

УДК 629.424: 628.43.6

Е.С.Ноженко

**Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля
ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПУТЕМ ОЗОНИРОВАНИЯ ТОПЛИВА**

Обоснованы теоретические предпосылки качественного влияния озонирования на физико-химические свойства топлива и энерго-экологические показатели работы дизеля. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния озонированного топлива на рабочий процесс дизеля.

Ключевые слова: дизель, озонирование топлива, характеристика тепловыделения, удельный эффективный расход топлива, дымность

Рис 4. Форм 3. Лит 14.

О.С.Ноженко

**ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ
ЗАСОБІВ ШЛЯХОМ ОЗОНУВАННЯ ПАЛИВА**

Обґрунтовано теоретичні передумови якісного впливу озонування на фізико-хімічні властивості палива та енерго-екологічні показники роботи дизеля. Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень впливу озонованого палива на робочий процес дизеля.

Ключевые слова: дизель, озонування палива, характеристика тепловиділення, питома ефективна витрата палива, димність

O.Nozenko

**IMPROVED FUEL EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF VEHICLES BY
FUEL OZONATION**

Are proved theoretical preconditions qualitative influence of ozonation on physical and chemical properties of the fuel and energy and environmental indicators of diesel. The results of theoretical and experimental studies of the influence of ozonated fuel workflow diesel.

Keywords: diesel, fuel ozonation, the characteristic heat, specific fuel consumption, smoke

Постановка задачі. Темпы роста выбросов парниковых газов за последние двадцать лет продолжают расти. В докладе Международного энергетического агентства (МЭА) утверждается, что связанные с энергетикой выбросы в углеродном эквиваленте в прошлом году превысили 30 Гт, что на 5% больше, чем в 2008-м рекордном году [1]

При этом существующие альтернативные технологии получения и использования энергии достаточно затратны. Анализ роли существующих технологий снижения выбросов CO₂ показал, что основной эффект на данном этапе развития энергетики достигается при внедрении технологий по энергосбережению [2].

Однако, несмотря на огромное количество научно-исследовательских работ в направлении совершенствования существующих технологий сжигания топлив, за последнее десятилетие не появилось прорывных технологий, которые позволили бы в корне решить проблему эффективности сгорания топлива и соответственно снизить экологическую нагрузку от выбросов. Рост коэффициента полезного действия при преобразовании химической энергии топлива в механическую работу за последние 10 лет существенно не изменился и сохраняется на уровне 40-50% [3].

Анализ последних достижений и публикаций. Огромное распространение в последнее время получила идея об использовании альтернативных видов топлив [4], замещающих частично или полностью нефтяное топливо. Однако, в большинстве своем, для успешного использования такого топлива требуется конструктивное переоснащение ДВС или технология получения такого топлива недостаточно рациональна и экономически обоснована. Поэтому, в существующих реалиях на этапе перехода к возобновляемым источникам энергии, актуальны исследования, направленные на совершенствование организации рабочего процесса - улучшение неравномерности распределения горючей смеси по цилиндрам, уменьшение механических потерь, улучшение смесеобразования путем обработки топливовоздушной смеси различными способами (обработка электрическим полем, плазматронами, магнитным полем, ионизацией, ультразвуком), применение многоступенчатого впрыска топлива, изменение формы камеры сгорания. Особую нишу занимает применение присадок либо изменение свойств топлив.

Хорошие результаты по повышению качества сгорания топлива достигнуты при использовании цетаноповышающих присадок [5]. Заслуживают внимания работы, направленные на изменение

физико-химических свойств топлива в процессе эксплуатации ДВС, так называемое физико-химическое регулирование [6]. Основной проблемой при подобном регулировании является поиск катализатора горения или присадки, позволяющей реагировать на изменение условий работы дизеля. В качестве подобного вещества возможно использование озона для последующего озонирования топлива.

Однако подобного рода исследования тормозятся ввиду отсутствия общей фундаментальной теории горения, учитывающей качественное влияния добавок (присадок, биотоплива) на протекание процесса в целом. В основном исследователи для подобного учета используют физические свойства топлива – плотность, вязкость, поверхностное натяжение, что позволяет адекватно описать процессы впрыска, распыла, испарения и смесеобразования топлива в камере сгорания [7]. Однако практически отсутствуют работы, учитывающие изменение химической структуры топлива, его углеводородного состава, который влияет на период задержки воспламенения и протекание процесса сгорания в целом.

В фундаментальной теории горения углеводородов подобного рода исследования проводились как в Украине, так и за рубежом, описаны более 1500 стадий элементарных химических реакций при окислении углеводородов, однако до полного описания процесса горения углеводородов еще далеко. Следует отметить, что закономерности влияния катализаторов на скорость протекания реакции известны давно [8], но вследствие существенного отличия условий протекания реакции в камере сгорания затруднено применение этих закономерностей при описании влияния присадок или катализаторов горения. Ряд исследователей отмечают, что, исходя из существующей теории воспламенения распыленного топлива, качественной характеристикой этого процесса является период задержки воспламенения. Причем, как доказывается в работе [9] суммарная энергия активации E процесса принимается постоянной, не зависящей от температуры, соответствующей двустадийному окислению. Поэтому в кинетическом уравнении воспламенения

$$(\tau_1)_{x_{\text{лиг}}} \cdot P^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}} = \text{const} \quad (1)$$

величины E , n и const постоянны для каждого вида топлива и являются их кинетическими характеристиками. Следовательно, химическая составляющая периода задержки воспламенения $(\tau_1)_{x_{\text{лиг}}}$ зависит только от давления в камере P_0 и истинной температуры воспламенения в факеле T_v :

$$(\tau_1)_{x_{\text{лиг}}} = f(P_0, T_v) \quad (2)$$

Изложенные предпосылки теории воспламенения топлива позволяют утверждать, что для качественного учета изменения химической структуры топлива, вследствие ввода катализаторов горения, т.е. воздействия на структуру топлива на молекулярном уровне, возможно использование кинетических характеристик топлива, а именно суммарной энергии активации смеси E , что кроме того подтверждается и законами химической кинетики (уравнение Аррениуса, закон Ван-Гоффа) [8].

Кроме того из общих представлений о начальном этапе воспламенения, определяющем, во многом, характер протекания горения углеводородов топлива, основным влияющим фактором является количество образованных «активных центров» горения, т.е. свободных радикалов и ионизированных атомов.

Как следует из анализа, приведенного в [10], возможность озонирования топливо-воздушной смеси энергетической установки является перспективным и эффективным направлением влияния на рабочий процесс, при этом наблюдается снижение расхода топлива и выбросов вредных веществ. Однако эффект для дизельного двигателя осложняется тем, что температура воздушной смеси, особенно для двигателей с турбонаддувом, высокая, что обуславливает снижение количества образующихся радикалов кислорода O и озона O_3 и, соответственно, снижение эффекта от озонирования воздушной смеси.

Менее исследованным является способ озонирования топлива перед его подачей в камеру сгорания. Способ озонирования нефти используется в нефтепереработке в качестве способа увеличения выхода светлых фракций и снижения количества серы в бензине и газойле [11].

Проводились детальные исследования озонирования бензина, с целью снижения расхода топлива и вредных выхлопов отработавших газов [12], показавшие перспективность данного направления исследований. В результате экспериментов установлено: двигатель легче запускается в холодное время года; при оптимальной дозе озона отсутствует детонация при работе на низкооктановом топливе; наблюдается более устойчивая работа двигателя при раннем и позднем зажигании; достигается повышение мощности двигателя (до 5%); при постоянной мощности и количестве оборотов наблюдается стабильная экономия топлива (до 11%) при переходе на

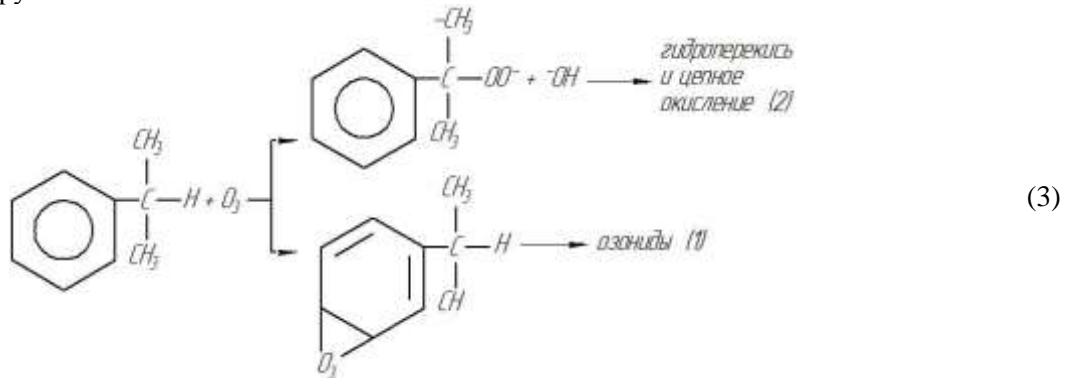
озонированное топливо; наблюдается рост октанового числа топлива (на 8-10 ед.); снижается токсичность отработавших газов (до 80%) [12].

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования [10], показали перспективность применения озонированного топлива в дизельных двигателях, однако при проведении экспериментальных исследований возник интерес к определению характеристик работы ДВС при различных параметрах озонированного топлива.

Цель статьи. Теоретическое и экспериментальное обоснование перспективности применения озонированного топлива в дизельных двигателях для улучшения его экологических и экономических характеристик.

Материалы и результаты исследования. Как отмечено в [10], озонизиру будут подвергаться, в основном, наиболее реакционноспособные ароматические углеводороды, процентное содержание алкилбензолов в дизельном топливе составляет порядка 13,5 %. Согласно [11] реакция озона с алкилбензолами может протекать двояко (3).

Причем преобладающим является направление 2 реакции (3), количество образующихся озонидов (направление 1 реакции (3)) по исследованиям [11] составляет порядка 1- 4% от общего количества продуктов реакции. К тому же, при реакции озона с ароматиками возможна разветвленная цепь (реакция 3, второе направление) - образуется два радикала, это уменьшает вероятность обрыва цепей в период задержки самовоспламенения и сокращает его продолжительность, что позитивно в итоге сказывается на технико-экономических характеристиках и экологических показателях дизелей. В то же время, в [12] отмечено, что озониды могут превращаться в органические кислотные радикальные группы.



Следовательно, в результате озонлиза дизельного топлива озон вступает в реакцию с алкилбензольными соединениями, в результате чего преобладает их цепное окисление с образованием перекисных соединений. При проведении исследований по выявлению влияния озона на физико-химические свойства дизельного топлива [10] это предположение подтверждается наличием осадка кислого характера при длительном озонировании топлива, что говорит о получении соединений, образованных при атаке алкильного заместителя по радикальному механизму (кетон, спиртов, перекисей и кислот).

В результате описанных выше механизмов возможных реакций озона с дизельным топливом, предпламенные реакции проходят несколько иным образом, а именно, на первом этапе цепного окисления углеводородов в объеме смеси уже присутствуют гидроперекисные соединения и, вместе с образованием идет одновременно и их разложение, в результате чего, происходит более интенсивный и «ранний» разогрев смеси и ускорение протекающих реакций, образование большего количества активных частиц. Это приводит к уменьшению продолжительности протекания предпламенных реакций и, следовательно, период запаздывания самовоспламенения смеси.

С целью оценки периода задержки воспламенения была преобразована существующая методика определения температуры вспышки в закрытом тигле [10], и получены аппроксимационные зависимости энергии активации дизельного топлива E от концентрации озона k , подающегося в топливо, и старении такого топлива t :

$$E = 16,234kt^2 + 0,268t^3 - 20,605t^2 + 401,726t - 286,963k - 165,657k^2t + E_m - 23100k + 5530k^2 - 29680k^3, \quad (4)$$

где E_m – энергия активации дизельного топлива, до его озонирования.

Это позволило теоретически оценить величину периода задержки воспламенения в соответствии с (1) и далее смоделировать протекание процесса сгорания в цилиндре дизеля.

Результаты экспериментальных исследований [10] свидетельствуют, что наиболее существенное влияние озон оказывает на величину суммарной энергии активации дизельного

топлива, что объясняется изменением химической структуры топлива при его озонировании. Влияние дозирования озono-воздушной смеси в топливо, в основном, связано с хемосорбцией и реакциями озонлиза в жидкой фазе. Влияние озона на процесс горения при его микродобавках в топливо объясняется образованием пероксидных соединений и последующим цепным их распадом на свободные радикалы, которые и вызывают детонацию в зоне горения. Время существования свободных радикалов ограничено, поэтому длительное хранение озонированного топлива приводит к синтезу в его объеме кислот и снижает способность к полному сгоранию. Это подтверждается тем, что при длительном озонировании топлива наблюдалось выпадение растворимого в щелочи осадка, что указывает на необратимые изменения в топливе [10].

Результаты выполненного впоследствии моделирования протекания процесса сгорания в цилиндрах дизеля Д49 по методике Н.Ф. Разлейцева объясняются предпосылками влияния озонирования на период задержки воспламенения. Как следует из (4) при озонировании топлива удельная эффективная энергия активации уменьшается, что, в свою очередь, приводит к сокращению периода задержки воспламенения (1). А, как следует, из результатов моделирования характеристики тепловыделения, например на номинальном режиме (рис. 3), ее первый максимум сдвигается в сторону в.м.т., что в свою очередь приводит к увеличению максимального давления сгорания, как видно из рис. 1, и, следовательно, к сокращению удельного эффективного расхода топлива (рис. 4).

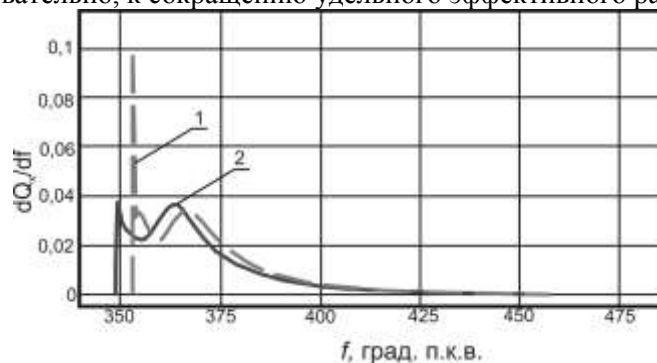


Рис. 3. Характеристика тепловыделения дизеля Д49 на номинальном режиме при работе: 1 – на ДТ; 2 – на ДТ+озон

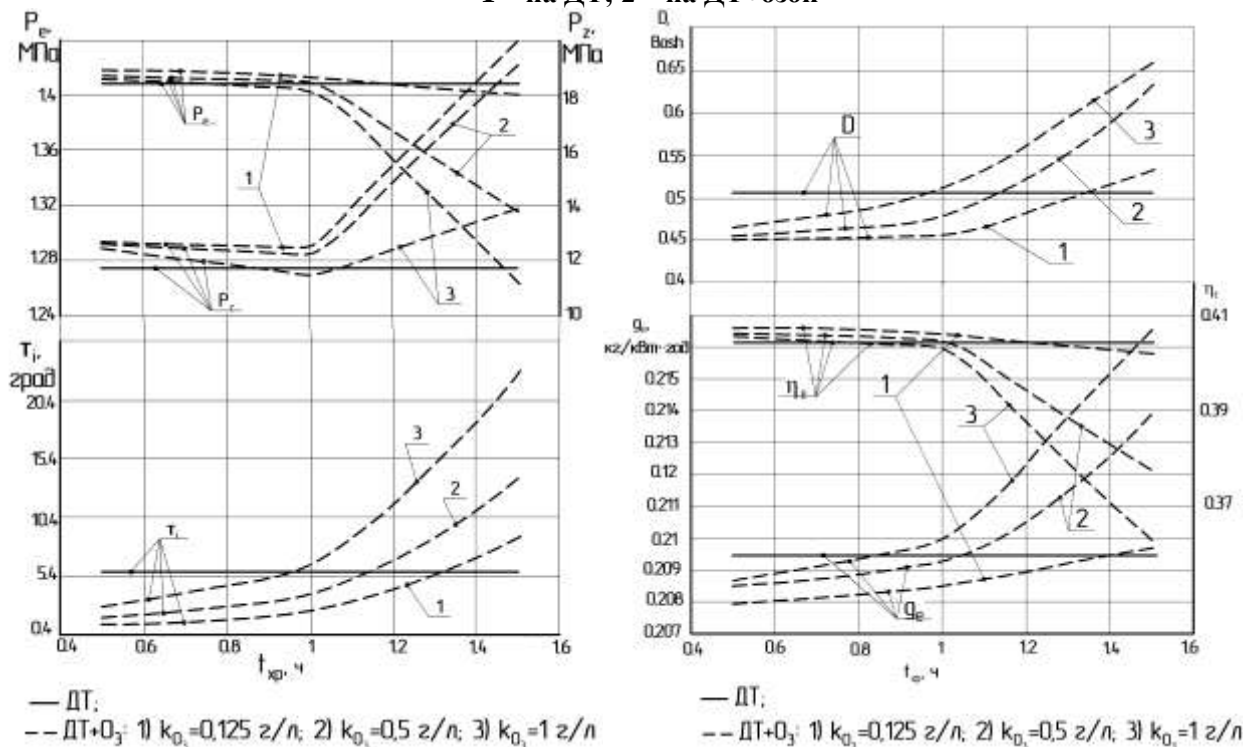


Рис. 4. Параметры работы дизель Д49 на номинальном режиме при работе на дизельном топливе (ДТ) и на озонированном дизельном топливе (ДТ+О₃) с разной концентрацией озона, подаваемого в топливо в зависимости от времени хранения озонированного топлива

Из результатов численного эксперимента следует, что существует предел использования озонированного топлива, при превышении которого наблюдается ухудшения удельного

эффективного расхода топлива g_e и дымности по сравнению с использованием обычного дизельного топлива, при этом определяющее значение имеет время хранения озонированного топлива t_{xp} . При хранении его более 1,5 часов наблюдается резкое ухудшение удельного эффективного расхода топлива g_e дизель-генераторной установки.

При моделировании дымности отработавших газов (рис. 4), эффект от озонирования топлива, объясняется более совершенным процессом сгорания, ввиду описанных выше процессов, а также с учетом разложения озоном серосодержащих соединений, выпадающих в осадок [10], что хорошо согласуется с результатами исследований по окислительному обессериванию нефти и моторных топлив на нефтеперерабатывающих заводах. При этом выпадение серосодержащих соединений объясняет эффект снижения дымности в результате озонирования по прошествии длительного времени с момента озонирования. Влияние концентрации озона в топливе на экономические и экологические показатели тепловозного дизеля также объясняются протеканием химических реакций в топливе и образующимися перекисными соединениями.

ВЫВОДЫ

Озонирование топлива приводит к образованию в составе топлива перекисных соединений, увеличение которых приводит к снижению условной энергии активации, что подтверждается экспериментальными исследованиями на основании которых получена зависимость величины энергии активации от концентрации озона и старении топлива, что говорит о нестабильности свойств озонированного топлива и необходимости проведения процесса озонирования непосредственно на транспортном средстве. Установлено, что существуют предельные уровни параметров озонирования, характеризующие эффективность способа озонирования дизельного топлива, которые составляют: время хранения озонированного топлива $t_{xp} = 0 \dots 1$ часа; концентрация озона, подаваемого в топливо, $k_{O_3} = 0,1 \dots 0,5$ г/л. Моделирование рабочего процесса дизеля Д29 показало снижение эксплуатационного удельного эффективного расхода топлива на 1,6%.

1. Kick the Habit. A UN Guide to Carbon Neutrality. – 2008.
2. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives – 2006, 479 pp. www.iea.org.
3. Романов, К. Двигателестроение как драйвер роста ОПК/ К. Романов// РЦБ. – №11. – 2007.
4. Werner K. Status and Development of biodiesel production and projects in Europe / K. Warner // SAE Tech. Pap. Ser. – 1995. - №952768. – P. 249 - 254.
5. Данилов А.М. Состояние и перспективы применения присадок к топливу в России и за рубежом / А.М. Данилов // Технология ТЭК. – 2004, №2. – С. 7 - 14.
6. Казначеевский В.Л. Повышение энергетических, экономических и экологических качеств дизеля 8Ч13/14 регулированием физико-химических свойств топлива. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02/ В.Л. Казначеевский. – М.: РУДН, 2006. – 168 с.
7. Семенов Б.Н. Теоретические и экспериментальные основы применения в быстроходных дизелях топлива с различными физическими и химическими свойствами: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Б.Н. Семенов. – Л., 1978. – 44 с.
8. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н.Н. Семенов // Успехи физ. наук. – 1940. – Т. XXIII, вып. 3. – С. 251 - 292.
9. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях / Ю.Б. Свиридов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 224 с.
10. Ноженко Е.С. Повышение энергетической эффективности тепловоза активацией рабочих сред: дисс... канд. техн. наук: 05.22.07/ Е.С. Ноженко. – Луганск: ВНУ им. В.Даля, 2010. – 207 с.
11. Лихтерова Н.М. Превращения углеводородов нефти под действием пучка активных электронов и озона. / Н.М. Лихтерова, В.В. Лунин, В.Н. Торховский и др. // Химия и технология топлив и масел. - 1999. № 4. – С. 38 - 43.
12. Столяренко Г. С. Теоретические основы гетерофазных озонных процессов и технология денитрификации газовых потоков: дисс. ... докт. техн. наук: 05.17.01 / Г.С. Столяренко – К.: НТУ «КПИ», 2000. – 440 с.
13. 11. Разумовский С.Д., Заиков Г.У. Озон и его реакции с органическими соединениями / С.Д. Разумовский, Г.У. Заиков. – М.: Наука, 1974. - 239 с.
14. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2014