном системой EGW выполнялся комплекс исследований, целью которых являлось определение влияния перепуска газов в ГВС на его экологические и экономические показатели работы.

Основные характеристики дизеля 6L20:

количество цилиндров – 6;

диаметр цилиндра – 0,2 м;

ход поршня – 0,26 м;

максимальное давление сгорания – 16,3 МПа;

частота вращения – 1000 об/мин;

номинальная мощность  $N_{\text{ном}}=1200$  кВт;

удельный эффективный расход топлива – 0,193 кг/(кВт·ч).

Принципиальная схема системы EWG судового дизеля 6L20 фирмы Wartsila показана на рис. 1.

Согласно инструкции по эксплуатации дизеля система EWG обеспечивает перепуск газов в диапазоне 0-10 %.

Концентрация  $\text{NO}_x$  в выпускных газах определялась в точке 2 с помощью газоанализатора Testo350XL. Во время эксперимента с помощью судовых измерительных средств (расходомера, установленного на магистрали подвода топлива к топливным насосам высокого давления, и таймера) определялся удельный эффективный расход топлива  $b_e$ .

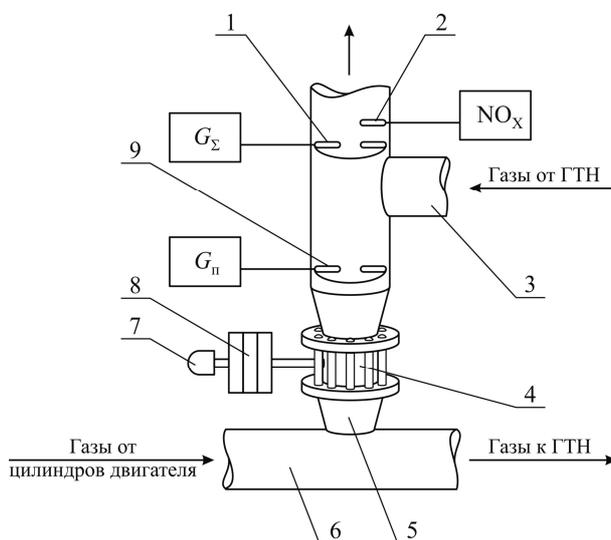


Рис. 1. Принципиальная схема ГВС судового среднеоборотного дизеля 6L20 Wartsila с системой перепуска выпускных газов EWG:

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

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

где  $G_{\text{ч}}$  – часовой расход топлива, кг/ч;  
 $N_{\text{ереж}}$  – мощность дизеля, на различных скоростных режимах работы, кВт.

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

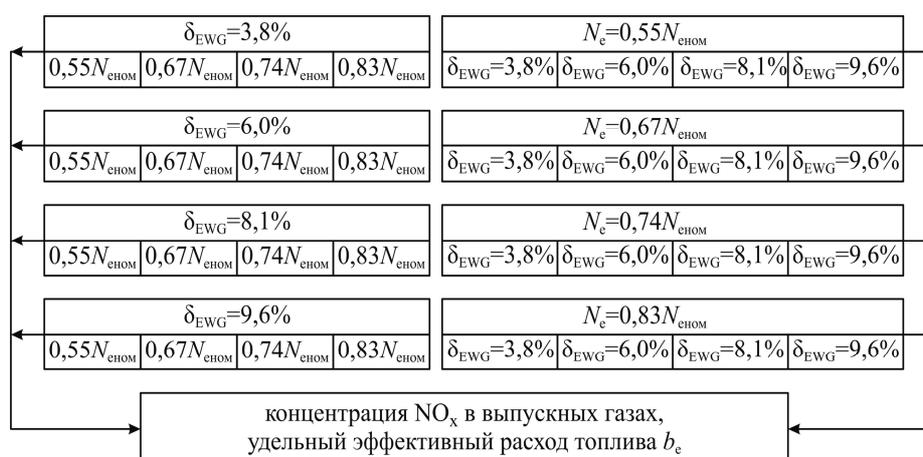
где  $V_{\text{т}}$  – объем топлива, прошедший через расходомер, м<sup>3</sup>;  
 $\rho$  – плотность топлива при соответствующей температуре, кг/м<sup>3</sup>;  
 $t$  – время, в течении которого проводился эксперимент на соответствующем скоростном режиме, час.

Погрешность в измерении расхода газов, определяемого расходомером МТ100S, не превышала  $\pm 0,5\%$ , погрешность в измерении эмиссии NO<sub>x</sub> в выпускных газах газоанализатором Testo350XL составляла  $\pm 3,5\%$ , погрешность в определении удельного эффективного расхода топлива не превышала  $\pm 2,5\%$ .

Дизель, на котором выполнялись экспериментальные исследования, обеспечивал мощностью постоянные группы потребителей. При этом (в зависимости от исследуемых режимов) его мощность составляла 660 кВт, 805 кВт, 890 кВт, 1010 кВт, что соответствовало  $0,55N_{\text{еном}}$ ,  $0,67N_{\text{еном}}$ ,  $0,74N_{\text{еном}}$ ,  $0,83N_{\text{еном}}$ . Погрешность в изменении мощности не превышала  $\pm 1,5\%$ .

В состав судовой электростанции входило три однотипных дизеля, поэтому в случае изменении количества потребителей энергии и их мощности, требуемая нагрузка перераспределялась на дизели, не задействованные в эксперименте, а дизель, на котором проводились исследования, эксплуатировался на постоянной нагрузке. Кроме того, при проведении эксперимента на дизеле поддерживались постоянные температурные режимы в системах смазывания и охлаждения.

При проведении эксперимента дизель в течение 2,5-3 часов работал на постоянной нагрузке и неизменном положении перепускного клапана на каждом из экспериментальных режимов. Для определения степени открытия перепускного клапана (позиция 4 на рис.1) первоначально в точке 1 определялся общий расход газов  $G_{\Sigma}$ , выходящих из цилиндров дизеля и проходящих через магистраль основного потока газов 3 (при полностью закрытом клапане 4). После этого при измененном положении перепускного клапана 4 в точке 9 определялся расход газов  $G_{\text{п}}$  через перепускную магистраль 5 и по выражению (1) рассчитывалась степень перепуска газов. Дальнейшие измерения выполнялись по двум схемам (рис. 2):



*Рис. 2. Последовательность выполнения экспериментальных исследований*

1) при неизменном положении перепускного клапана изменялась нагрузка на дизель, и далее определялись значения  $\text{NO}_x$  в выпускных газах и  $b_e$ , например, при постоянном значении  $\delta_{EWG}=9,6\%$  и разных эксплуатационных значениях  $N_e$ , соответствующих 55, 67, 74, 83 % от номинальной мощности; далее положение перепускного клапана изменялось ( $\delta_{EWG}=8,1\%$ ,  $6,0\%$ ,  $3,8\%$ ) и для каждого значения  $\delta_{EWG}$  в указанном диапазоне вновь изменялась нагрузка на дизель и повторялось измерение  $\text{NO}_x$  и  $b_e$ ;

2) при постоянной нагрузке на дизель изменялось положение перепускного клапана, и далее определялись значения эмиссии  $\text{NO}_x$  и показатель экономичности работы дизеля –  $b_e$ , например, при постоянном значении  $N_e=0,83N_{енорм}$  и разных значениях  $\delta_{EWG}$  ( $\delta_{EWG}=9,6\%$ ,  $8,1\%$ ,  $6,0\%$ ,  $3,8\%$ ); далее значение нагрузки на дизель изменялось ( $0,55N_{енорм}$ ,  $0,67N_{енорм}$ ,  $0,74N_{енорм}$ ) и для каждого значения в указанном диапазоне вновь изменялось положение перепускного клапана и повторялось измерение  $\text{NO}_x$  и  $b_e$ . Это позволяло увеличить массив получаемых экспериментальных данных и расширить их информативность.

Полученные таким образом экспериментальные значения показали хорошую сходимость, что подтверждало корректность проведенных измерений. Результаты исследований обобщены в таблице и представлены на рис. 3.

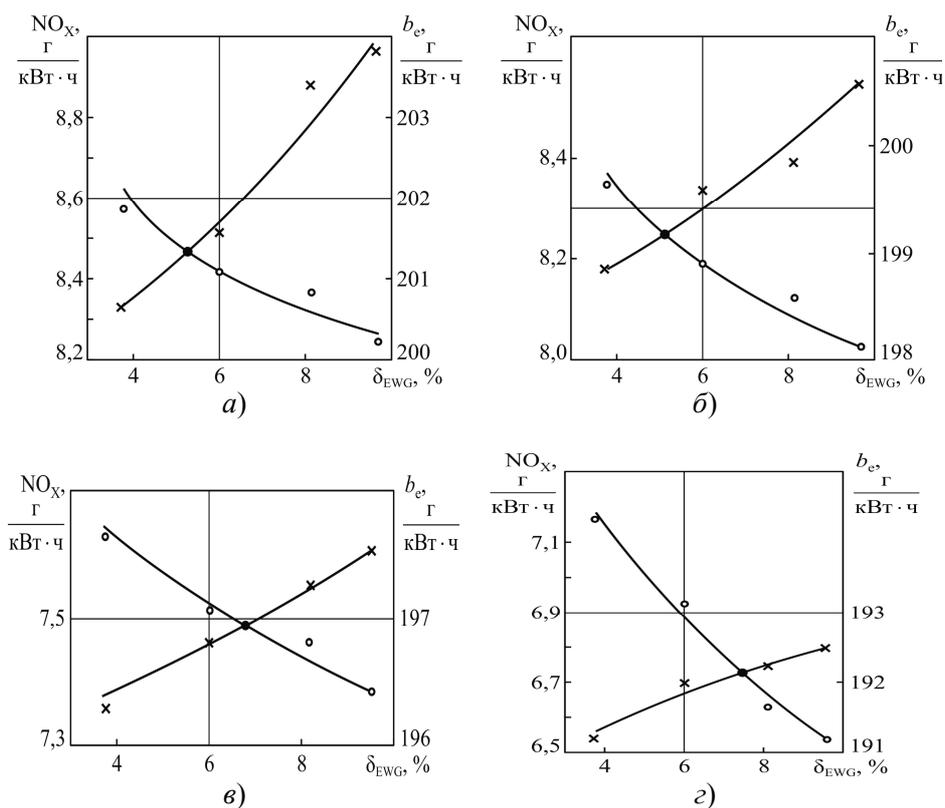


Рис. 3. Зависимость эмиссии  $NO_x$  (x) и удельного эффективного расхода топлива  $b_e$  (o) судового дизеля 6L20 Wartsila от степени открытия клапана перепуска газов  $\delta_{EWG}$  для различной нагрузки  $N_e$ :  
а)  $0,55N_{ном}$ ; б)  $0,67N_{ном}$ ; в)  $0,74N_{ном}$ ; з)  $0,83N_{ном}$

Таблица

Результаты эксперимента

$\delta_{EWG}$ , %	Эмиссия $NO_x$ , г/(кВт·ч) при нагрузках на дизель				Удельный эффективный расход топлива, $b_e$ , г/(кВт·ч) при нагрузках на дизель			
	55 %	67 %	74 %	83 %	55 %	67 %	74 %	83 %
0	8,72	8,37	7,81	7,58	198,6	196,9	195,5	190,6
3,8	8,58	8,32	7,62	7,18	200,7	198,9	196,3	191,2
6,0	8,42	8,18	7,52	6,83	201,6	199,6	196,8	192,0
8,1	8,38	8,12	7,47	6,63	203,5	199,8	197,3	192,2
9,6	8,24	8,01	7,38	6,53	203,8	200,6	197,5	192,5

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Система перепуска выпускных газов (Exhaust gas wastegate – EGW) рекомендуется и используется некоторыми дизелестроительными фирмами (например Wartsila) для снижения давления наддувочного воздуха на повышенных нагрузках судовых дизелей. Система EWG обеспечивает перепуск отработавших в цилиндре газов в диапазоне 0-10 % от их общего объема непосредственно в выпускную трубу без использования их энергии в ГТН. При этом систему EWG возможно использовать для обеспечения экологических параметров работы ДВС (в частности для снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  с выпускными газами) во всем поле эксплуатационных режимов работы дизеля.

Для судового среднеоборотного дизеля 6L20 фирмы Wartsila, работающего в диапазоне нагрузок  $N_{\text{раб}}=(0,55-0,83)N_{\text{ном}}$  при использовании системы EWG со степенью перепуска выпускных газов  $\delta_{\text{EWG}}=3,8-9,6\%$  были получены следующие результаты:

1) повышение степени перепуска выпускных газов в диапазоне 0-9,6 % способствует снижению эмиссии оксидов азота с 8,72 г/(кВт·ч) до 6,53 г/(кВт·ч) и зависит от нагрузки на дизель; при этом относительное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  находится в пределах 1,15-13,85 %;

2) наибольший уровень снижения концентрации  $\text{NO}_x$  в выпускных газах соответствует максимальной степени перепуска газов и режиму максимальной нагрузки на дизель (в проведенных экспериментах 9,6 % и  $0,83N_{\text{ном}}$  соответственно);

3) использование системы EWG изменяет стехиометрическое соотношение топливо-воздух, что способствует увеличению удельного эффективного расхода топлива;

4) для режимов работы дизеля близких к номинальному (в проведенных исследованиях 74-83 % номинальной мощности дизеля) при использовании перепуска выпускных газов увеличение удельного эффективного расхода топлива составляет 0,8-1,9 г/(кВт·ч) или в относительных значениях 0,26-1,05 %; при этом, учитывая максимальное снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  на данных режимах эксплуатации, именно улучшение экологических показателей работы дизеля является превалирующим фактором для данного диапазона нагрузок, поэтому использование системы EWG в этом случае целесообразно и может быть рекомендовано как способ обеспечения экологических требований к судовым дизелям;

5) на нагрузках  $(0,55-0,67)N_{\text{ном}}$  увеличение расхода топлива при использовании системы EWG может достигать 1,83-2,52 %; учитывая, что в данной вариации нагрузок использование EWG обеспечивает снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  на 1,15-5,5 %, применение системы перепуска газов для этого диапазона не является целесообразным.

При выборе наиболее оптимального режима работы системы EWG, т.е. количества газов, перепускаемого в обход ГТН, необходимо выполнять комплексную оценку экологических и экономических показателей работы дизеля. Невзирая на увеличение удельного расхода топлива использование системы EWG может быть рекомендовано в особых районах мирового океана, когда преобладающим показателем при эксплуатации судовых энергетических установок становятся их экологические параметры.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голиков В. А. Новые тенденции в экологичности судовых энергетических установок / В.А. Голиков // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – 2011. – № 27. – С. 4-9.
2. Куропятник А. А. Снижение концентрации оксидов азота в выпускных газах судовых дизелей / А.А. Куропятник // *Univer-sum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 63-66.
3. Zablotsky Yu. V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives / Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.
4. Sagin S.V. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines / S.V. Sagin, V.G. Solodovnikov // *Modern Applied Science*. – 2015. – Vol. 9. – № 5. – P. 269-278. DOI:10.5539/mas.v9n5p269.
5. Kuropyatnyk O. A. Reduction of NO<sub>x</sub> emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines / O.A. Kuropyatnyk // *The Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Premier Publishing s.r.o. Vienna*. 9-10 2017. – P. 112-117. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42>.
6. 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).

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

Стаття надійшла до редакції 10.12.2018

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець**

доктор технічних наук, професор кафедри Суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія» **А.М. Веретеннік**