

УДК 621.43

А.В. Сеземин⁴, Л.А. Захаров¹, А.В. Дегтярев³, И.Л. Захаров¹, А.Н. Тарасов²

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОМЕНТА ВПРЫСКА ТОПЛИВА И НАКЛОНА ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕРИЙНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,¹
 ООО «Объединенный инженерный центр» ОАО ГАЗ,²
 ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева»,³
 ОАО «РУМО»⁴

Рассмотрены требования и способы снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизельных двигателей. Разработаны физическая, геометрическая и математическая модели для определения угла наклона топливных струй при изменении момента и продолжительности впрыска топлива. Проведены теоретические исследования в программном комплексе Дизель-ПК и натурные испытания на двигателе 8ЧН 22/28 производства ОАО «РУМО».

Ключевые слова: дизельный двигатель, оксиды азота, момент впрыска топлива, наклон топливных струй.

Дизельные двигатели нашли самое широкое применение на судах морского и речного флота в качестве главных и вспомогательных энергетических установок. Состав отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей подобен составу выхлопных газов других типов двигателей, работающих на углеводородном топливе. Основными токсичными компонентами ОГ дизельных двигателей вне зависимости от типа, класса, размерности и конструктивных особенностей являются: сажа, оксиды азота (NO_x) и оксиды серы (SO_x).

В настоящее время вводятся более жесткие ограничения на выбросы NO_x и SO_x с ОГ, при этом большинство серийных судовых дизельных двигателей не отвечают новым требованиям. Уменьшить выбросы SO_x возможно только путем использования малосернистого топлива или очисткой ОГ, в то время как снижение выбросов NO_x возможно путем *оптимизации рабочих процессов* [3, 4, 6, 7].

Международным стандартом, ограничивающим выбросы токсичных веществ с ОГ судовых дизельных двигателей, является Приложение VI к конвенции MARPOL 73/78 Международной Морской Организации (ИМО), которое устанавливает предельно допустимые значения выбросов NO_x с ОГ, приведенные в табл. 1 [3, 7, 8].

Таблица 1

Предельно допустимые значения выбросов NO_x с ОГ по ИМО

Период действия	Выбросы NO_x , г/(кВт·ч) при номинальной частоте вращения коленчатого вала n , мин ⁻¹			Испытательная процедура
	$n < 130$	$130 \leq n \leq 2000$	$n > 2000$	
ИМО Tier I (01.01.2000...01.01.2011)	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,84	четырёхступенчатые циклы E2, E3 (ISO 8178/4) цикл D2
ИМО Tier II * (01.01.2011...01.01.2016)	14,36	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,66	
ИМО Tier III (в зонах ECA ** после 01.01.2016)	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,97	

* Требования ИМО Tier II остаются в силе после 2016 г. для плавания в открытом море.

** ECA – Зона контролируемых выбросов (Emission Control Areas).

Для морских судов, заложенных после 1 января 2011 г., требования IMO Tier II по выбросам NO_x с ОГ стали обязательными для флотов всего мира. Требования IMO Tier III для судов, заложенных после 1 января 2016 г., предусматривают дифференциацию в зависимости от района плавания. Для плавания в открытом море требования IMO Tier II остаются в силе и после 2016 г., тогда как в зонах контролируемых выбросов обязательными станут требования IMO Tier III. Следует отметить, что в зоне Балтийского моря введение требований IMO Tier III отложено на пять лет и перенесено на 1 января 2021 г. [3].

Разработанные ведущими дизель-строительными предприятиями способы снижения выбросов NO_x с ОГ условно можно разделить на первичные и вторичные мероприятия. Первичные мероприятия связаны с организацией процессов смесеобразования и сгорания, совершенствованием систем турбонадува и впрыска топлива, а также использованием альтернативных топлив, таких как природный газ. К вторичным мероприятиям относятся: рециркуляция ОГ, использование водотопливной эмульсии, увлажнение наддувочного воздуха, каталитическая очистка ОГ и др. Эффективность различных способов снижения выбросов NO_x с ОГ, по данным фирмы MAN Diesel (Германия), показана на рис. 1 [7].

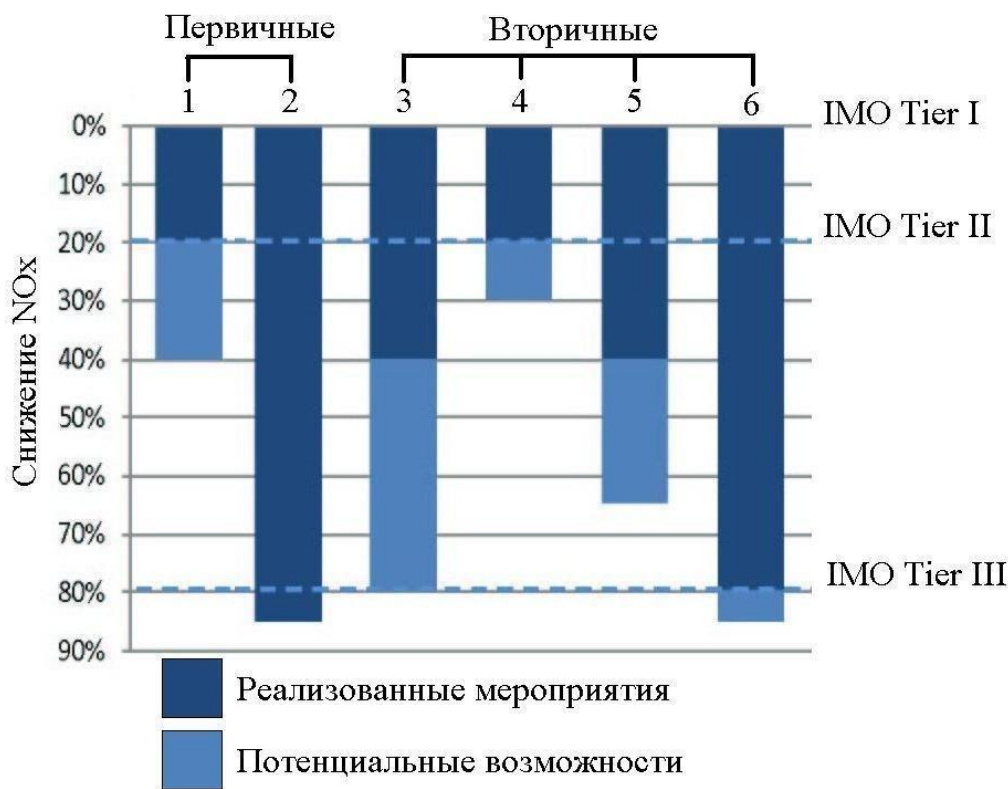


Рис. 1. Эффективность способов снижения выбросов NO_x с ОГ:

- 1 – оптимизация рабочих процессов; 2 – применение природного газа;
 3 – рециркуляция ОГ; 4 – использование водотопливной эмульсии;
 5 – увлажнение наддувочного воздуха; 6 – каталитическая очистка ОГ

Применение вторичных способов уменьшения выбросов NO_x с ОГ требует дополнительных капиталовложений и увеличивает металлоемкость энергетической установки, при этом возрастает удельный эффективный расход топлива дизельного двигателя за счет снижения максимальной температуры цикла и увеличения сопротивления выпускной системы [1, 4].

Опыт мирового двигателестроения показывает, что снижения выбросов NO_x с ОГ до требований IMO Tier II удастся достигнуть за счет приближения угла опережения впрыска топлива (УОВТ) к верхней мертвой точке (ВМТ), но при увеличении удельного эффективного расхода топлива [4, 6, 7]. Такой путь находится в противоречии с не менее актуальной проблемой борьбы за повышение топливной экономичности двигателей внутреннего сгора-

ния, острота которой постоянно возрастает в связи с угрозой истощения углеводородных топлив.

Таким образом, для уменьшения выбросов NO_x с ОГ дизельного двигателя необходимо исследовать влияние УОВТ на экономические и экологические показатели при сохранении энергетических показателей и определить направления для повышения топливной экономичности.

В качестве объекта исследования выбран серийный судовый дизельный двигатель 8ЧН 22/28 мощностью 1052 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин^{-1} производства ОАО «РУМО» (г. Н.Новгород).

Моделирование рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 выполнено в программном комплексе Дизель-РК (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [2]. Настройка математической модели проводилась по экспериментальным данным, полученным на сертифицированном испытательном стенде ОАО «РУМО» (рис. 2), оборудованном по ГОСТ Р 53639-2009. Измерение содержания оксидов азота в ОГ выполнялось при помощи газоаналитической системы ГАСЕТ-01. Для исследования рабочих процессов выбран режим номинальной мощности в связи с тем, что судовые дизельные двигатели большую часть времени эксплуатируются на режимах, близких к номинальной мощности [4, 5].

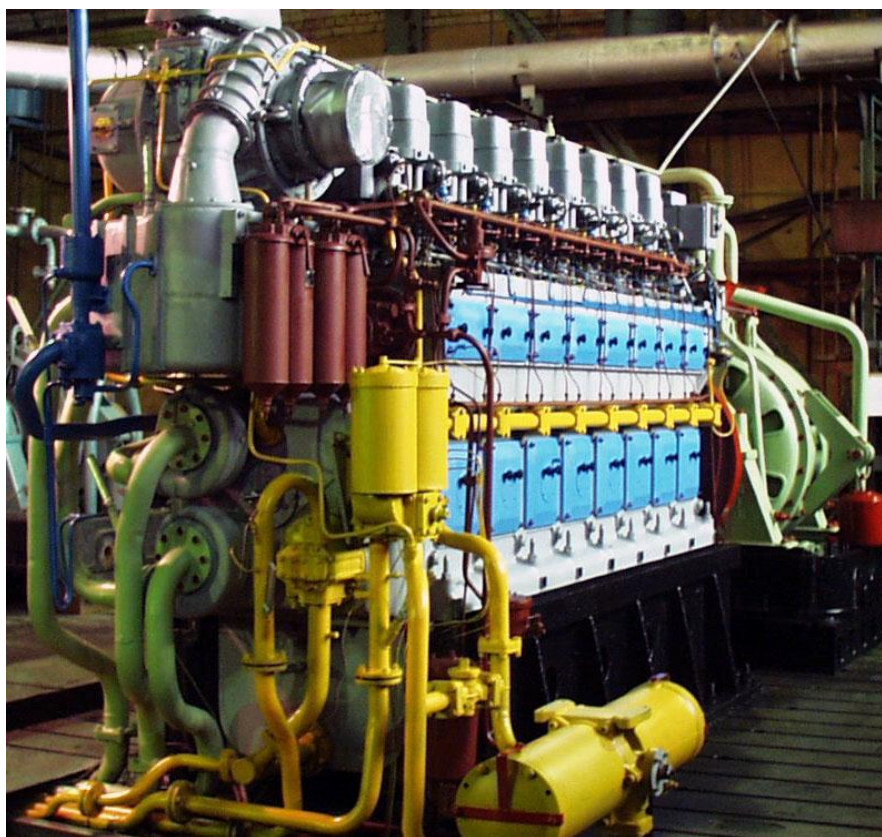


Рис. 2. Испытательный стенд дизельного двигателя 8ЧН 22/28

Исследование рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 по УОВТ (рис. 3) на режиме номинальной мощности при сохранении энергетических показателей показало, что уменьшение УОВТ с 18° до 12°ПКВ до ВМТ позволяет получить:

- уменьшение содержания оксидов азота в ОГ на 28% ($3,4 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$) за счет снижения максимальной температуры цикла на 5% (89°C);
- уменьшение максимальной скорости нарастания давления на 24% за счет сокращения периода задержки воспламенения на 18% и увеличения продолжительности сгорания на 8%;

- уменьшение максимального давления сгорания на 12,5% за счет снижения максимальной скорости нарастания давления на 24%;
- увеличение эффективного расхода топлива на 2% (5 г/(кВт·ч)) за счет снижения максимальной температуры цикла на 5% и увеличения доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра в три раза.

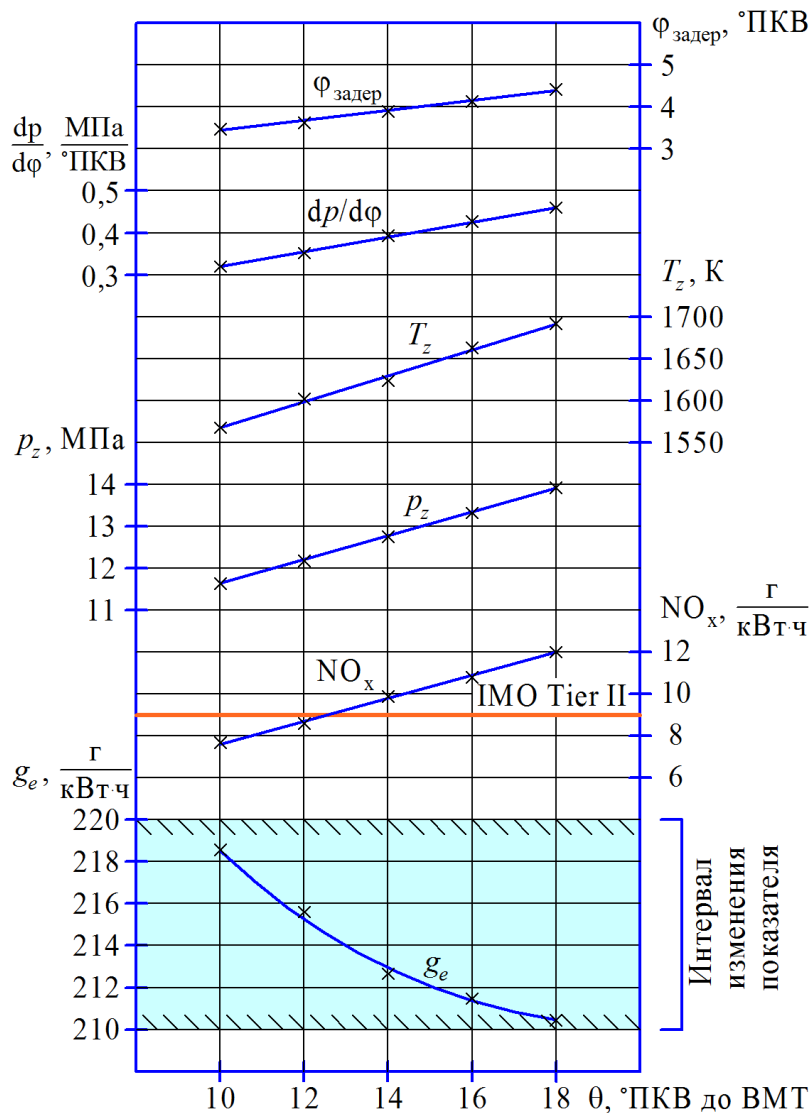


Рис. 3. Результаты моделирования рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 по УОВТ

Анализ результатов моделирования показывает, что повышение топливной экономичности возможно за счет уменьшения доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра с наименее благоприятными условиями испарения. Для этого необходимо направить топливную струю таким образом, чтобы она соприкасалась с поверхностью камеры сгорания в наиболее нагретой части головки поршня и в момент окончания впрыска топлива не попадала на зеркало цилиндра.

Определение угла наклона топливных струй при изменении УОВТ выполнено с учетом перемещения поршня в цилиндре двигателя. При базовом значении УОВТ топливная струя распространяется по оси 1 (рис. 4) и соприкасается с головкой поршня после ВМТ, когда поршень находится в положении $h_{впр}$. При приближении УОВТ к ВМТ и сохранении продолжительности впрыска топлива поршень переместится на величину Δh и топливная струя продолжит распространяться по оси 2 и в момент окончания впрыска топлива выйдет за пределы зоны r с повышенной температурой и наилучшими условиями испарения. Поэто-

му для улучшения экономических показателей угол наклона топливных струй необходимо изменить и направить по оси 3 в зону с наилучшими условиями испарения.

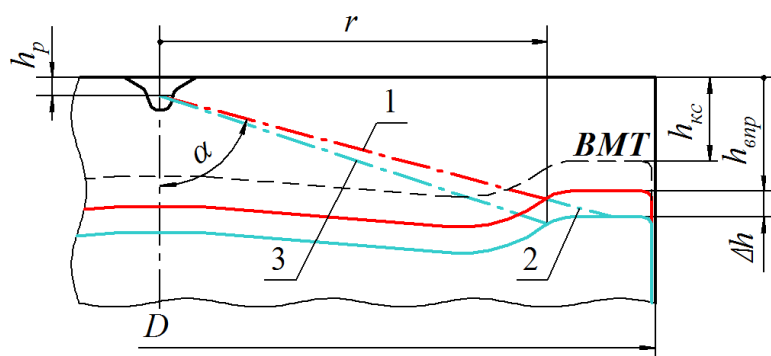


Рис. 4. Геометрическая модель для определения угла наклона топливных струй:

- 1 – ось распространения топливной струи при базовом значении УОВТ;
- 2 – ось распространения топливной струи при изменении УОВТ;
- 3 – ось распространения топливной струи, направленной в горячую зону

Учитывая общепринятые тригонометрические тождества и кинематическое выражение для определения перемещения поршня в цилиндре двигателя по углу поворота коленчатого вала (ПКВ) для аксиального кривошипно-шатунного механизма, получена математическая зависимость для определения угла наклона топливных струй (УНТС) с учетом изменения значений угла опережения и продолжительности впрыска топлива:

$$\alpha = \arctg \frac{r}{h_{кc} - h_p + R \left[(1 - \cos(\varphi_{впр} - \theta)) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2(\varphi_{впр} - \theta)) \right]}$$

где r – зона соприкосновения топливной струи, мм; $h_{кc}$ – высота камеры сгорания при нахождении поршня в ВМТ, мм; h_p – ордината выступа соплового отверстия распылителя, мм; $\lambda = R/L_{ш}$ – постоянная механизма; R – радиус кривошипа коленчатого вала, мм; $L_{ш}$ – кинематическая длина шатуна, мм; $\varphi_{впр}$ – продолжительность впрыска топлива, °ПКВ; θ – угол опережения впрыска топлива, °ПКВ до ВМТ.

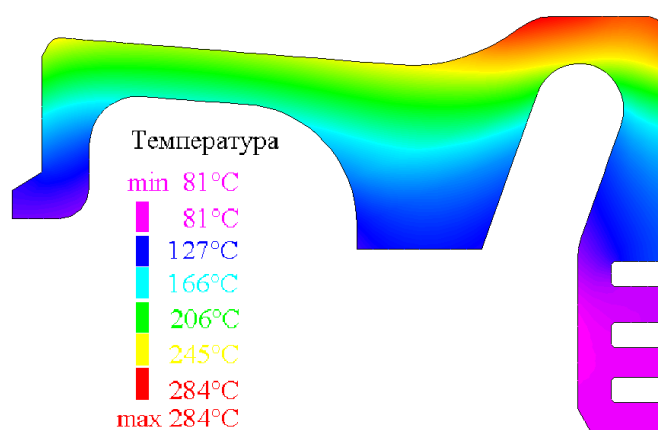


Рис. 5. Распределение температур по головке поршня двигателя ЧН 22/28

Значение зоны соприкосновения топливной струи r определяется расчетом распределения температур на головке поршня. Для определения наиболее нагретой части головки поршня двигателя 8ЧН 22/28 в программном комплексе ИСПА (Алексфот, г. Москва) смоделировано методом конечных элементов его тепловое состояние на режиме номинальной мощности (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что при базовом значении УОВТ (18° ПКВ до ВМТ) и угле наклона топливных струй 75° соприкосновение топливной струи происходит в наиболее нагретой части головки поршня двигателя ЧН 22/28. При этом топливная струя в момент окончания впрыска топлива не выходит за пределы головки поршня и доля топлива, попадающего на зеркало цилиндра, минимальна.

Следовательно, для серийного судового дизельного двигателя при уменьшении УОВТ с 18° до 12° ПКВ до ВМТ при определении нового значения угла наклона топливных струй необходимо, чтобы топливная струя была направлена в ту же зону. В результате для УОВТ= 12° ПКВ до ВМТ по полученной математической зависимости определено новое значение угла наклона топливных струй $72,5^\circ$.

На рис. 6 показано положение топливных струй для различных УОВТ и УНТС в момент окончания впрыска топлива.

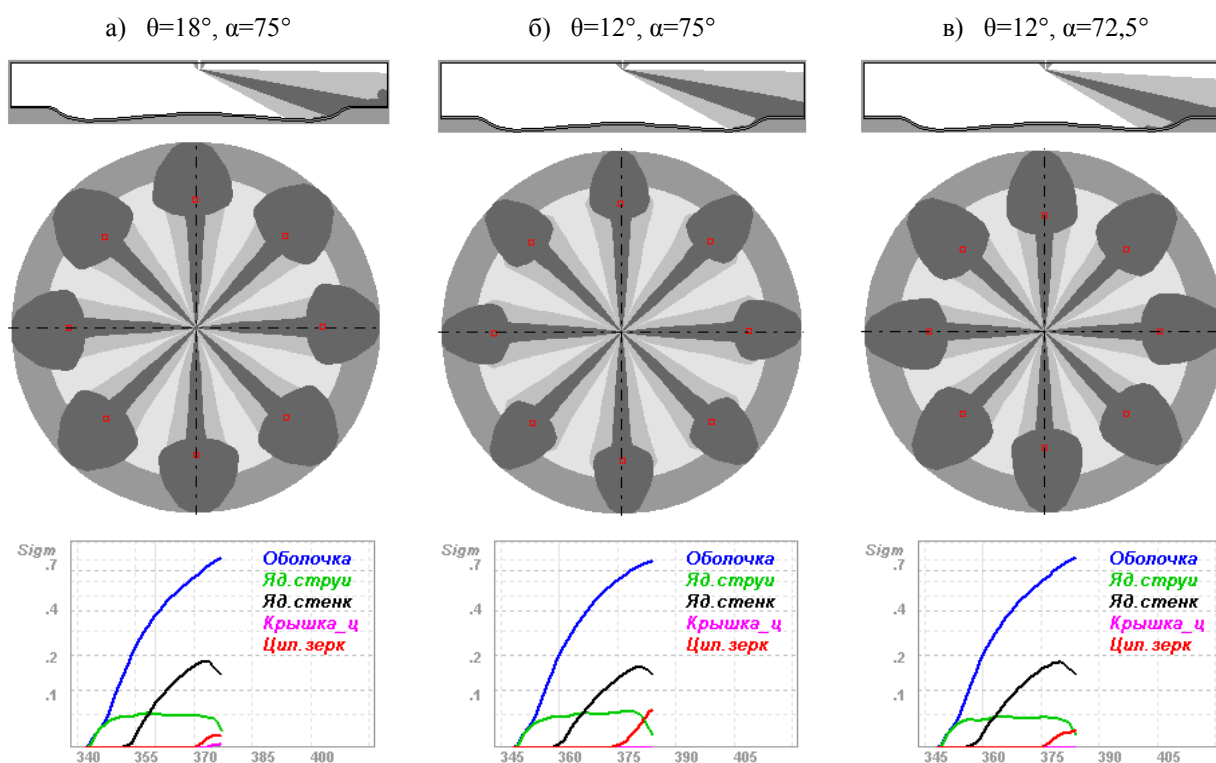


Рис. 6. Результаты исследования процессов смесеобразования при различных УОВТ (θ) и УНТС (α)

Результаты исследования рабочих процессов по УОВТ и УНТС показывают, что:

- базовый вариант характеризуется удовлетворительными условиями испарения и увеличенными выбросами NO_x с ОГ;
- при уменьшении УОВТ и сохранении базового УНТС происходит увеличение доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра, и уменьшение доли топлива в разреженной оболочке струи, что приводит к ухудшению условий испарения и сгорания топлива;
- при уменьшении УОВТ и УНТС условия испарения и сгорания топлива улучшаются в связи с возрастанием доли топлива в разреженной оболочке и уменьшением на зеркале цилиндра, в результате чего повышаются экономические показатели двигателя.

Уменьшение УНТС в интервале с $72,5^\circ$ до $67,5^\circ$ (и далее вплоть до 0) приводит к тому, что топливная струя быстрее достигает головки поршня и пристеночный поток начинает преимущественно распространяться в радиальном направлении, в результате чего уменьшается доля топлива в разреженной оболочке струи и происходит резкое увеличение доли топлива на зеркале цилиндра и заброс его на поверхность крышки цилиндра. Это приводит к ухудшению экономических показателей двигателя, резко возрастает дымность ОГ и количе-

ство несгоревших углеводородов, при этом выбросы NO_x с ОГ снижаются из-за уменьшения максимальной температуры цикла.

Для подтверждения результатов моделирования и проверки правильности выбранного УНТС изготовлены распылители с углом наклона топливных струй $72,5^\circ$ и проведены экспериментальные исследования на двигателе 8ЧН 22/28. Результаты сравнительных экспериментальных исследований представлены в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований рабочих процессов двигателя 8ЧН 22/28

Показатели рабочих процессов	Базовый	Оптимизир.
Эффективная мощность, кВт	1052	1052
Среднее эффективное давление, МПа	1,48	1,48
Эффективный КПД	0,401	0,396
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	210	213
Максимальное давление сгорания, МПа	13,9	12,1
Максимальная скорость нарастания давления (расчетная), МПа/°ПКВ	0,46	0,35
Максимальная температура (расчетная), К	1691	1608
УОВТ, °ПКВ до ВМТ	18	12
УНТС, ° относительно оси распылителя	75	72,5
Выбросы NO_x , г/(кВт·ч)	12	8,5
Уровень шума, дБА	98	92

а)



б)



Рис. 7. Состояние деталей цилиндропоршневой группы двигателя 8ЧН 22/28 с базовым (а) и оптимизированным (б) рабочими процессами

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность выбранных инженерных решений, а по состоянию цилиндропоршневой группы с четко выраженными границами распространения факелов и отложениями нагара можно судить об улучшении качества протекания рабочих процессов дизельного двигателя.

Выводы

1. Снижение выбросов NO_x с ОГ до требований IMO Tier II при сохранении энергетических и экономических показателей серийных судовых дизельных двигателей возможно путем *оптимизации рабочих процессов* за счет уменьшения угла опережения впрыска топлива и изменения угла наклона топливных струй.

2. Уменьшение скорости нарастания давления и максимального давления сгорания позволяет дополнительно, к уменьшению выбросов NO_x снизить уровень шума и продлить

срок службы дизельного двигателя за счет уменьшения динамических нагрузок, возникающих в деталях кривошипно-шатунного механизма.

3. Предлагаемые инженерные решения не требуют больших капиталовложений и являются приемлемыми для морских судов, находящихся в открытом море или в зоне Балтийского моря.

4. Снижение выбросов NO_x с ОГ до требований IMO Tier III экономически целесообразно в результате каталитической очистки ОГ. Использование каталитической очистки ОГ необходимо только в зоне контролируемых выбросов (Emission Control Areas), так как для работы катализатора требуются специальные дорогостоящие реагенты, а дополнительное сопротивление выхлопу двигателя, создаваемое катализатором, увеличивает расход топлива.

Данная работа проводилась в Нижегородском государственном техническом университете им. Р. Е. Алексева при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57714X0105).

Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41–43.
2. **Кулешов, А.С.** Программа расчета и оптимизация двигателей внутреннего сгорания Дизель-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач / А.С. Кулешов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 123 с.
3. **Новиков, Л.А.** Ограничение выбросов NO_x на уровне IMO Tier-3 для судовых дизелей отложено до 2021 года // Двигателестроение. 2013. №2(252). С. 26–32.
4. **Сеземин, А.В.** Уменьшение выбросов оксидов азота серийного судового двигателя путем организации рабочих процессов: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.04.02: защищена 25.09.2014: утв. 18.02.2015 / Сеземин Алексей Валерьевич. – Н.Новгород, 2014. – 149 с.
5. **Толшин, В.И.** Режимы работы и токсичные выбросы отработавших газов судовых дизелей / В.И. Толшин, В.В. Якунчиков. – М.: Изд-во МГАВТ, 1999. – 192 с.
6. **Ludu, A.** Emission compliance strategy for multiapplication medium speed engines / A. Ludu, T. Bouche, G. Lustgarten // CIMAC Congress 2007, Vienna. – Paper № 258. – 13 p.
7. Sailing towards IMO Tier III – Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines / G. Tinschmann [et al.] // CIMAC Congress 2010, Bergen. – Paper № 274. – 14 p.
8. **Захаров, Л.А.** Методика обеспечения экологической безопасности поршневого двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия завода ОАО «РУМО» 8ЧН 22/28 / Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2014. № 2 (104). С. 140–147.

Дата поступления
в редакцию 26.01.2016

A.V. Sezemin⁴, L.A. Zakharov¹, A.V. Degtyarev³, I.L. Zakharov¹, A.N. Tarasov²

THE RESEARCH OF FUEL INJECTION TIMING AND ANGLE OF FUEL SPRAY IMPACTING TO ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF THE PRODUCED MARINE DIESEL ENGINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,¹
LLC «Joint Engineering Centre» JSC GAZ,²
ALEXEEV'S CENTRAL HYDROFOIL DESIGN BUREAU,³
JSC «RUMO»⁴

The article describes the requirements and ways to reduce emissions of nitrogen oxides from the exhaust gases of marine diesel engines. We developed physical, geometrical and mathematical models to determine the angle of fuel spray when changing timing and duration of the fuel injection. We conducted theoretical research in the software DIESEL-RK and full-scale tests on the engine 8CHN 22/28 production of JSC «RUMO».

Key words: diesel engine, nitrogen oxides, fuel injection timing, angle of fuel spray.