

## Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей

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

## Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance

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

*Аннотация – Проанализирована технология управления выпускными газами судового дизеля 6L20 Wartsila, обеспечивающая их перепуск непосредственно в выпускной газоход без прохождения газотурбонагнетателя. Приведены результаты исследований по определению влияния степени перепуска выпускных газов на удельный эффективный расход топлива и эмиссию оксидов азота.*

*Abstract – The exhaust gas control system of the 6L20 Wartsila diesel engine is analyzed, which ensures their passage directly into the exhaust flue without passing the gas turbocharger. The results of studies to determine the effect of the degree of bypass of exhaust gases on the specific fuel oil consumption and the emission of nitrogen oxides are presented.*

В настоящее время среди контролируемых параметров судовых дизелей важное значение отводится такому экологическому показателю, как концентрация оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) в выпускных газах. Это значение регламентируется требованиями международных конвенций, а его поддержание в заданном диапазоне является обязательным при эксплуатации судовых энергетических установок как в акватории

ях мирового океана, так и в территориальных водах [1]. Снижение концентрации  $\text{NO}_x$  в выпускных газах достигается:

путем влияния на рабочий процесс, происходящий в цилиндре дизеля;

изменением конструкции и параметров работы топливной аппаратуры высокого давления;

введением реагентов в выпускные газы при их прохождении через специальные реакторы;

с помощью использования системы управления выпускными газами, которая обеспечивает либо рециркуляцию выпускных газов (exhaust gas recirculation – EGR), либо перепуск выпускных газов (Exhaust gas wastegate – EGW).

Образование оксидов азота при сгорании топлива происходит в случае, когда температура в цилиндре дизеля превышает 1500 К и соблюдается условие высокой концентрации кислорода при окислении атмосферного азота в процессе горения. Поэтому все методы, обеспечивающие снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ , направлены на изменение стехиометрического соотношения топливо-воздух, что приводит к ухудшению смесеобразования, окисления и горения.

Использование для снижения концентрации  $\text{NO}_x$  перепуска выпускных газов основано на уменьшении количества газов, поступающих к газотурбоагнетателю (ГТН). При этом снижаются частота вращения ГТН, давление и количество нагнетаемого в цилиндр воздуха. Перепускаются газы с помощью специального клапана, позволяющего направлять часть газов не к ГТН, а непосредственно в газовыпускную трубу. В настоящее время системы EGW устанавливаются на судовых среднеоборотных главных и вспомогательных дизелях.

Решение задач по обеспечению экологических параметров работы судовых дизелей сопряжено с поддержанием требуемой экономичности и эффективности работы дизеля. Использование дополнительных методов, способствующих снижению эмиссии оксидов азота в выпускных газах, одновременно приводит к повышению удельного эффективного расхода топлива и к снижению мощности дизеля [2]. Учитывая изложенное, целью исследования являлось определение рационального (с точки зрения экономических и экологических показателей работы дизеля) объема перепуска выпускных газов.

Эксперименты выполнялись на судовом среднеоборотном дизеле 6L20 фирмы Wartsila (с номинальной мощностью  $N_{\text{сном}}=1200$  кВт), выполняющим функции дизель-генератора в составе судовой электростанции. В качестве системы управления выпускными газами на дизеле 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  $\text{NO}_x$ . 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 %.

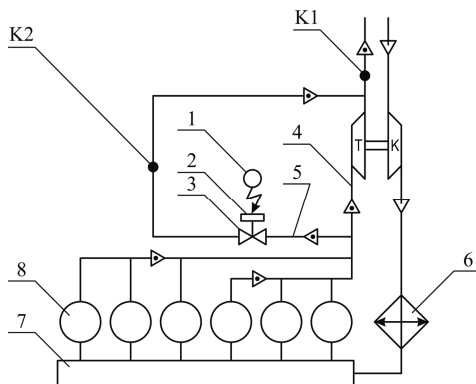


Рис. 1. Принципиальная схема судового среднеоборотного дизеля 6L20 Wartsila с системой управления выпускными газами EWG: 1 – контроллер положения перепускного клапана; 2 – пневматический привод перепускного клапана; 3 – перепускной клапан (wastegate); 4, 5 – выпускные магистрали основного и перепускного потока газов; 6 – охладитель наддувочного воздуха; 7 – продувочный ресивер; 8 – цилиндры дизеля; K1, K2 – точки контроля расхода газов; Т, К – газовая турбина и воздушный компрессор ГТН

Воздух, нагнетаемый компрессором, охлаждается в охладителе наддувочного воздуха 6 и поступает в цилиндры 8 через продувочный ресивер 7. В дизеле (традиционно для среднеоборотных дизелей фирмы Wartsila) реализуется импульсная система газотурбинного наддува, при которой выпускные газы из цилиндров 8 по отдельным газоходам поступают на лопатки ГТН. В зависимости от положения перепускного клапана 3 (перемещение которого осуществляется с помощью пневматического привода 2 и регулируется контроллером 1) выпускные газы поступают либо в основную магистраль 4, либо в перепускную 5. Для управления перепуском выпускных газов могут использоваться контроллеры, которые в настоящее время получают большое распространение в судовой энергетике [3].

Расход выпускных газов в магистралях 4 и 5 определялся в точках K1 и K2 с помощью расходомера MT100S, позволяющего измерять в

газовых потоках с температурой до 454 °С. Во время эксперимента в точке К1 с помощью газоанализатора Testo350XL определялась концентрация  $\text{NO}_x$  в выпускных газах. Удельный эффективный расход топлива  $b_e$  определялся с помощью судовых измерительных средств – расходомера, установленного на магистрали подвода топлива к топливным насосам высокого давления, и таймера.

Погрешность в измерении расхода газов, определяемого расходомером MT100S, 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 эффективно расхода топлива не превышала  $\pm 2,5 \%$  [4].

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  $0,55N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,67N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,74N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,83N_{\text{сн\text{ом}}}$ . 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 течении 2,5 ... 3 часов работал на постоянной нагрузке и неизменном положении перепускного клапана на каждом из экспериментальных режимов. Для определения степени открытия перепускного клапана (wastegate) первоначально в точке К1 определялся общий расход газов  $G_d$ , выходящих из цилиндров дизеля и проходящих через магистраль основного потока газов 4 (при полностью закрытом клапане 3). После этого при измененном положении перепускного клапана (wastegate) 3 в точке К2 определялся расхода газов  $G_{wg}$  через перепускную магистраль 5 и по выражению  $\Delta_{wg} = (G_{wg}/G_d) \cdot 100 \%$  рассчитывалась степень перепуска газов. Дальнейшие измерения выполнялись по двум схемам:

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  $\Delta_{wg} = 9,6 \%$  и разных значениях  $N_e$  ( $0,55N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,67N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,74N_{\text{сн\text{ом}}}$ ,  $0,83N_{\text{сн\text{ом}}}$ , где  $N_{\text{сн\text{ом}}} = 1200$  кВт); далее положение перепускного клапана изменялось ( $\Delta_{wg} = 8,1 \%$ ,  $6,0 \%$ ,  $3,8 \%$ ) и для каждого значения  $\Delta_{wg}$  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  $N_e=0,83N_{\text{енорм}}$  и разных значениях  $\Delta_{\text{wg}}$  ( $\Delta_{\text{wg}}=9,6\%$ ,  $8,1\%$ ,  $6,0\%$ ,  $3,8\%$ ); далее значение нагрузки на дизель изменялось ( $0,55N_{\text{енорм}}$ ,  $0,67N_{\text{енорм}}$ ,  $0,74N_{\text{енорм}}$ ) 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 табл. 1 и представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1

## Результаты эксперимента

Степень открытия клапана, $\Delta_{\text{wg}}, \%$	Эмиссия $\text{NO}_x$ , г/(кВт·ч)/удельный эффективный расход топлива, $b_e$ , г/(кВт·ч), при нагрузках на дизель			
	$0,55N_{\text{енорм}}$	$0,67N_{\text{енорм}}$	$0,74N_{\text{енорм}}$	$0,83N_{\text{енорм}}$
0	8,72/198,6	8,37/196,9	7,81/195,5	7,58/190,6
3,8	8,58/200,7	8,32/198,9	7,62/196,3	7,18/191,2
6,0	8,42/201,6	8,18/199,6	7,52/196,8	6,83/192,0
8,1	8,38/203,5	8,12/199,8	7,47/197,3	6,63/192,2
9,6	8,24/203,8	8,01/200,6	7,38/197,5	6,53/192,5

Анализируя приведенные результаты можно сделать следующие выводы.

Использование EWG, как одного из вариантов системы управления выпускными газами, способствует снижению эмиссии оксидов азота судовых дизелей. Относительное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  находится в пределах 1,15 ... 13,85 % и зависит от количества газов, перепускаемых помимо ГТН, и мощности дизеля. Наибольший уровень снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  соответствует максимально возможному значению перепуска газов (для дизеля 6L20 Wartsila – 9,6 %) и максимальной мощности дизеля.

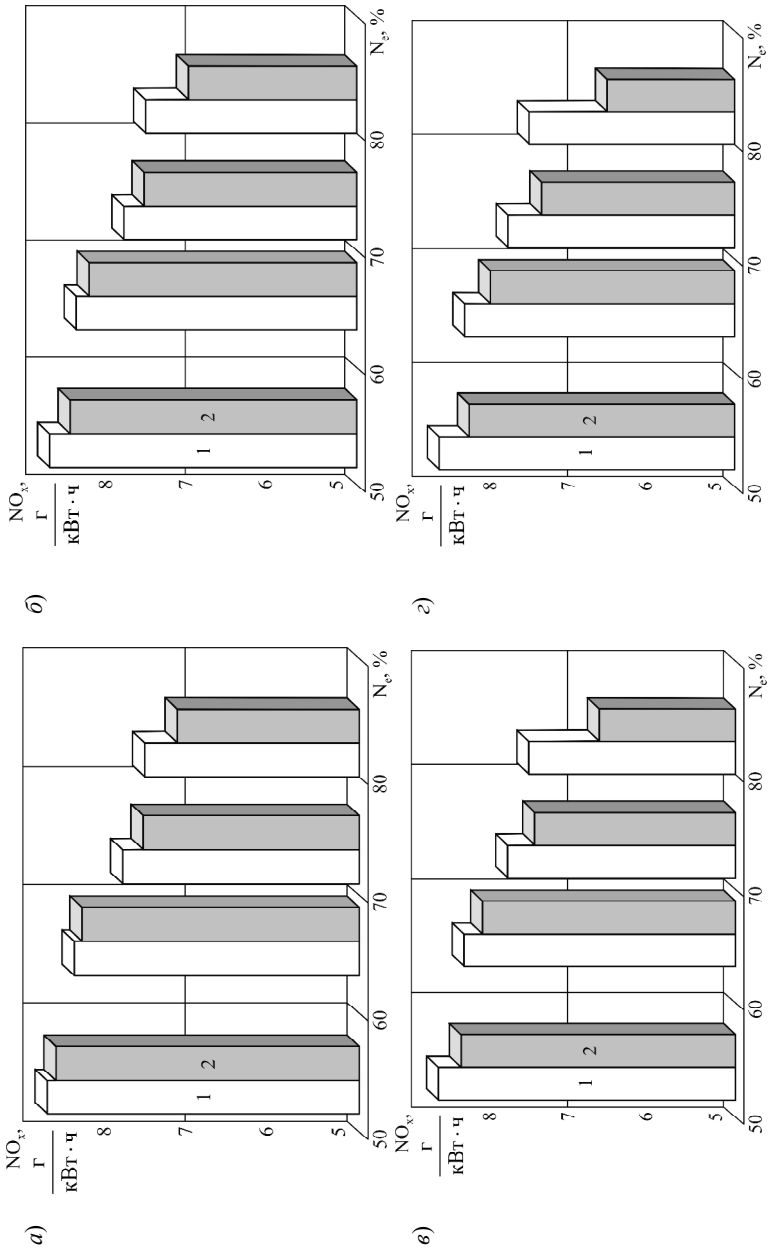


Рис. 2. Зависимость эмиссии NO<sub>x</sub> судового дизеля 6L20 Wartsila от нагрузки N<sub>c</sub> для разной степени открытия клапана перепуска газов Δ<sub>avg</sub>: а) Δ<sub>avg</sub>=9,6%; б) Δ<sub>avg</sub>=6,0%; в) Δ<sub>avg</sub>=8,1%; г) Δ<sub>avg</sub>=3,8%

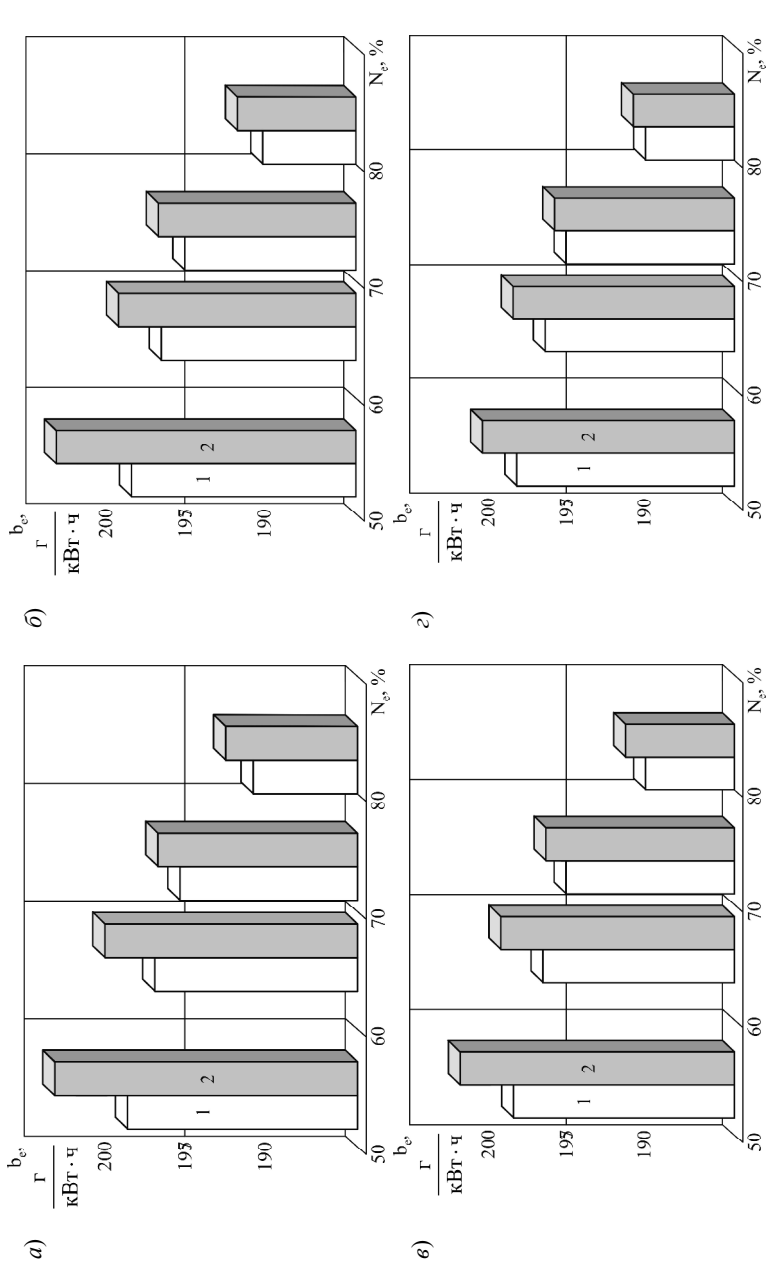


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $b_e$  дизеля 6L20 Wartsila от нагрузки  $N_e$  для разной степени открытия клапана перепуска газов  $\Delta_{wg}$ : а)  $\Delta_{wg} = 8,1\%$ ; б)  $\Delta_{wg} = 9,6\%$ ; в)  $\Delta_{wg} = 6,0\%$ ; г)  $\Delta_{wg} = 3,8\%$

При использовании системы перепуска газов снижается экономичность работы дизеля, в частности увеличивается удельный эффективный расход топлива. Для режимов работы дизеля близких к номинальному (в диапазоне 74 ... 83 % номинальной мощности дизеля) увеличение удельного эффективного расхода топлива находится в пределах 0,26 ... 1,05 %. При этом, учитывая максимальное снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ , именно улучшение экологических показателей работы дизеля является преобладающим фактором для данного диапазона нагрузок. Поэтому использование системы EWG в этом случае может быть рекомендовано при эксплуатации дизелей не только как вариант ограничения давления наддувочного воздуха, но и как способ обеспечения экологических требований к судовым дизелям. Также следует отметить, что рассмотренный диапазон нагрузок является самым распространенным из всех эксплуатационных режимов работы дизеля.

На нагрузках 55 ... 67 % номинальной мощности дизеля 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.

Увеличение степени перепуска газов возможно только в пределах допустимых температур на линии расширения, обеспечивающих требуемый уровень тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы. Для определения диапазона этих температур необходимы дополнительные исследования, в результате которых должны быть выработаны рекомендации по интенсификации процессов смазывания и охлаждения при использовании системы EWG.

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. В результате проведенных на судовом среднеоборотном дизеле 6L20 Wartsila экспериментальных исследований установлено, что таким режимом является 8,1 %-ый перепуск выпускных газов, при котором достигается практически максимальное для рассмотренного дизеля снижение эмиссия  $\text{NO}_x$  в выпускных газах (до 12,53 %) и 0,74 % повышение удельного эффективного расхода топлива.

Использование системы управления выпускными газами не только расширяет диапазон экологически безопасных режимов работы дизеля, но и способствует повышению эффективности системы техниче-



ского менеджмента в рамках организации технического обслуживания судов [5].

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Куропятник А.А. Снижение концентрации оксидов азота в выпускных газах судовых дизелей / А.А. Куропятник // *Universum: Технические науки.* – 2018. – Вып. 3 (48). – С. 63 – 66.
2. Sagin S.V. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels / S.V. Sagin; A.A. Kuropyatnyk // *American Scientific Journal.* – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.
3. Горб С.И. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров / С.И. Горб, В.В. Никольский, С.Г. Хнюнин, В.Ф. Шапо // *Автоматизация судовых технических средств.* – 2017. – Вып. 23. – С. 30 – 36.
4. 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
5. Горб С.И. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов / С.И. Горб, А.В. Каменова, Н.В. Запороженко // *Автоматизация судовых технических средств.* – 2016. – Вып. 22. – С. 33 – 38.