

## Результаты исследований по повышению топливной экономичности и снижению токсичности дизелей

## Wyniki badań po zwiększeniu efektywności i obniżeniu toksyczności silników z zapłonem samoczynnym

## The results of experimental works on increasing of effective and lowering of toxic parameters in Diesel engines

Oleh Klyus

Maritime University of Szczecin, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Ship Power Plant Operation  
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Siłowni Okrętowych  
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1–2, e-mail: olegklus@o2.pl

**Ключевые слова:** дизель, топливная аппаратура, фумигация

### Резюме

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по увеличению эффективности и снижению уровня токсичности дизелей. Условием получения таких показателей является использование фумигации топлива в виде его контакта с гетерогенным катализатором в корпусе распылителя форсунки. Результаты лабораторных и стендовых испытаний свидетельствуют о перспективности данного направления.

**Key words:** Diesel engine, fuel equipment, fumigation

### Abstract

In the paper were presented some results of experimental works on increasing of effective and lowering of toxic parameters in Diesel engines. Possibility of receipt of this factors is using of fuel fumigation – as contact fuel with catalytic materials in a body of fuel injectors. The results of experimental works conferment of perspective this idea.

**Słowa kluczowe:** silnik z zapłonem samoczynnym, aparatura paliwowa, fumigacja

### Abstrakt

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych nad zwiększeniem efektywności pracy i obniżeniem poziomu emisji związków toksycznych silników z zapłonem samoczynnym. Warunkiem otrzymania takich parametrów jest zastosowanie fumigacji paliwa, polegającej na kontakcie paliwa z katalizatorem heterogenicznym w korpusie wtryskiwacza. Wyniki badań laboratoryjnych i stanowiskowych świadczą o perspektywach zastosowania wybranego kierunku.

## Введение

В настоящее время важнейшим направлением в развитии двигателестроения является снижение уровня эмиссии токсических компонентов в отработавших газах. Для двигателей с воспламенением от сжатия разработаны новые

технологии, использующие увеличение давления впрыскиваемого топлива и гибкость в регулировке характеристики топливоподачи, увеличение давления турбонаддува и рециркуляцию отработавших газов и другие. При этом улучшение экологических показателей получают за счет ухудшения топливной

экономичности (и наоборот), поскольку, на пример, уменьшение концентрации оксидов азота возможно при уменьшении температуры рабочего процесса, в то же время максимальный к.п.д. цикла связан с увеличением температуры в камере сгорания.

В проводимых в Щецинской Морской Академии работах предлагается использование предварительной обработки топлива (фумигации), которая осуществляется в топливной форсунке и заключается в организации турбулентного протекания топлива в распылителе вдоль поверхностей, покрытых катализатором.

### Теория предварительной обработки топлива

Основную роль в процессе тепловыделения в цилиндре дизеля играет первый этап сгорания – задержка воспламенения. Литература предмета исследований предлагает достаточно обширный материал, представляющий математические зависимости периода задержки воспламенения. При этом в основу уравнений, описывающих этот этап, положен закон Аррениуса в виде:

$$\tau \cdot p^n \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} = \text{const} \quad (1)$$

где:  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $p$  и  $T$  – давление и температура топливоздушной смеси, определяемых по  $p = \sum_i p_i$  ( $p_i$  – парциальное давление  $i$ -ого компонента, которое бы было в объеме  $V$ , если бы этот компонент занимал этот объем,  $n$  – порядок глобальных реакций для углеводородов ( $n = 1 - 2$ ),  $E_a$  – энергия активации.

Для малооборотных дизелей, величину задержки воспламенения ( $\tau$ ) можно представить уравнением Вольфера:

$$\tau = A \cdot p^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

где:  $A$  – постоянная величина, зависящая от вида топлива, его физических параметров и характеристики впрыскивания.

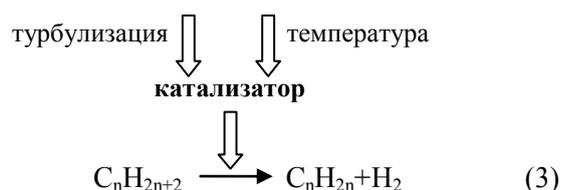
В работах проф. Б.Н. Файнлейба величина  $\tau$  определяется с учетом кинематики кривошипно-шатунного механизма и зависит от скоростного режима. От скорости поршня зависит  $\tau$  и в теории Хейвуда в работах проф. Ю.Б. Свиридова предлагается учет способа организации рабочего процесса.

Анализ теорий [1], описывающих период задержки воспламенения в дизелях показывает,

что  $\tau$  зависит от давления и температуры в цилиндре во время начала топливоподачи, частоты вращения вращения коленчатого вала и его кинематика, а так же от величины энергии активации.

При рассмотрении проблемы увеличения эффективности рабочего процесса и улучшении экологических характеристик уже существующих дизелей, параметры давления и температуры, а так же его основные конструктивные данные остаются практически неизменными, и одним из немногих направлений в решении поставленных задач, является вопрос снижения величины энергии активации. Понятие энергии активации, введенное Аррениусом, связывает переходное состояние (состояние системы, при котором уравновешены разрушение и создание связей) с энергией, необходимой для перевода системы в переходное состояние. В многоступенчатых реакциях, которые включают в себя несколько переходных состояний, энергия активации соответствует наибольшему значению энергии. После преодоления переходного состояния молекулы вновь разлетаются с разрушением старых связей и образованием новых или с преобразованием исходных связей. Существуют вещества, способные уменьшить энергию активации для данной реакции, которые называются катализаторами.

В связи с вышеизложенным, уменьшение энергии активации, при использовании контакта топлива с катализатором, приводит к уменьшению периода задержки воспламенения, что в свою очередь способствует улучшению операционных и экологических характеристик дизеля. Кроме этого, наличие катализатора в системе топливоподачи может привести к процессам дегидрогенизации углеводородных топлив, способствуя выделению свободного водорода в соответствии с реакцией:



Появление свободного водорода в еще большей степени способствует уменьшению периода задержки воспламенения вследствие высокой летности и увеличению скорости реакций окисления. В представленной формуле (3), для получения реакций дегидрогенизации используется каталитический материал, при этом для увеличения эффективности катализа-

тора желательно получение турбулизационного характера прохождения топлива вдоль каталитической поверхности, а так же наличие высокотемпературных поверхностей.

### Реализация предварительной обработки топлива в форсунке дизеля

Условия проведения предварительной обработки топлива возможны для реализации в распылителе топливной форсунки, поскольку этот элемент дизеля имеет непосредственный контакт с горящими газами камеры сгорания [2]. Прохождение топлива в цилиндрических каналах распылителя предопределяет место нанесения катализатора – вдоль кольцевой цилиндрической поверхности иглы распылителя. Кроме этого, конструкция иглы распылителя, в той ее части, которая соединяет прецизионную направляющую и запорный конус, не является рабочей, и каждые изменения в конструкции этой «нерабочей» поверхности можно использовать для нанесения катализатора и выполнения турбулизационных каналов. На рисунке 1 представлена схема получения турбулизационных каналов и способ нанесения катализатора методом электроискрового легирования.

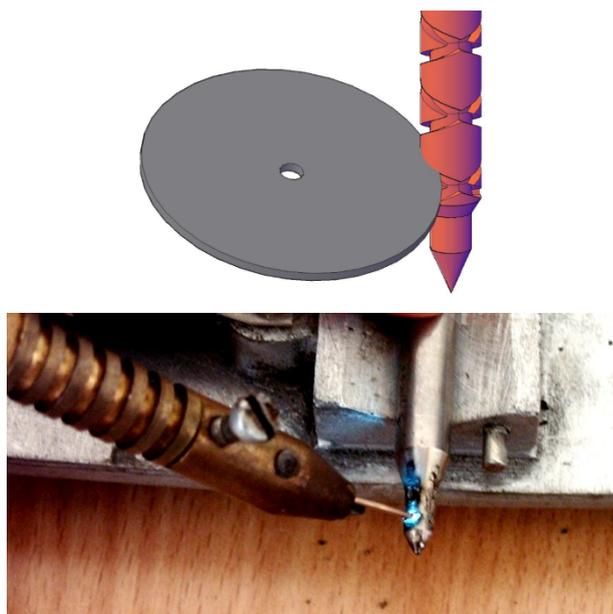


Рис. 1. Схема профилирования турбулизационных каналов и нанесение катализатора на игле распылителя дизельной форсунки

Rys. 1. Schemat wykonania kanałów turbulacyjnych oraz naniesienia katalizatora na powierzchnię iglicy wtryskiwacza silnika z zapłonem samoczynnym

Следует отметить, что выбор метода электроискрового легирования связан с использованием небольших величин тока разряда (до 10 А), что не приводит к нагреву иглы и ее температурным

деформациям. Следовательно, нанесение катализатора возможно как в технологическом процессе при изготовлении элементов топливной аппаратуры, так и во время эксплуатации на уже готовых деталях.

Выбор места нанесения катализатора способствует одновременное получение нескольких эффектов предварительной обработки топлива – каталитическая, термическая, турбулизационная, которая не только способствует увеличению частоты контакта топлива с каталитическим материалом, но и способствует гомогенизации топлива.

### Лабораторные испытания

Испытания топливной аппаратуры с предварительной обработкой топлива проходили в несколько этапов. На первом из них проводилась визуализация при помощи стробоскопа, распространения топливной струи и сравнение результатов, полученных для штатной топливной форсунки и предложенной – с турбулизацией топлива. Результаты этих работ с использованием трехдырчатого распылителя двигателя типа 359, частично представленных на рисунке 2 показали, что дальность и прозрачность факела в опытной форсунки изменились в сторону более мелкого распыливания капель и уменьшения их дальности полета.

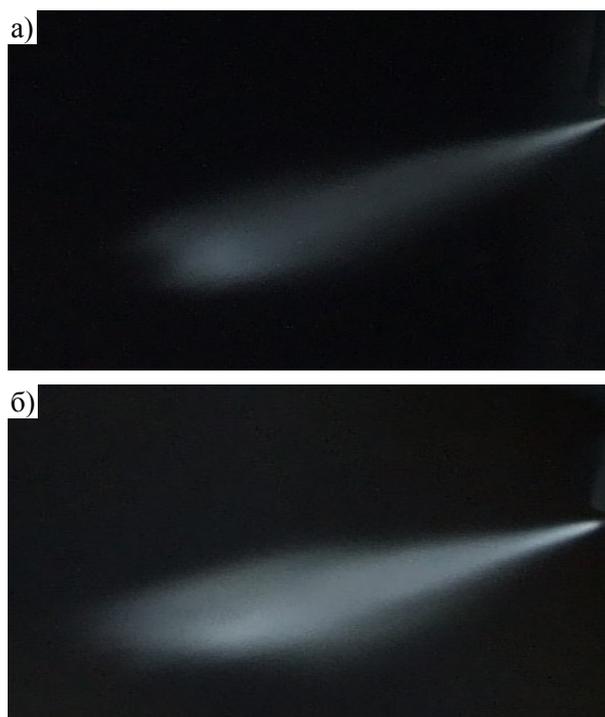


Рис. 2 Развитие топливной струи в штатной (а) и опытной (б) топливной форсунке

Rys. 2. Rozwój strugi paliwa w fabrycznym (a) oraz doświadczalnym (b) wtryskiwaczu paliwowym

Дальнейшие испытания охватывали комплекс исследований, касающихся определения физических характеристик и количественных параметров распыленной топливной струи. Как и в предыдущих исследованиях, основное внимание уделялось сравнению результатов, полученных для штатной и опытной топливной форсунки. Кроме того, весьма интересным являлось проведение испытаний для различных топлив – нефтяного происхождения и их смесей с биокомпонентами – рапсовым маслом и их метилоэстров.

На рисунке 3 представлен состав исследуемых топлив, а на рис. 4 и 5 – результаты анализа их цетанового числа и теплотворной способности.

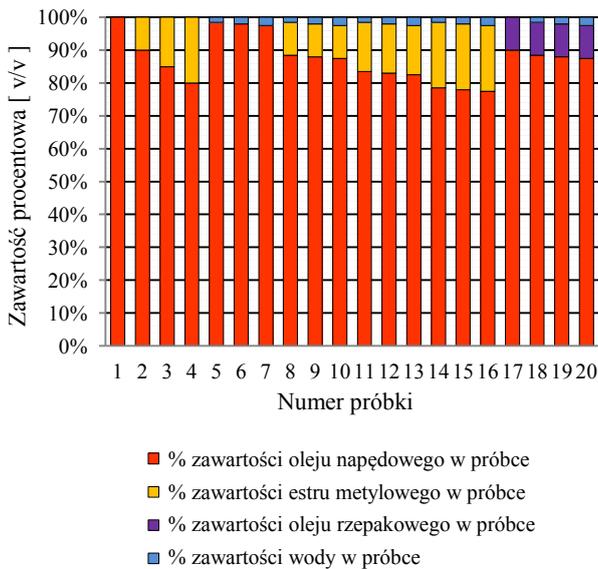


Рис. 3. Объемный состав исследуемых топлив  
Rys. 3. Objętościowy skład badanych paliw

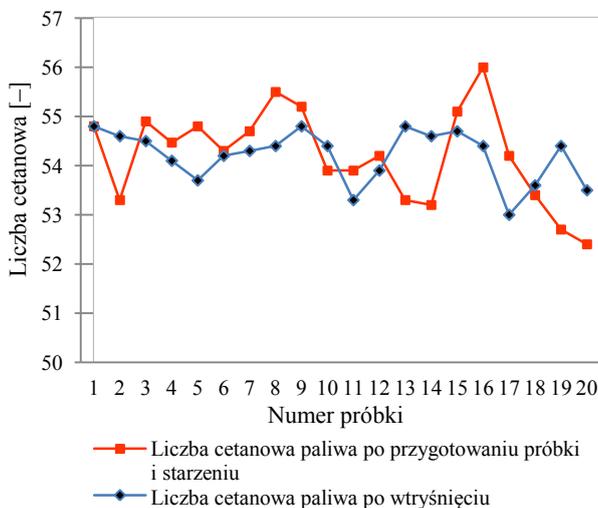


Рис. 4. Изменение цетанового числа исследуемых топлив  
Rys. 4. Zmiana liczby cetanowej badanych paliw

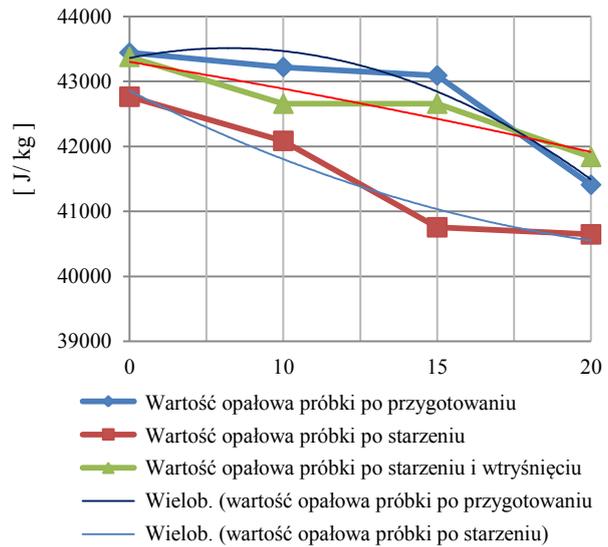


Рис. 5. Изменение теплотворной способности смеси топлив нефтяного происхождения и метилоэстров рапсового масла

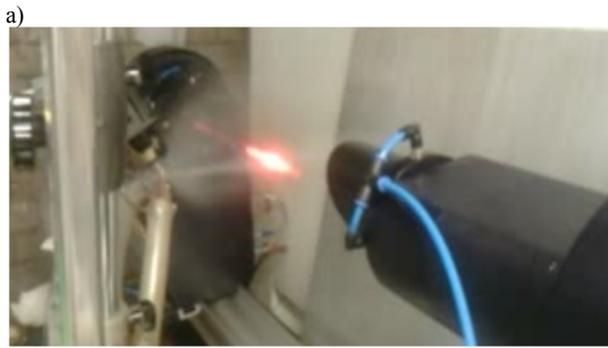
Rys. 5. Zmiana wartości opałowej mieszaniny paliw pochodzenia ropowego oraz estrów metylowych oleju rzepakowego

В итоге этих исследований получены результаты, свидетельствующие об изменении физических параметров рассматриваемых топлив, причем величины цетанового числа и теплотворной способности позволяют сделать вывод о целесообразности и перспективности предлагаемых решений.

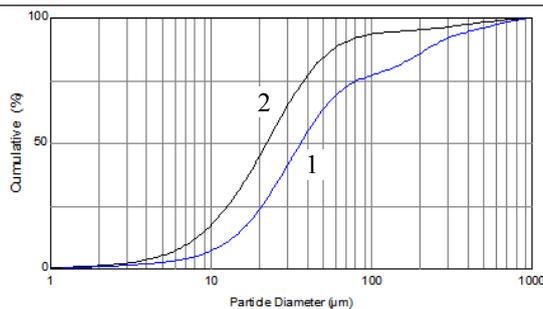
Дальнейшие испытания заключались в определении распределения капель топлива и регистрации развития струи, а так же регистрации акустического сигнала, сопутствующего процессам впрыска. Комплекс лабораторных установок включал стенд проверки и регулировки топливных форсунок типа Bosch EPS 200A, лазерная установка Malvern Instruments типа Spraytec для определения распределения капель в аэрозолях (рис. 6а), а так же необходимая регистрирующая микропроцессорная аппаратура для определения энергии акустического сигнала распыливаемого топлива.

Исследования, как и во время проведения работ с использованием стробоскопа (рис. 2) проводились на трехдырчатом распылителе на стандартном топливе, смеси (до 20%) с эстрами рапсового масла и рапсовом масле. Выбор такого типа распылителя был связан с возможностью достаточно простого разделения топливных струй и направлении одной из них в зону действия лазера.

На рис. 6б показано распределение капель в струе распыливаемого топлива с использованием штатного (кривая 1) и опытного (кривая 2) распылителей. При распыливании топлив нефтяного происхождения (ДТ), а так же их



б) Cumulative C2D PH4ND140P 1C2230.amealOverlay.s230 1 1 1 1.pso 26 Oct 2011 - 12:26:53



	Date-Time	File	Sample	Dx(10)	Dx(50)	Dx(90)
—	26 Oct 2011...	230 1 ...	230	7.22	22.19	86.76
—	26 Oct 2011...	230 2 1	230	12.23	36.13	259.85

[V]=Volume [N]=Number

Рис. 6. Процесс регистрации развития топливной струи на лазерной установке Malvern Instruments типа Spraytec (а) и распределение капель (б); 1 – штатный распылитель, 2 – распылитель с предварительной обработкой топлива  
Rys. 6. Proces rejestracji rozwoju strugi paliwowej na urządzeniu laserowym Malvern Instruments typu Spraytec (a) oraz rozkład średnicy kropeł

смеси с метилоэстрами рапсового масла (ЭРМ 5, 10 и 15%) установлено, что использование предварительной турбулизационной и каталитической обработки топлива позволяет снизить средний диаметр Заутера с 21,83 до 9,94, а так же увеличить количество капель диаметром до 20 мкм с 36% до 50,5%. Смещение кривой распределения в сторону меньших диаметров капель подтверждает гипотезу об улучшении процесса смесеобразования топливовоздушной смеси при использовании опытных распылителей.

### Стендовые испытания дизеля

Поскольку весь цикл лабораторных исследований проводился для трехдырчатого распылителя, то и для стендовых испытаний был выбран двигатель 359, оснащенный этим типом распылителя. На рисунке 7а показана скоростная характеристика дизеля в виде удельного расхода топлива, а на рисунке 7б – и эмиссии оксидов азота. Следует отметить, что основная гипотеза

использования предварительной обработки топлива с целью улучшения эффективных и экологических показателей двигателей с воспламенением от сжатия, получила свое подтверждение. Для чистого дизельного топлива снижение расхода топлива (до 6%) и уменьшение уровня концентрации оксидов азота (до 8%) было получено практически во всем диапазоне нагрузочной характеристики. Более значительные результаты были получены для эмиссии окиси углерода (снижение до 50%) и дымности (до 20%) отработавших газов.

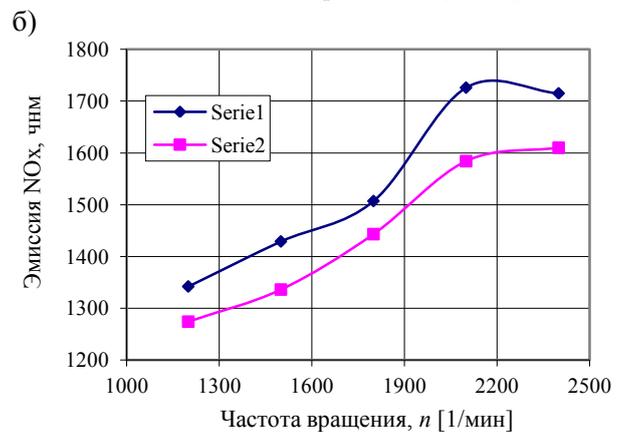
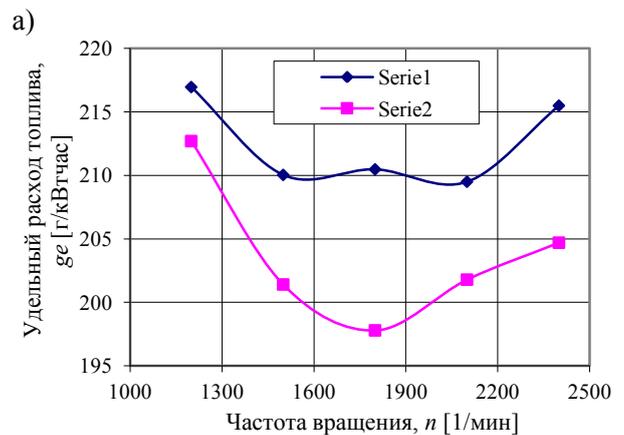


Рис. 7. Скоростные характеристики дизеля типа 359 со штатными (серия 1) и опытными (серия 2) форсунками  
Rys. 7. Charakterystyki prędkościowe silnika typu 359 z fabrycznymi (seria 1) oraz doświadczalnymi (seria 2) wtryskiwaczami

### Выводы

Совместное повышение эффективных и экологических параметров работы дизелей возможно при использовании предварительной обработки топлива непосредственно в корпусе распылителя форсунки. При этом, воздействие катализатора на протекающее в каналах распылителя топлива, позволяет снизить энергию активации, что в свою очередь уменьшает величину задержки воспламенения. Одновременно

при этом возможны реакции дегидрогенизации углеводородных топлив, позволяющих получить свободный водород, который так же снижает период задержки воспламенения. Увеличению эффективности катализатора способствуют турбулизационные каналы, выполненные на неработающей части иглы распылителя, что кроме увеличения частоты контакта топлива с катализатором, позволяет получить и гомогенизацию топлива.

## Литература

1. Клюс О.: Предварительная обработка топлива в форсунках дизелей. Изд. КГТУ, Калининград 2008.
2. KLYUS O.: Wtryskiwacz paliwa. Patent P-205428, 2010.

Unia Europejska  
Europejski  
Fundusz  
Rybacki



Operacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków finansowych Europejskiego Funduszu Rybackiego zapewniająca inwestycje w zrównoważone rybołówstwo